



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

THIAGO CAVALCANTI BANDEIRA

**PROJETO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO PARA
LABORATÓRIOS DE ALTA TENSÃO**

Campina Grande, Paraíba
Dezembro de 2010

THIAGO CAVALCANTI BANDEIRA

PROJETO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO PARA
LABORATÓRIOS DE ALTA TENSÃO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do curso de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Aterramentos elétricos

Orientador:

Professor George Rossany Soares de Lira

Campina Grande, Paraíba
Dezembro de 2010

THIAGO CAVALCANTI BANDEIRA

PROJETO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO PARA
LABORATÓRIOS DE ALTA TENSÃO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do curso de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande como parte
dos requisitos necessários para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia
Elétrica.*

Área de Concentração: Aterramentos elétricos

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor George Soares Rossany de Lira
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me dado o direito da vida, por todas as manifestações divinas.

Gostaria de agradecer ao meu orientador de trabalho, Professor George S. R. de Lira, por todo o suporte intelectual necessário à confecção deste trabalho. Também, pela sua total disponibilidade e dedicação durante este caminho.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas de curso por fazerem o dia-a-dia na nossa UFCG serem menos dolorosos.

Agradeço a Felipe e João Marcelo, que me ajudaram com as medições no Laboratório.

Agradeço ao doutorando Gilvan, por ter dado suporte na utilização do TecAt Plus.

Agradeço a todo o pessoal que faz parte do Departamento de Engenharia Elétrica. Em especial a Adail, Tchaikovsky, Professor Talvanes e Professor Mário Araújo (coordenador da graduação no momento do meu ingresso na instituição).

Agradeço à minha namorada, Mathilde, pela compreensão dos meus momentos de ausência, e por fazer os meus dias duros mais felizes.

Agradeço a minha mãe, Adelaide, por ser a pessoa mais importante na minha vida, devido a tudo o que se passou durante minha história.

Agradeço a minha irmã, Thais, por toda a vivência no ambiente familiar.

RESUMO

Neste trabalho é feito uma revisão bibliográfica sobre aterramento em laboratórios de alta tensão resultando em: uma introdução teórica, breve trecho histórico e conceituação sobre aterramentos elétricos. Posteriormente foram realizadas medições da resistividade do solo e com o auxílio de um “software” especializado foi proposto um sistema de aterramento para o Laboratório de Isolamento (LABIS), localizado na Universidade Federal de Campina Grande.

Palavras-chave: Aterramento Elétrico, Laboratório de alta tensão.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	8
1.1	Motivação	8
1.2	Objeto de Estudo.....	8
1.3	Breve histórico do aterramento elétrico	8
2	Conceitos sobre Aterramento Elétrico.....	10
2.1	O Aterramento	10
2.2	Neutro, terra e massa.....	11
2.3	Resistividade do solo	11
2.4	Fatores que influenciam a resistividade do solo.....	12
2.4.1	Umidade do solo.....	12
2.4.2	Temperatura do solo	13
2.4.3	Composição química	15
2.4.4	Estratificação do solo.....	16
2.4.5	Compacidade do solo.....	17
2.4.6	Granulometria do solo	17
2.5	Aplicações do Aterramento.....	18
2.6	Formas de conexão ao solo	19
2.6.1	Sistema isolado	19
2.6.2	Sistema solidamente aterrado	19
2.6.3	Sistema aterrado por impedância.....	20
2.7	Classificação dos esquemas de aterramento.....	20
3	Considerações sobre segurança	24
3.1	Caracterização de condições de risco.....	24
3.1.1	Tensão de contato ou de toque.....	24
3.1.2	Tensão de passo.....	25
4	Aterramento em laboratórios de alta tensão	27
4.1	Fatores que afetam a impedância de aterramento nos laboratórios de alta tensão	27
4.2	Aterramento dos equipamentos do laboratório	28
4.2.1	Aterramento de equipamentos eletrônicos.....	28
5	Malha de aterramento do laboratório.....	30
5.1	Procedimentos para projeto.....	30
6	Métodos e Ferramentas.....	31
6.1	Método De Medição	31
6.2	Terrômetro Digital	33
6.3	TecAt Plus 5.2®.....	34
6.4	Medições.....	35
6.3.1	Utilização Do Instrumento.....	35

6.3.2	Considerações Para As Medições.....	35
6.3.3	Resultados.....	37
7	Malha Proposta.....	39
7.1	Resistividade do solo	39
7.2	Planta da Malha	40
7.3	Materiais a utilizar	40
7.4	Resistência da malha de aterramento	41
7.5	Níveis de potenciais na Malha	41
8	Conclusão	44
	Referências Bibliográficas.....	45

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Nos últimos anos vem crescendo a preocupação, por parte das concessionárias de energia elétrica, referente à qualidade da energia entregue aos consumidores. Neste contexto, os sistemas de aterramento desempenham um papel de fundamental importância, especialmente quando se leva em conta a segurança das pessoas e equipamentos ligados às linhas de distribuição e de transmissão de energia elétrica. Toda instalação elétrica de alta e baixa tensão, para funcionar com desempenho satisfatório e ser suficientemente segura contra riscos de acidentes fatais, deve possuir um sistema de aterramento dimensionado adequadamente para as condições de cada projeto.

Um sistema de aterramento visa principalmente:

- A segurança e confiabilidade na atuação da proteção;
- A proteção das instalações contra descargas atmosféricas;
- A proteção do indivíduo contra contatos com partes metálicas energizadas acidentalmente;
- Uniformização do potencial em toda área do projeto, prevenindo lesões que possam surgir durante uma falta para a terra.

1.2 OBJETO DE ESTUDO

O objeto deste trabalho é conceituar e propor um sistema de aterramento para o Laboratório de Isolamento (LABIS), localizado ao lado do Laboratório de Alta Tensão (LAT), na UFCG.

1.3 BREVE HISTÓRICO DO ATERRAMENTO ELÉTRICO

A partir de 1820, sistemas eletromagnéticos de telegrafia utilizavam dois fios para transmitir os sinais e as correntes de retorno. Por volta de 1836, Karl August Steinheil, um cientista alemão, descobriu que o solo poderia ser usado como um

caminho de retorno para fechar o circuito. Ele observou que a Terra poderia funcionar como parte do circuito, da telegrafia, como um condutor de retorno, se os terminais dos fios de ambas as partes fossem enterrados no solo. Esta evolução alterou profundamente a concepção de receptores de telégrafo, pois o fio de retorno era desnecessário. Como resultado, os custos associados com as linhas telegráficas também diminuiram.

Em 1851, havia dezenas de empresas de telégrafo em operação nos Estados Unidos, sendo a Western Telegraph Company como uma das mais populares.

Em 1861, a empresa completou a primeira linha de telégrafo transcontinental entre Saint Joseph, Missouri, e Sacramento, Califórnia. Todas as linhas utilizavam aterramento elétrico, mas a maioria ainda apresentava problemas. A maioria dos problemas de aterramento foram resultado da baixa condutividade do solo, decorrente do tempo seco na região e muitas vezes, água deveria ser jogada ao redor da barra de aterramento.

Hoje, para uma atuação correta de um Sistema de Energia Elétrica, com adequada continuidade de serviço, desempenho seguro do sistema de proteção e garantia dos limites de segurança pessoal, é de fundamental importância o Aterramento adequado.

2 CONCEITOS SOBRE ATERRAMENTO ELÉTRICO

2.1 O ATERRAMENTO

O Aterramento Elétrico consiste em uma ligação elétrica proposital de um determinado sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo. (VISACRO FILHO, S. 2002)

As partes do sistema que devem ser conectados ao solo podem ser de formas e materiais variados. De acordo com a aplicação, estas podem ser desde a carcaça de máquinas, carcaça de computadores, neutro do transformador, fundações para construção civil, até, o neutro de um sistema elétrico, dentre outros. A forma dos eletrodos de aterramento, que fazem a conexão com o solo, pode ter configuração muito diversificada e se constitui de qualquer corpo metálico enterrado no solo.

Quando o telégrafo foi substituído pelo telefone como principal dispositivo para comunicação a longas distâncias, o aterramento elétrico passou a ser usado em ferrovias elétricas, etc. Podendo ter configurações usuais como cantoneiras de ferro galvanizado, sistemas hidráulicos ou malhas reticuladas.

As estratégias de aterramento são específicas para cada aplicação, variando a disposição geométrica e quantidade de ligações. Destacam-se as hastes verticais, com resultado satisfatório para aplicações em solos com as camadas mais profundas tendo menor resistividade. Porém, em subestações ou localidades de média e alta tensão é mais indicado e satisfatório o uso de malhas de aterramento. Os componentes horizontais, enterrados a profundidades da ordem de 0,5 metros, são usados principalmente quando a maior preocupação é o gradiente de potencial ao longo da superfície do solo.

Para se analisar um aterramento, deve-se considerar que a conexão à terra apresenta resistência, capacitância e indutância, cada qual influenciando na capacidade de condução da corrente pra terra. Porém, em muitas aplicações, as referências são feitas à sua resistência, e não impedância.

2.2 NEUTRO, TERRA E MASSA

Antes de adentrar nos conceitos de um sistema de aterramento, se faz necessário um bom entendimento sobre as definições do que é terra, neutro e massa.

Define-se:

- i. O **Neutro** como o condutor fornecido pela concessionária por onde há o retorno da corrente elétrica.
- ii. O **Terra** é um condutor obtido através de um sistema de aterramento que, em situações normais (regime permanente) não deve existir corrente elétrica circulante.
- iii. A **Massa** pode ser definida como a carcaça de qualquer equipamento.

Resumindo, a grande diferença entre Terra e Neutro é que, pelo neutro há, com maior frequência, corrente circulando, enquanto pelo Terra, não. Quando houver alguma corrente circulando pelo terra, normalmente ela deverá ser transitória, drenando uma descarga atmosférica, por exemplo. Por norma, o fio elétrico do Terra deve vir identificado pelas letras PE, e deve ser de cor verde e/o amarela (CAPELLI, A. 2000).

Considere um equipamento elétrico monofásico (e.g. uma geladeira comum de uso residencial) que é alimentado por uma concessionária de energia elétrica. Tal concessionária só liga a caixa de entrada ao poste externo se houver uma haste de aterramento padrão na instalação do usuário. Teoricamente, o terminal neutro da concessionária deve ter o potencial igual a zero volt. Mas, devido ao desbalanceamento nas fases do transformador de distribuição, é comum esse terminal tender a assumir potenciais diferentes de zero.

O desbalanceamento das fases ocorre quando há consumidores com demandas de potência monofásicas muito diferentes, ligadas a um mesmo transformador de distribuição. Para evitar que esse potencial “flutue”, liga-se o fio neutro a uma haste de terra, escoando, assim, qualquer potencial que tenderia a aparecer.

2.3 RESISTIVIDADE DO SOLO

A resistividade do solo (ρ) pode ser definida como a resistência elétrica (R) medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias (aresta l de 1 m, área

das faces A de 1 m²) preenchido com o solo em questão (VISACRO FILHO, S. 2002). Sendo a unidade ohm metro (Ωm), tem-se a Equação 1:

$$\rho = R(A/l) \quad (1)$$

Para o projeto de um sistema de aterramento, é primordial o conhecimento prévio das características do solo, principalmente no que diz respeito à homogeneidade da sua constituição (MAMEDE, J. F. 2007).

Em seu estado natural, o solo é um mau condutor de eletricidade. Isento de umidade este se comporta como um material isolante. De acordo com a Tabela 2.1, pode-se perceber que a resistividade do solo é bastante elevada se comparada a condutores convencionais.

Tabela 2.1 – Ordem de grandeza da resistividade em alguns materiais

Condutor	Resistividade (Ωm)
Cobre puro	1,6.10 ⁻⁸
Alumínio	2,7.10 ⁻⁸
Húmus	10 a 150
Lodo	20 a 100
Argila seca	1500 a 5000
Areia comum	3000 a 8000

2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTIVIDADE DO SOLO

A resistividade do solo é função de vários fatores. A seguir, tais fatores são apresentados.

2.4.1 UMIDADE DO SOLO

A resistividade do solo sofre alterações com a umidade. Esta variação é devido à condução de cargas elétricas no mesmo serem predominantemente iônica. Um percentual de umidade maior faz com que os sais, presentes no solo, se dissolvam, formando um meio eletrolítico favorável à passagem da corrente iônica. Para que a eletrólise se estabeleça é essencial a existência da água e dos sais que vão prover os íons

da mistura. Com isso, a condutividade do solo é sensivelmente afetada pela quantidade de água nele contida, sendo que o aumento da umidade do solo implica diminuição da sua resistividade, i. e., permite mais facilmente a passagem da corrente elétrica.

Por este motivo, os eletrodos de terra devem ser implantados a uma profundidade adequada para a necessária umidade do solo em torno deles.

O teor normal de umidade de um solo, além de variar com a localização, depende também da época do ano, podendo nos períodos seco oscilar em torno de 10% e em período de chuva pode atingir até 35%. A utilização de uma camada de brita de 100 a 200 mm sobre a área aterrada serve para retardar a evaporação de água do solo, além de oferecer uma elevada resistividade.

Na Figura 2.1 é apresentado um gráfico que estabelece a relação entre a resistividade e a umidade para um solo arenoso. Observa-se que a resistividade diminui com o aumento da quantidade de água diluída no solo para variações do índice de 0 a 30% (VISACRO FILHO, S. 2002).

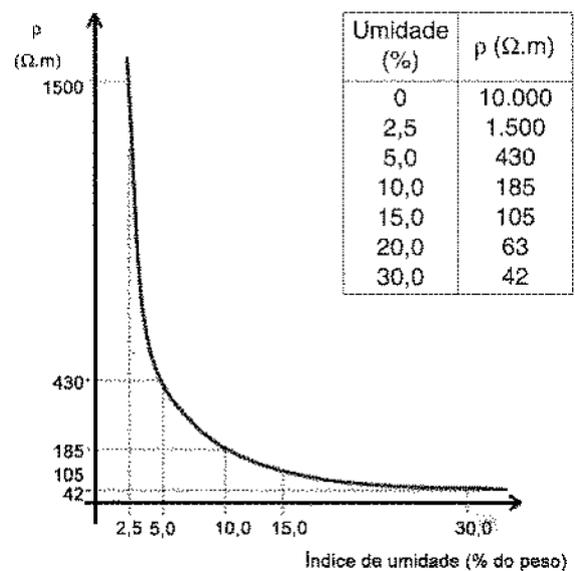


Figura 2.1 – Efeito da umidade na resistividade do solo
Fonte: Visacro Filho, S. 2002

2.4.2 TEMPERATURA DO SOLO

A resistividade do solo e, conseqüentemente, a resistência de um sistema de aterramento são bastante afetadas quando a temperatura se aproxima de 0°C. Para temperaturas acima deste valor, a resistividade e a resistência de aterramento do solo diminuem.

As correntes de curto-circuito de valor elevado, envolvendo a terra, podem ocasionar elevação da temperatura do solo em torno do eletrodo, causando evaporação de água, com conseqüente redução da umidade do solo e elevação da sua resistividade. Com isso, o desempenho do sistema de aterramento é muito afetado.

Para um mesmo solo arenoso, mantendo todas as demais características e variando apenas a temperatura, sua resistividade comporta-se de acordo com a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Variação da resistividade com a temperatura

Temperatura (°C)	Resistividade (Ωm)
20	72
10	99
0 (água)	138
0 (gelo)	300
- 5	790
- 15	3300

Para analisar os efeitos da temperatura de um solo em sua resistividade, a sua umidade e temperatura devem ser consideradas, assim como os outros fatores relacionados.

A Figura 2.2 ilustra a influência da temperatura na resistividade da água.

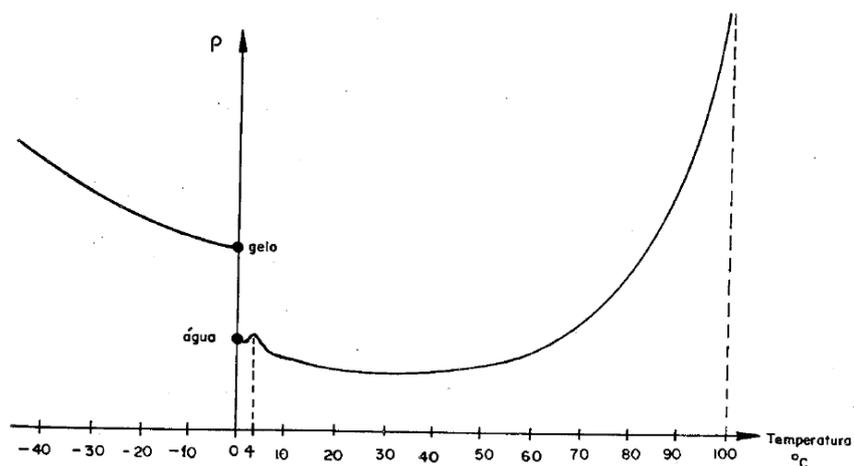


Figura 2.2 – Comportamento da resistividade da água em função da temperatura
Fonte: Kindermann, G. 1995

2.4.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A presença e a quantidade de sais solúveis e ácidos que são encontrados agregados ao solo têm bastante influência no valor da resistividade do mesmo. Se for necessário reduzir a resistência de uma determinada malha de terra, tem-se que preparar previamente o solo, através da adição adequada de produtos químicos neste. Existem vários produtos químicos à base de mistura de sais, que, combinados entre si na presença de água, formam o GEL, produto de uso comercial e de grande eficiência na redução da resistividade do solo (MAMEDE, J. F. 2007).

Esses compostos têm as seguintes características:

- São higroscópicos;
- Dão estabilidade química ao solo;
- Não são corrosivos;
- Não são atacados pelos ácidos;
- São insolúveis na presença de água;
- Têm longa duração (geralmente de 5 a 6 anos);

O tratamento do solo através da utilização de sal e carvão vegetal, ainda de largo uso entre alguns instaladores, não apresenta os efeitos esperados, principalmente pela curta duração de sua eficiência e também pela agressão corrosiva nos eletrodos de terra.

Na Tabela 2.3 é mostrada a relação entre a quantidade de sal adicionado a um solo arenoso, de umidade 15% (percentual em peso) e temperatura de 17° C e sua resistividade (MARKVITS, LEON, 1977).

Tabela 2.3 – Influência da concentração de sais na resistividade do solo (17° C, 15% de umidade)

Sal adicionado (% em peso)	Resistividade (Ωm) Solo arenoso
0	107
0,1	18
1,0	1,6
5,0	1,9
10,0	1,3
20,0	1,0

2.4.4 ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

Em sua grande maioria, os solos não são homogêneos, mas sim formados por diversas camadas de resistividade e profundidade diferentes. Devido à formação geológica, essas camadas são geralmente horizontais e paralelas à superfície do solo. Existem casos em que as camadas se apresentam inclinadas e até verticais, devido a alguma falha geológica. Os estudos apresentados para pesquisa do perfil do solo as consideram aproximadamente horizontais, uma vez que os outros casos são menos típicos.

O solo apresenta características anisotrópicas (característica que uma substância possui em que uma certa propriedade física varia com a direção), quando por exemplo camadas mais profundas afloram em determinados locais ocasionam descontinuidades na superfície.

Como resultado da variação das camadas do solo, tem-se a variação da dispersão de corrente. Na Figura 2.3 é apresentado o comportamento dos fluxos de dispersão de correntes em um solo heterogêneo, em torno do aterramento. Pode-se perceber pela ilustração que, a corrente elétrica irá se dispersar melhor na camada que oferecer menor resistividade.

Parece, intuitivamente, lógica a existência de uma correlação entre a resistividade do solo e sua estrutura geológica, quando são considerados os processos naturais de formação da crosta terrestre e a natureza dos materiais que a compõem. Rochas muito antigas possuem alto valor de resistividade, e este valor decresce com a diminuição da idade das mesmas.

O extrato da crosta terrestre, composto pelas camadas mais superficiais do solo, foi formado pela deposição de materiais provenientes da erosão de elevações, sobre as terras baixas, mares e lagos internos.

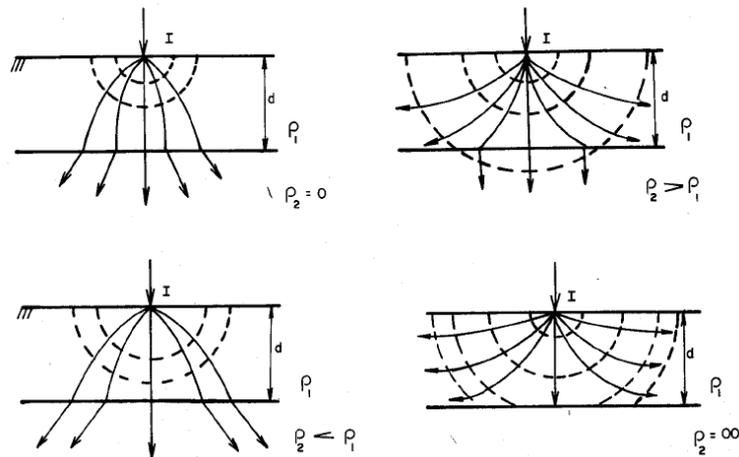


Figura 2.3 – Estratificação do solo em duas camadas e, comparativos de resistividade
 Fonte: Kindermann, G. 1995

2.4.5 COMPACIDADE DO SOLO

Um solo que é mais compacto que outro, apresenta uma maior continuidade física, o que proporciona um menor valor de resistividade. Por isso, é recomendada a espera de certo tempo após a instalação de um aterramento elétrico, para se fazer a medição de sua resistência. O solo demora um pouco para se acomodar e tornar-se mais compacto.

Um aumento de pressão sobre o solo ocasiona geralmente maior compactidade deste, reduzindo a sua resistividade.

2.4.6 GRANULOMETRIA DO SOLO

A diversidade dos tamanhos dos grãos é importante quando se trata de resistividade do solo. Essa influência deve ser considerada em dois aspectos:

- Continuidade física do solo;
- Capacidade de retenção de água nas camadas do solo;

Devido ambos os aspectos, uma granulometria maior tende a aumentar a resistividade, visto que um menor contato entre os grãos resultam em uma menor continuidade elétrica. É por este fator que é recomendado a utilização de uma camada de brita acima dos sistemas de aterramento.

2.5 APLICAÇÕES DO ATERRAMENTO

O aterramento pode desempenhar várias funções no sistema de energia elétrica. Entretanto, as aplicações estão associadas a dois fatores fundamentais:

- Desempenho do sistema ligado ao aterramento;
- Questões de segurança dos seres vivos e de proteção dos equipamentos;

Para o primeiro caso, quando corrente alternada ou contínua é injetada no aterramento, pode-se usar o solo como condutor efetivo de retorno. Para o segundo caso, o aterramento pode ser considerado um fator de segurança, por permitir o escoamento de correntes para a terra e promover a distribuição segura de potenciais na superfície do solo, nas ocorrências de uma injeção de corrente em seus eletrodos.

Assim, é possível citar um conjunto de aplicações:

- Uma ligação à terra é um fator de segurança pois permite o escoamento de cargas ou correntes para a mesma. Com tal prática se conseguem minimizar os efeitos indesejáveis de energização de partes metálicas de sistemas, expostas ao contato de pessoas e animais. Minimiza-se também o carregamento de cargas estáticas em corpos ou equipamentos industriais, cuja descarga pode originar faíscas ou irradiação eletromagnética.

- É necessário se limitar os níveis de potenciais, por meio de práticas adequadas de aterramento. As tensões induzidas em corpos metálicos por fenômenos atmosféricos ou linhas energizadas próximas a tais corpos, podem ser minimizadas pela conexão dos mesmos ao solo. Também, pode-se alcançar uma minimização dos gradientes de potencial na superfície do solo.

- O uso da terra como um condutor de retorno, a exemplo do sistema MRT (Monofásico com Retorno pela Terra) empregado na distribuição rural, dos sistemas de transmissão de corrente contínua (CC) e outros sistemas. Nesses casos se faz necessário o máximo de cuidado com ponto de injeção da corrente no solo.

- O aterramento de certos pontos do sistema para melhorar o desempenho do mesmo, podendo resultar no estabelecimento de um potencial de referência para os circuitos. Associado à filosofia de proteção do sistema, a prática de aterrar o neutro de sistemas polifásicos pode apresentar diversos aspectos de interesse. Quando ocorre uma falta do sistema, o desequilíbrio resultante causa o aparecimento de correntes no solo, entre os pontos de aterramento. A proteção é baseada na detecção dessas correntes, as

quais sensibilizam os dispositivos de proteção, permitindo isolar prontamente os circuitos ou equipamentos defeituosos.

2.6 FORMAS DE CONEXÃO AO SOLO

A forma como o sistema elétrico é conectado ao solo pode ser referido como tipo ou forma de aterramento do sistema. Existem basicamente três tipos de práticas:

2.6.1 SISTEMA ISOLADO

Neste caso não existe conexão condutiva proposital entre o sistema elétrico e o solo. O acoplamento entre ambos pode ser considerado como fraco e se faz, principalmente, de forma capacitiva. O nível das máximas sobretensões nesse tipo de sistema é elevado e existe dificuldade na localização de eventuais faltas para a terra. Tal sistema é utilizado nas aplicações em que se interessa priorizar a continuidade de serviço.

2.6.2 SISTEMA SOLIDAMENTE ATERRADO

Neste caso alguns pontos do sistema elétrico são propositalmente conectados diretamente à terra, fazendo-se assim um caminho de mínima impedância à passagem de eventual corrente de falta para o solo. No LABIS, será este tipo de instalação que será implementada em alguns equipamentos. Por ser um laboratório com fins didáticos e de pesquisa, correntes de falta terão maior probabilidade de ocorrência na instalação. Os valores de correntes elevadas sensibilizam os dispositivos de proteção, os quais comandam imediatamente o desligamento da parte faltosa do sistema.

O emprego dessa forma de aterramento impõe ao sistema menores níveis de sobretensões, sendo por isso a forma mais usual de aterramento utilizada no Brasil nos sistemas de baixas e médias tensões. Deve-se, entretanto, levar em consideração que, quando utilizada esta forma de aterramento, a intensidade das correntes se tornam muito elevadas, podendo ser destrutivas para os componentes do sistema.

2.6.3 SISTEMA ATERRADO POR IMPEDÂNCIA

Neste caso, é colocada uma impedância (resistência ou reatância) entre o sistema elétrico e seu aterramento físico, procurando limitar o valor da corrente de eventual falta, sem eliminar a ligação condutiva do sistema ao solo. Esse tipo de ligação será feita em transformadores de potência, caso haja no laboratório.

Um bom aterramento por impedância pode reduzir sobretensões, reduzir o risco do aparecimento de arcos elétricos e fornecer uma corrente adequada para detecção de falta a terra.

Com o avanço da tecnologia para detecção de baixas correntes de falta, a aplicação desse tipo de aterramento tem crescido, principalmente o aterramento por alta impedância. Porém, o sistema de aterramento por impedância tem um elemento que é sempre ignorado, o resistor de aterramento.

Estudos mostram que, um sistema aterrado deve ter continuamente monitorados o seu banco de resistores de aterramento do neutro (SELKIRK, SAVOSTIANIK, CRAWFORD, 2006). Durante uma falta fase-terra, a corrente flui do transformador, ou turbina de geração, através do condutor da fase faltosa para a falta (a terra), retornando ao trafo pelo caminho existente através do resistor de aterramento do neutro.

Quando um resistor de aterramento rompe, esta falha causa a abertura do caminho de retorno da corrente. A corrente de sensibilização da proteção de falta para a terra, não irá operar os dispositivos de proteção, caso ocorra o rompimento do resistor. Caso haja esse tipo de ocorrência, as vantagens do aterramento por impedância serão totalmente perdidas.

2.7 CLASSIFICAÇÃO DOS ESQUEMAS DE ATERRAMENTO

Os diferentes esquemas de aterramentos caracterizam o método de aterramento do neutro da BT (baixa tensão) e o aterramento das partes metálicas expostas da instalação suprida por ele. A escolha desses métodos orienta as medidas necessárias para proteção contra riscos de contatos indiretos.

A classificação é feita por letras onde:

Primeira letra – especifica a situação da alimentação em relação à terra.

T – a alimentação (fonte) tem um ponto diretamente aterrado;

I – isolamento de todas as partes vivas da fonte de alimentação em relação à terra ou aterramento de um ponto através de uma impedância elevada;

Segunda letra – especifica a situação das massas das cargas ou equipamentos em relação à terra.

T – massas aterradas com terra próprias, isto é, independente da fonte;

N – massas ligadas ao ponto aterrado da fonte;

I – massa isolada, não aterrada;

Outras letras – forma de ligação do aterramento da massa do equipamento, usando o sistema de aterramento da fonte.

S – separado, o aterramento da massa é feito com um fio (PE) separado do neutro.

C – comum, o aterramento da massa do equipamento é feito usando o fio neutro (PEN);

Nas figuras 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7 são apresentados alguns esquemas de ligação da alimentação e das massas em relação à terra.

O esquema TN-S, representado na figura 2.4, possui o ponto neutro do transformador na origem da instalação. As partes metálicas expostas dos equipamentos são ligadas aos condutores de proteção os quais por sua vez são ligados ao neutro do transformador. Esta conexão precisa ser provida por disjuntores, fusível ou dispositivo de corrente residual, etc.

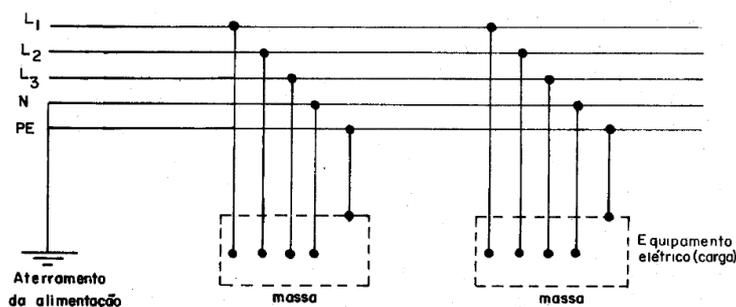


Figura 2.4 – Sistema de alimentação e consumidor do tipo TN-S

Fonte: Kindermann, G. 1995

O esquema TN-C, representado na Figura 2.5, possui o neutro ligado diretamente à terra. O condutor neutro é aterrado em tantos pontos quanto possível. As partes metálicas expostas do equipamento são ligadas ao condutor neutro. É obrigatória a desconexão automática nos casos de falhas na isolação. Quando há o PEN os dispositivos de corrente residual não podem ser usados para essa finalidade desde que uma falta na isolação para terra também constitui um curto circuito fase-neutro. Tal

esquema é proibido para circuitos com condutor inferior a 10mm^2 (SCHNEIDER ELECTRIC, 2007).

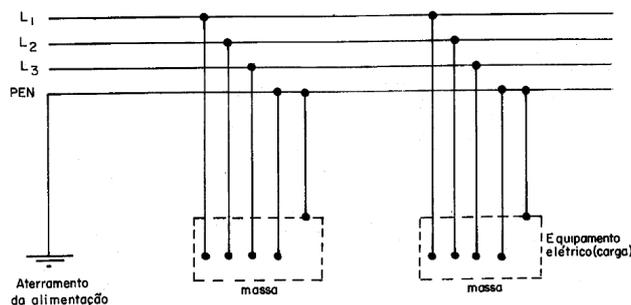


Figura 2.5 – Sistemas de alimentação e consumidor do tipo TN-C
Fonte: Kindermann, G. 1995

O esquema TN-C-S, representado na Figura 2.6, possui a fonte aterrada e as carcaças dos equipamentos serão ligadas a condutores separados. Após certa distância, o condutor de aterramento é conectado ao condutor neutro.

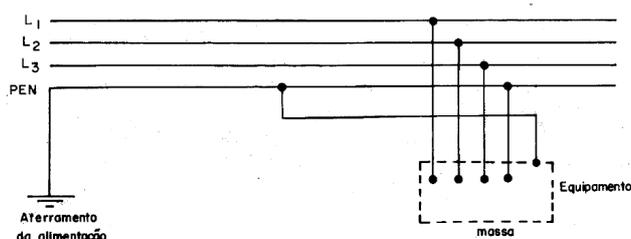


Figura 2.6 – Sistemas de alimentação e consumidor do tipo TN-C-S
Fonte: Kindermann, G. 1995

O esquema TT está representado na Figura 2.7. Um ponto (geralmente o centro da estrela de um enrolamento BT ligado em estrela) da fonte é ligado diretamente à terra. Todas as partes metálicas expostas e todas as partes metálicas estranhas à instalação são ligadas a um eletrodo de terra separado na instalação.

Esse eletrodo é independente do eletrodo da fonte, podendo suas zonas de influência se sobrepor, sem afetar a operação dos dispositivos de proteção.

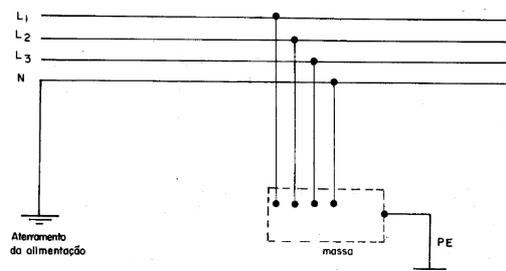


Figura 2.7 – Sistema de alimentação e consumidor tipo TT
Fonte: Kindermann, G. 1995

O esquema IT está representado na Figura 2.8. Neste esquema, uma impedância é ligada permanentemente entre o neutro do enrolamento de BT do transformador e a terra. Todas as partes metálicas expostas e estranhas à instalação são ligadas a um eletrodo de terra. As razões para esta forma de aterramento da fonte são: fixar o potencial de uma pequena rede em relação à terra e reduzir o nível de sobretensões, tais como os surtos em relação à terra transmitidos pelos enrolamentos de alta tensão, cargas estáticas, etc.

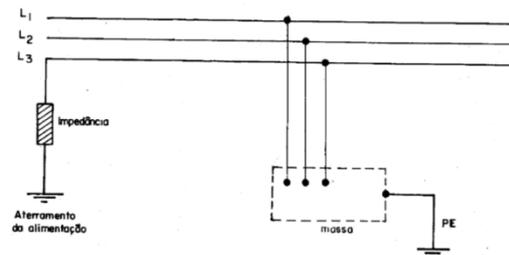


Figura 2.8 – Sistema de alimentação e consumidor tipo IT
Fonte: Kindermann, G. 1995

3 CONSIDERAÇÕES SOBRE SEGURANÇA

A motivação básica para implantação do aterramento é a questão da segurança. Tendo, assim, conexões à terra o sistema de proteção contra descargas atmosféricas e das carcaças de motores, que são projetados especificamente para se constituir em um fator de segurança.

O sistema de aterramento é projetado de uma forma que produza, durante um curto circuito máximo com a terra, uma distribuição no perfil dos potenciais de passo e de toque abaixo dos limites de risco de fibrilação ventricular do coração.

A maioria dos defeitos que ocorrem no sistema elétrico gera correntes de seqüência zero.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DE CONDIÇÕES DE RISCO

Estando o corpo humano submetido a uma diferença de potencial, o mesmo é percorrido por uma corrente elétrica, que pode resultar em diversos efeitos para o indivíduo, configurando, em diversas situações, condições de risco. Em relação a aterramento elétrico, é possível caracterizar algumas dessas situações típicas quando flui corrente pelo mesmo, sendo usual classificá-las e referenciá-las como parâmetros de restrição nos projetos de aterramentos.

3.1.1 TENSÃO DE CONTATO OU DE TOQUE

Pode ser considerada como a diferença de potencial entre mão e pés a que ficaria submetida uma pessoa, eventualmente presente na região do aterramento, que tivesse contato com uma parte metálica acidentalmente energizada. Na Figura 3.1 são mostradas as condições de um indivíduo submetido a uma tensão de toque. Pode-se observar na ilustração, a diferença de potencial a que está submetido o indivíduo (entre mão e pés) e, de que forma sua impedância será vista pela corrente. Considerando: I_{ch} – corrente no corpo humano; R_{ch} – resistência do corpo humano; R_{cs} – resistência da camada do solo.

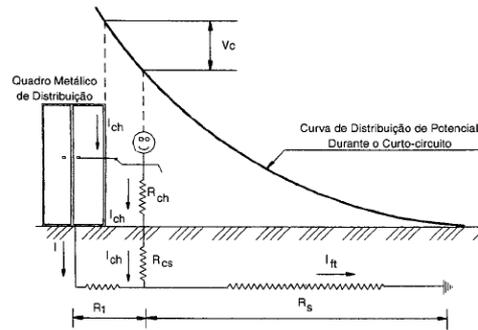


Figura 3.1 – Indivíduo sujeito a tensão de toque
Fonte: Mamede, J. F. 2007

O diagrama elétrico correspondente é mostrado na Figura 3.2.

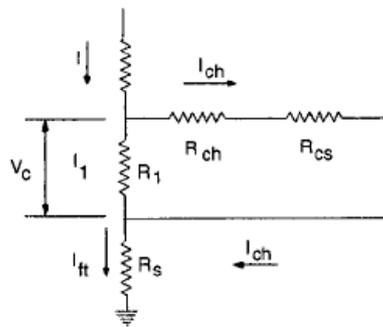


Figura 3.2 – Diagrama elétrico equivalente
Fonte: Mamede, J. F. 2007

3.1.2 TENSÃO DE PASSO

É a máxima diferença de potencial entre os pés a que ficará submetida uma pessoa, presente na região do aterramento, durante o fluxo de uma corrente de falta pelo mesmo. Pode ser visto na Figura 3.4 o gráfico da diferença de potencial existente entre os dois pés do indivíduo, no momento da dissipação da corrente pela malha de aterramento. Na Figura 3.4 é mostrado o circuito elétrico equivalente.

Cabe salientar que a corrente elétrica quando injetada no solo através de eletrodos se dispersa em forma de arcos com o centro no local de penetração, podendo provocar uma tensão de passo, conforme ilustrado na Figura 3.5, para o caso de uma descarga atmosférica. Pode ser visto nessa Figura 3.5, as linhas equipotenciais que são formadas no solo.

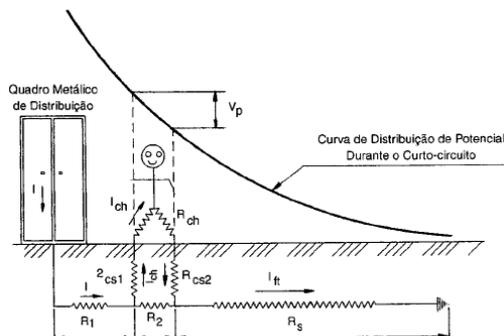


Figura 3.3 – Indivíduo sujeito à tensão de passo
 Fonte: Mamede Filho, J. 2007

O diagrama elétrico equivalente para o indivíduo sujeito a uma tensão de passo é mostrado na Figura 3.4.

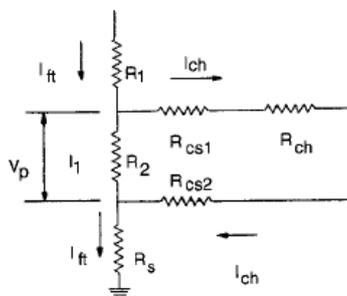


Figura 3.4 – Diagrama elétrico equivalente
 Fonte: Mamede Filho, J. 2007

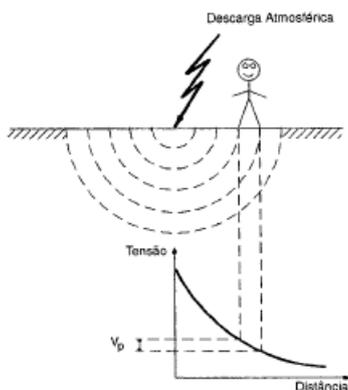


Figura 3.5 – Tensão de passo por raio
 Fonte: Mamede Filho, J. 2007

4 ATERRAMENTO EM LABORATÓRIOS DE ALTA TENSÃO

Os laboratórios de alta tensão são muito importantes para o teste de equipamentos usados em média, alta e extra-alta tensão, MT, AT e EAT, respectivamente. Dentre tais equipamentos podem-se citar os transformadores (de potência e de distribuição), disjuntores, isoladores, transformadores para proteção, isolamento de equipamentos de segurança, etc. As tensões usadas para tais testes podem ser em CA ou CC, de caráter oscilatório em alta frequência (de manobra) ou impulsivo temporário (descargas atmosféricas).

A maior parte das atividades nesses laboratórios são os testes de tensão de ruptura, suportabilidade de tensão em condições específicas, impulsos de corrente e tensão. No teste de ruptura do meio dielétrico, por exemplo, há uma grande presença de transitórios de corrente fluindo para a terra. Por isso, o sistema de aterramento do laboratório é essencial [PUNGSIRI, CHOTIGO, 2008].

4.1 FATORES QUE AFETAM A IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO NOS LABORATÓRIOS DE ALTA TENSÃO

A não linearidade da impedância de aterramento devido ao escoamento de uma corrente de surto para o solo depende de certo número de parâmetros:

- Dimensões do eletrodo de aterramento e sua geometria (comprimento, diâmetro, tipo de instalação), que determinam a indutância do eletrodo e a densidade de escoamento;
- Os parâmetros da corrente de surto (impulso de manobra, impulso atmosférico), como valor de crista, inclinação máxima (di/dt), tempo de escoamento, etc;
- Distribuição da corrente de surto no sistema de aterramento, que depende do ponto onde a corrente entra no sistema e da indutância do eletrodo;
- Efeitos de ionização do solo, no qual as correntes de surtos causam tensões elevadas nos eletrodos de aterramento e o solo atua como dielétrico, podendo ocorrer disrupção se o campo elétrico crítico [ρ – resistividade do solo (Ωm) ; J – densidade de corrente (A/m^2)] for excedido. Medições indicam que o gradiente de

tensão de ruptura na superfície do solo é da ordem de 100 a 500 kV/m enquanto que , internamente, o solo apresenta gradiente de ruptura da ordem de 200 a 2000 kV/m. O efeito de ionização é mais intenso para hastes e eletrodos horizontais de pequenas dimensões, já que em eletrodos horizontais de grande extensão a corrente dissipada por unidade de comprimento é muito menor (GOMES, MACEDO, GUILLIOD, 1990).

4.2 ATERRAMENTO DOS EQUIPAMENTOS DO LABORATÓRIO

Caso o laboratório de AT já tenha outra(s) malha(s) de aterramento em seu projeto, deve ser projetada uma nova malha para o laboratório em questão e interligada às já existentes. Assim será obtido um aterramento de maior eficiência e segurança.

À malha de terra construída sob o terreno onde está implantado o laboratório, deve ser ligada as seguintes partes do sistema elétrico:

- Neutro do transformador de potência;
- Pára-raios instalado na extremidade do ramal da ligação;
- Carcaça metálica dos equipamentos elétricos: transformador de potência, de medição, de proteção, disjuntores, capacitores, motores, etc;
- Suportes metálicos de chaves fusíveis e seccionadoras, isoladores de apoio, transformadores de medição, chapas de passagem, telas de proteção, portões de ferro, etc;
- Estruturas dos quadros de distribuição de luz e força;

Caso haja uma subestação própria para o laboratório de alta tensão e, esta estiver localizada distante das instalações do laboratório, pode ser conveniente a construção de outra malha de terra para a ligação das partes metálicas das máquinas e equipamentos elétricos. Porém, as malhas devem ser interligadas.

4.2.1 ATERRAMENTO DE EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS

Os equipamentos eletrônicos exigem um perfil de segurança que vai além dos requerimentos básicos de aterramento exigidos pelas normas (KOSC, HAMER, 2003). Uma atenção maior deve ser dada aos requerimentos do aterramento desses equipamentos, pois são muito caros. No laboratório estudado, haverá osciloscópios digitais, micro computadores, entre outros. Para um melhor desempenho, o sistema de

aterramento para equipamentos eletrônicos devem possuir: condutores curtos; baixa resistência em alta frequência e; baixa indutância.

5 MALHA DE ATERRAMENTO DO LABORATÓRIO

Neste item serão abordados passos necessários para o dimensionamento da malha de terra de um laboratório de alta tensão. Para fazer o dimensionamento é necessário realizar a verificação dos potenciais que surgirão na superfície, quando ocorrer um defeito envolvendo a terra. Tais potenciais terão que ser inferiores aos máximos potenciais de passo e toque suportado por uma pessoa, sem ocorrência da fibrilação ventricular. E também, devem estar abaixo do nível máximo suportado pelos equipamentos eletroeletrônicos.

5.1 PROCEDIMENTOS PARA PROJETO

Na elaboração de um projeto de malha de terra de laboratório, é preciso realizar alguns procedimentos essenciais para o bom funcionamento da mesma (KINDERMANN, G. 1995). Sendo:

- Realizar as medições necessárias pelo Método de Wenner, a fim de se obter a estratificação do solo;
- Resistividade superficial do solo (ρ_s). Se a área for descoberta, utiliza-se brita na superfície do solo sobre a malha, formando uma camada isolante, contribuindo para a segurança humana;
- Corrente de curto circuito máxima entre fase e terra no local do aterramento ($I_{\text{maxima}}=3I_0$);
- Percentual da corrente de curto circuito máxima que realmente escoar pela malha. Devem-se observar os diversos caminhos pelos quais a corrente de seqüência zero pode circular, e a que entra na terra pela malha é conhecida por corrente de malha;
- Tempo de defeito para a máxima corrente de curto circuito fase terra;
- Área da malha pretendida;
- Valor máximo da resistência de terra de modo a ser compatível com a sensibilidade da proteção;

6 MÉTODOS E FERRAMENTAS

Para a realização deste trabalho foram utilizados materiais para medições de resistividade do solo e software para interpretação dos dados obtidos.

6.1 MÉTODO DE MEDIÇÃO

Frank Wenner desenvolveu um método simples de medição, no qual ele mostra que a resistividade do solo tem uma relação proporcional com o valor da resistência medida no solo através de uma constante geométrica determinada a partir da configuração de eletrodos de medição utilizada na implementação do método (VISACRO FILHO, S. 2007).

Esse método consiste em colocar quatro hastes de teste, em linha, separadas por uma distância A e enterradas no solo com uma profundidade de aproximadamente 20cm. As duas hastes dos extremos estão ligadas aos terminais de corrente $C1$ e $C2$ e, as duas do meio estão ligadas aos terminais de potencial $P1$ e $P2$ do terrômetro.

Alguns instrumentos do tipo *Megger* de terra dispõem de um terminal guarda ligado a um eletrodo, com a finalidade de minimizar os efeitos das correntes parasitas de valor relativamente elevado, que podem distorcer os resultados lidos (MAMEDE, J.F. 2007). A disposição do equipamento para medição e dos eletrodos (hastes) pode ser vista na figura 6.1.

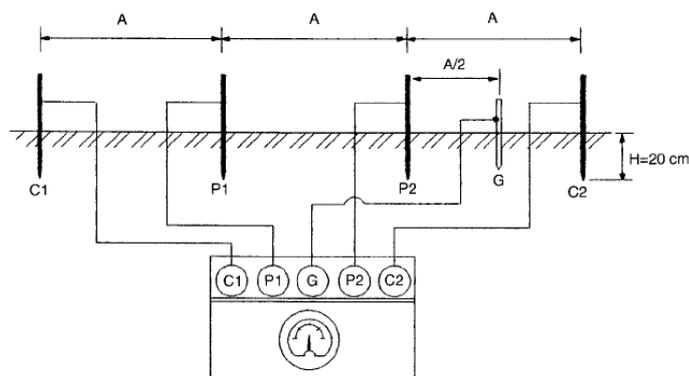


Figura 6.1 – Ligação do equipamento às hastes de medição de resistividade do solo
Fonte: Mamede, J. F. 2007

Para efetuar uma medição de resistividade de solo e obter resultados satisfatórios devem ser seguidos alguns quesitos básicos:

- As hastes devem ser cravadas a 20 cm do solo, aproximadamente;
- Os eletrodos devem estar sempre alinhados;
- A distância entre os eletrodos deve ser sempre igual;
- Para cada espaçamento definido entre os eletrodos, ajusta-se o potenciômetro e o multiplicador do terrômetro até que o galvanômetro do aparelho indique zero com o equipamento ligado;
- O espaçamento entre as hastes deve variar de acordo com a Tabela 6.1, equivalendo a uma medida por ponto para cada distância considerada;
- A distância entre as hastes corresponde à profundidade do solo cuja resistividade se está medindo;
- Se o ponteiro do galvanômetro oscilar muito, isso significa que existe alguma interferência que deve ser eliminada, afastando-se os pontos de medição;
- Devem ser anotadas as condições de solo, temperatura, umidade;
- O valor da resistividade deve ser dado pela equação 2, por,

$$\rho = 2\pi AR \quad (2)$$

onde, A é a distância entre os eletrodos e, R é o valor da resistência do solo indicado no potenciômetro do Megger.

Com base nos valores resultantes da medição, tem-se que calcular a resistividade média, isto é:

- Calcular a média aritmética dos valores de resistividade do solo para cada espaçamento considerado;
- Calcular o desvio de cada medida em relação à média aritmética anteriormente para cada espaçamento considerado;
- Desprezar todos os valores de resistividade que tenham um desvio superior a 50% em relação à média;
- Para um grande número de valores desviados da média, é conveniente repetir as medições em campo;

Persistindo os resultados anteriores, a região pode ser considerada como não aderente ao processo de modelagem do Método de Wenner. Para contornar o caso, seria necessário realizar medições utilizando outros métodos.

Na Figura 6.2 é ilustrado a disposição dos eletrodos no plano do terreno.

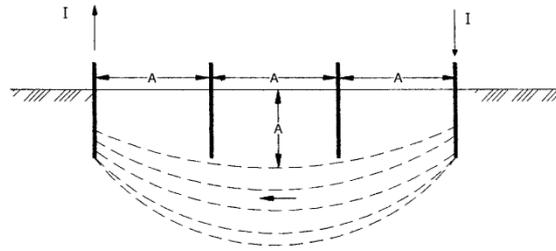


Figura 6.2 – Passagem da corrente pelos eletrodos de potencial
Fonte: Mamede, J. F. 2007

A Figura 6.3 ilustra a disposição dos eletrodos no plano do terreno o qual se deseja realizar as medições de resistividade.

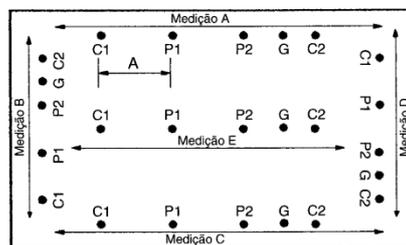


Figura 6.3 – Posição dos eletrodos no terreno para a medição da resistividade do solo
Fonte: Mamede, J. F. 2007)

6.2 TERRÔMETRO DIGITAL

Para efetuar a medição de resistividade no solo do Laboratório de Isolamento (LABIS), foi utilizado o Terrômetro Digital 6472 AEMC Instruments. Uma foto do aparelho pode ser vista na Figura 6.4.

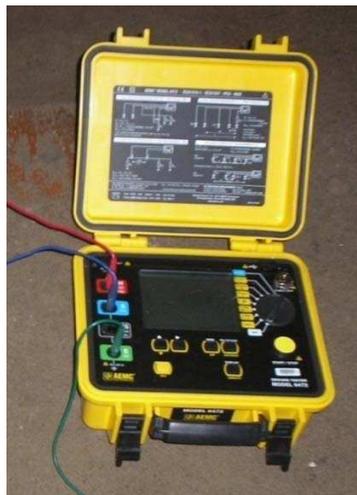


Figura 6.4 – Ground Resistance Tester Model 6472 (Manual AEMC Instruments)

Dentre suas principais características, destacam-se: busca automática do melhor resultado possível para ser mostrado no visor digital; possui uma memória interna com

capacidade para o armazenamento de até 512 resultados de testes que depois podem ser lidos no próprio aparelho ou em um computador; em seu visor de LCD são indicados, entre outros elementos, a tensão, a corrente e a frequência de teste além das resistências individuais dos eletrodos utilizados nas medições; possui uma proteção contra sobretensões para casos de conexões errôneas ou acidentais; possui diferentes opções de métodos de medições tanto para resistividade do solo quanto para a resistência da malha de terra; possui isolamento óptico para comunicação USB. Enfim, possui inúmeras vantagens em relação a outros terrômetros que existem no mercado.

Foi projetado para medir:

- Resistência de conexão;
- Resistência da malha de terra desenergizada;
- Resistência de acoplamento da malha de terra;
- Resistência seletiva da malha de terra;
- Resistividade do solo;
- Potencial de aterramento;
- Resistência de malha de terra energizada;
- Potencial de Toque e de Passo.

6.3 TECAT PLUS 5.2®

Foi desenvolvido pela “Oficina de Mydia”. O TecAt Plus é um programa destinado ao projeto e cálculo de malhas de terra. O software é capaz de realizar, a partir de dados de campo medidos com um terrômetro, a estratificação da resistividade do solo em 2, 3 ou 4 camadas e, em seguida, o cálculo da resistência da malha – para qualquer configuração ou aplicação – e dos potenciais de toque, passo e superfície, necessários para malhas de subestações, ou outros locais.

O TecAt Plus foi adquirido pelo Grupo de Sistemas Elétricos (GSE), por ser o único software nacional a nível profissional capaz de calcular corretamente uma malha de aterramento.

Oferece suporte completo a materiais de malhas de terra, com um banco de dados detalhado, incluindo dados técnicos (dimensões, massa, etc.) e comerciais (custo, fornecedores, prazo). Fornece relatórios gráficos e numéricos. Nos relatórios numéricos é possível verificar os resultados analíticos, enquanto os gráficos permitem visualizar esses resultados em duas ou três dimensões. Possui também, interface de fácil

compreensão, estando disponível em 3 línguas (português, inglês e espanhol), possui também manual on-line.

6.4 MEDIÇÕES

6.3.1 UTILIZAÇÃO DO INSTRUMENTO

Para as medições de resistividade do solo com este aparelho é possível a utilização de dois métodos de medição: o método de Wenner e o método de Schlumberger. A diferença entre esses dois métodos consiste na disposição dos eletrodos. Com o método de Schlumberger variam-se apenas os dois eletrodos de corrente deixando os eletrodos de tensão fixos em vez de se variar três como no método de Wenner.

Para a utilização do aparelho na medição foram seguidos os passos:

- Conectou-se os fios em 4 eletrodos fincados no terreno (em linha reta) à uma distância d do outro;
- Conectaram-se os cabos nos terminais de corrente e de potencial, H(Z), S(Y), ES(Xv) e E(X) respectivamente;
- Escolheu-se a opção de medição selecionando o item ρ , no visor de equipamento ;
- Pressionou-se o botão Hz/OPTIONS até o indicador “AUTO” piscar;
- Pressionou-se novamente o botão Hz/OPTIONS e observou-se que “W” ou “S” piscaram;
- Foi escolhido o “W” para utilizar o método de Wenner.

Também foram programadas as distâncias entre os eletrodos, pois estas são essenciais para o cálculo da resistividade que é realizado automaticamente pelo aparelho de acordo com método selecionado. Para programar as distâncias utilizadas em cada método:

- Pressionou-se o botão 2nd e depois o botão DISTANCE até as linhas tracejadas piscarem;

6.3.2 CONSIDERAÇÕES PARA AS MEDIÇÕES

No método de Wenner, geralmente varia-se o espaçamento d (ver Figura 6.5) em potências de 2, contudo isto não é uma regra e depende do tamanho do terreno bem como da quantidade de medições que se deseja para realizar uma estratificação do solo adequada. No laboratório em estudo havia irregularidades no terreno, montes de areia e fundações de concreto, como mostrado na Figura 6.6. Face a essa situação, não foi possível realizar uma grande quantidade de medições, nem em todas as direções desejadas.

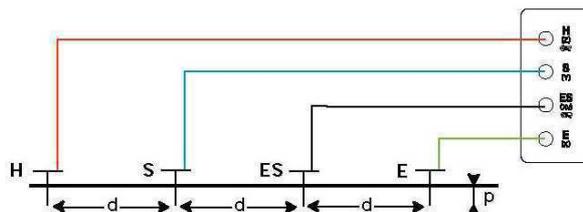


Figura 6.5 – Medição de resistividade com terrômetro digital
Fonte: Manual AEMC Instruments



Figura 6.6 – Foto do interior do LABIS

Devido às características do terreno, foi estipulado que as hastes seriam fincadas a uma profundidade de *0,30 metros*. Os valores médios de resistividade obtidos na Tabela 6.1, foram calculados pelo software TecAt Plus 5, como também o valor das resistividades das camadas.



Figura 6.8 – Disposição das hastes, 2 já fincadas e 1 do kit de medição

O software estratificou o solo em 2 camadas: **a primeira apresentando resistividade de $14,18 \Omega m$ com profundidade $4,60 m$ e a segunda apresentando resistividade de $0,1 \Omega m$.**

7 MALHA PROPOSTA

Com o auxílio do TecAt Plus 5.2, foi possível projetar uma malha de aterramento com os resultados satisfatórios e de acordo com as normas em vigor, NBR 5410:2004, NBR 14039:2005, NBR 5419:2001 e NBR 13571:1996. Tais resultados serão mostrados nos itens a seguir.

Para a elaboração do projeto da malha de aterramento foi considerado:

- Área pretendida da malha: $5\text{ m} \times 9\text{ m} = 45\text{ m}^2$
- Corrente máxima de falta: 1000 A
- Tempo de duração da falta: $0,3\text{ s}$
- Peso do operador na malha: 50 kgf (considerando um indivíduo de estatura mediana)
- Camada de 10 cm de Brita 3000 ($3000\ \Omega.m$) misturado com cimento

7.1 RESISTIVIDADE DO SOLO

Após a obtenção dos dados apresentados no item 6.3.3 (RESULTADOS), pôde ser gerado o gráfico apresentado na Figura 7.1. Para a obtenção de tal gráfico, foi utilizado o Método de Wenner com sua fórmula completa, no TecAt Plus 5.2.

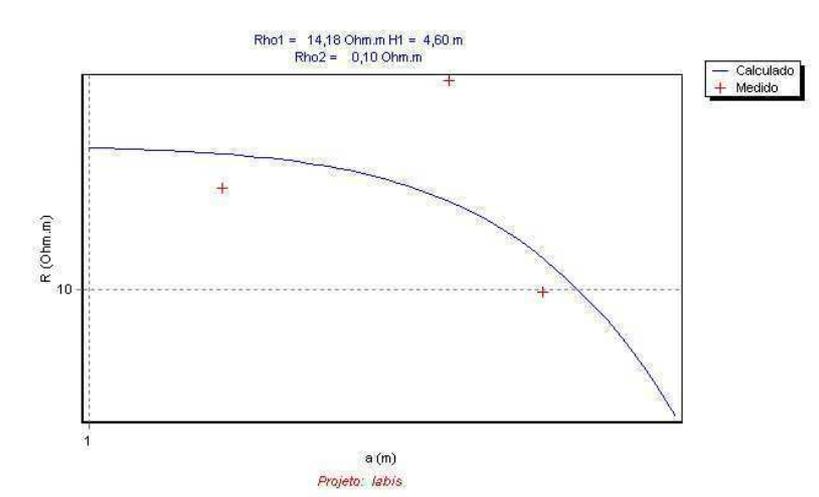


Figura 7.1 – Gráfico da resistividade das 2 camadas de estratificação do solo

De acordo com o software utilizado, foi possível obter:

- Valor de resistividade da primeira camada: $14,18\ \Omega\text{ m}$

- Espessura da primeira camada: $4,60\text{ m}$
- Valor de resistividade da segunda camada: $0,1\ \Omega\text{ m}$
- Espessura da segunda camada: ∞

7.2 PLANTA DA MALHA

A planta da malha foi escolhida de forma a minimizar a relação custo/benefício considerando que o solo analisado possui características favoráveis ao aterramento. A quantidade de reticulado foi escolhida de acordo com a satisfação dos níveis de potências de toque, passo e superfície. Na Figura 8.2 pode ser visto a planta da malha de aterramento, contendo hastes em cada ponto de cruzamento das linhas.

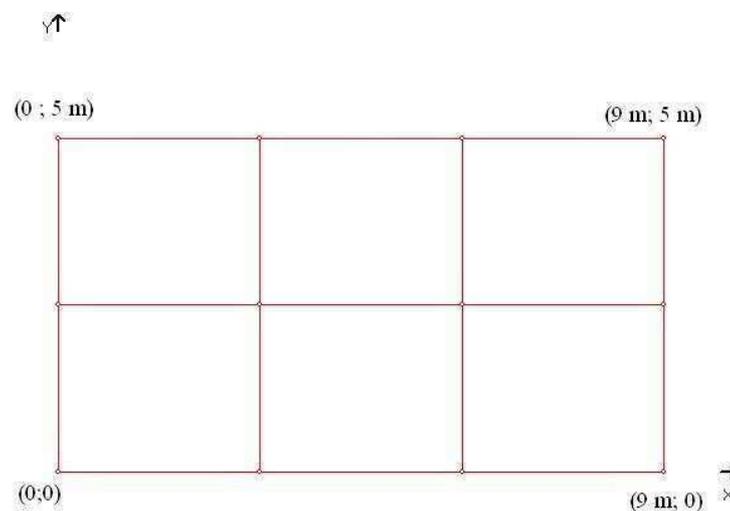


Figura 7.2 – Planta da malha 5 m x 9 m

7.3 MATERIAIS A UTILIZAR

De acordo com o projeto do TecAt Plus 5.2, para a confecção e implementação da malha projetada serão necessários:

- 12 hastes lisas de aço cobreado ($2,4\text{ m} \times 5/8$)
- 17 cabos de cobre (120mm^2)
- 4 conexões tipo *molde solda cc* $50 \times 50\text{mm}^2$
- 6 conexões tipo *molde solta T* $50 \times 50\text{mm}^2$
- 12 conexões tipo *molde solda CH* 50mm^2
- 2 conexões tipo *molde solda X* $50 \times 50\text{mm}^2$
- Volume de Brita 3000: $4,5\text{ m}^3$

7.4 RESISTÊNCIA DA MALHA DE ATERRAMENTO

Após o projeto da malha de aterramento, o software simulou o cálculo da resistência da malha e obteve um valor muito satisfatório.

- Resistência da malha projetada: $0,3 \Omega$

7.5 NÍVEIS DE POTENCIAIS NA MALHA

Os níveis de potenciais admissíveis, que foram calculados para um operador com peso de 50 kgf , são:

- Potencial de toque: $850,41 \text{ V}$
- Potencial de passo: $2766,30 \text{ V}$

Esses valores referem-se a níveis seguros (calculados para o projeto específico) para que não haja condução de corrente pelo corpo do operador.

Para obter tais valores de potencial de passo e de toque, foi considerado um indivíduo de estatura mediana em cima da malha no momento de uma falta com corrente igual a 1000 A .

Na Figura 7.3 pode ser visto o gráfico 2D do potencial de passo na região da malha. É possível observar que os valores dos potenciais de passo ao longo da malha (de 0 a 9 m) estão bem abaixo do limite de segurança estabelecido pelas normas, sendo este limite aproximadamente 2800 V

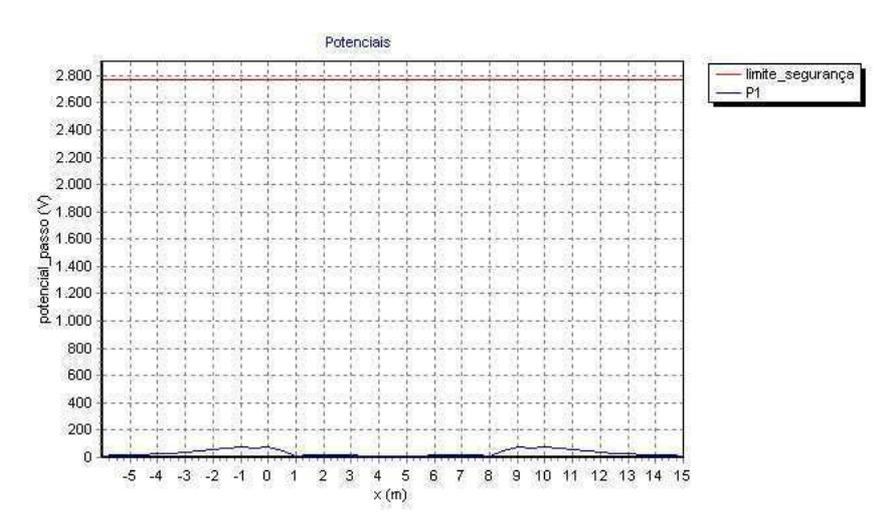


Figura 7.3 – Perfil do potencial de passo em 2D

Na figura 7.4 pode ser visto o gráfico 2D do potencial de toque na região da malha. Também é possível observar que os valores dos potenciais de toque no interior da malha estão abaixo do limite de segurança permitido.

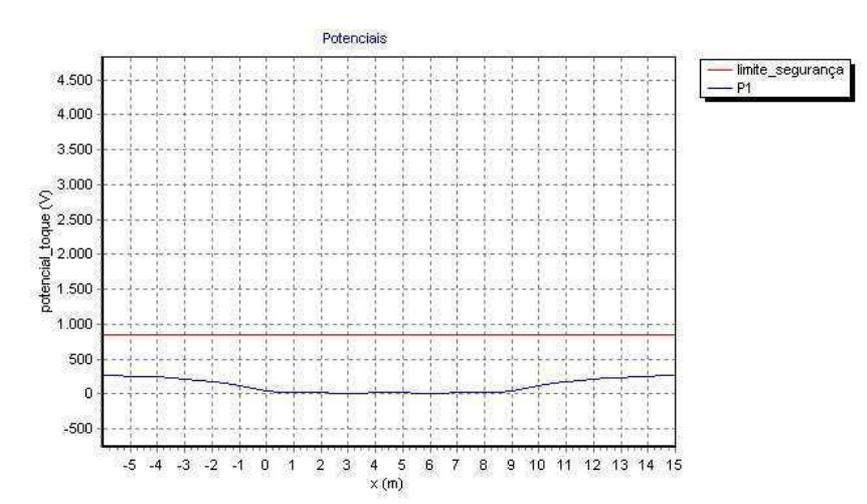


Figura 7.4 – Perfil do potencial de toque em 2D

Na figura 7.5 pode ser visto o gráfico do potencial de superfície na região da malha. É possível observar que os valores dos potenciais superficiais no interior da malha estão no limite de segurança permitido, sendo este limite aproximadamente 800 V.

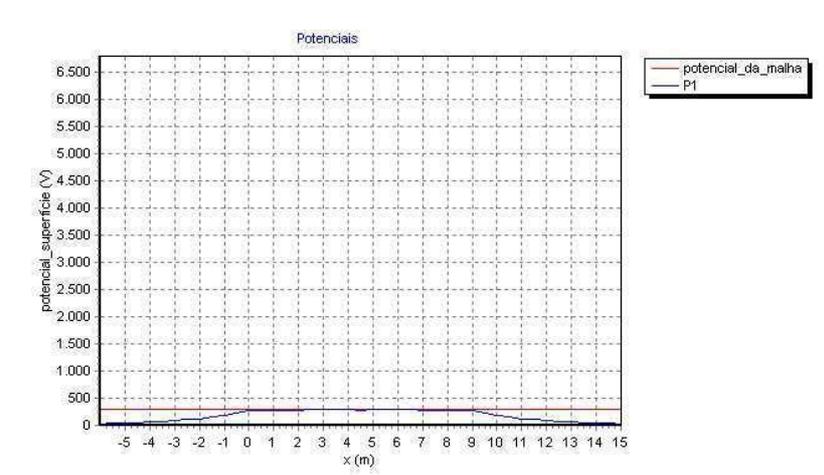


Figura 7.5 – Perfil do potencial de superfície em 2D

Na Figura 7.6 e 7.7 são apresentados os gráficos em 3D dos potenciais de malha e de superfície, respectivamente.

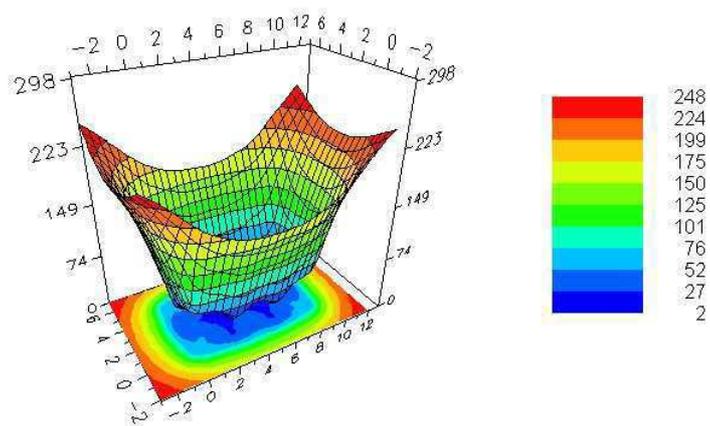


Figura 7.6 – Gráfico dos potenciais de malha em 3D

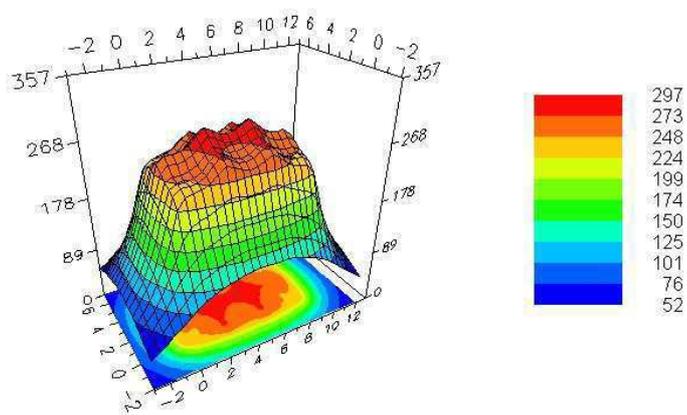


Figura 7.7 – Gráfico dos potenciais de superfície em 3D

8 CONCLUSÃO

Neste documento transmitiram-se conceitos fundamentais sobre os Aterramentos Elétricos, descrevendo suas principais aplicações, formas de conexão dos equipamentos ao solo, etc. Visou-se a aplicação do aterramento elétrico nos laboratórios de alta tensão. Foram feitas considerações sobre segurança, que é extremamente importante para qualquer instalação elétrica.

O estudo realizado foi muito proveitoso, pois pude ter uma melhor fundamentação teórica e prática sobre Aterramentos Elétricos

Para a medição de resistividade do solo foi apresentado o Método de Wenner, onde são mostradas as principais características de cálculo adotadas para a estratificação do solo. O método de Wenner pôde ser aplicado com a utilização do terrômetro digital existente no Laboratório de Alta Tensão na UFCG, seus procedimentos de utilização foram descritos neste trabalho.

A proposta de projeto foi apresentada, com base nos cálculos realizados pelo TecAt Plus 5.2, de forma a satisfazer as exigências das normas vigentes. A malha de aterramento proposta deve satisfazer as necessidades exigidas pelos testes de materiais que serão efetuados no laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Kindermann, Geraldo. Aterramento Elétrico. Florianópolis, 3ª Ed., 1995.
- Mamede, J. F. Instalações Elétricas Industriais. Rio de Janeiro, Editora LTC, 7ª ed., 2007.
- Visacro Filho, S. Aterramentos Elétricos. São Paulo, Editora Artliber, 2002.
- ABNT:NBR 5410 (2004): Instalações elétricas de baixa tensão.
- ABNT:NBR 5419 (2001): Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas.
- ABNT:NBR 13571 (1996): Haste de aterramento aço-cobreada e acessórios
- ABNT:NBR 14039 (2005): Instalações Elétricas de Média Tensão de 1kV a 36,2kV
- Medeiros Filho, S. de. Fundamentos de Medidas Elétricas. Recife, 1979.
- Markvits, C. H. M., Leon, J. A. M., Critérios de Medições, aterramento e segurança em subestações, Anais do IV-SNPTEE (Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica), Rio de Janeiro, 1977.
- Gomes, D. S. F., Guilliod, S. M. Aterramento e proteção contra sobretensões em sistemas aéreos de distribuição. Niterói: EDUFF, 1990.
- Oliveira, J. T. de. Apostila do Curso de aterramento de sistemas elétricos e eletrônicos. UFRN, 1997.
- Beltani, J.M. Medição de malha de terra em subestações energizadas. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, 2007
- IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment—IEEE Emerald Book, IEEE Std 1100-1999.
- AEMC Instruments, “Ground Tester user manual, 6472”
- Zeng, R., He, J., Gao, Y., Sun, W., Su, Q., “Analysis on Influence of Long Vertical Grounding Electrodes on Grounding System for Substation”, IEEE xplore, 2000
- Pungsiri, B., Chotigo, S, “Design and Construction of Grounding System in High Voltage Laboratory at KMUTT”, IEEE xplore, 2008
- Chang, J.C., Lin, Y.C., Lei, S.C., Kuo, K.C., Chen, J.R., “Electrical Power and Grounding System Study and Improvement at TLS”, 2003 Particle Accelerator Conference
- Devarakonda, L.S., Moskos, J., Wood, A., “Evaluation of Groundd Grid Resistance for Inservice Substations”, IEEE xplore, 2010
- Nelson, J.P., “Grounding Power Systems Above 600 V”, IEEE Industry Applications Magazine, 2006

Kosc, D., Hamer, P.S., "Grounding Practices – A System-Wide Systematic Approach", IEEE Transactions on Industry Applications, 2003

Cong-li, L., Minfang, P., "A New Approach for Monitoring Grounding Grid of Electrical Power System", ICEMI '2007

Yexu, L., Ma, J., Dawalibi, F.P., "Power Grounding Safety: Copper Grounding Systems vs. Steel Grounding Systems", International Conference on Power System Technology