

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

**ANÁLISE DOS POTENCIAIS DE SUPERFÍCIE GERADOS NO SOLO
POR UM SISTEMA MONOFILAR COM RETORNO POR TERRA**

ISIDORO CASAL CAMINHA JÚNIOR

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU - SP
Março 2001

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

**ANÁLISE DOS POTENCIAIS DE SUPERFÍCIE GERADOS NO SOLO
POR UM SISTEMA MONOFILAR COM RETORNO POR TERRA**

ISIDORO CASAL CAMINHA JÚNIOR

Orientador: **Prof. Dr. Odivaldo José Seraphim**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU - SP
Março 2001

SUMÁRIO

1 RESUMO.....	01
1.1 SUMMARY	03
2 INTRODUÇÃO	05
3. REVISÃO DA LITERATURA	08
3.1 O Solo como Condutor de Corrente Elétrica.....	14
3.1.1 Resistividade do Solo.....	19
3.2 Sistema Monofilar com Retorno por Terra	29
3.2.1 Sistema Monofilar sem Transformador de Isolamento.....	30
3.2.2 Sistema Monofilar com Transformador de Isolamento.....	31
3.2.3 Sistema MRT na Versão Neutro Parcial	33
3.2.4 Sistema de Atendimento à Carga	34
3.3 Sistema de Aterramento	35
3.3.1 Potenciais na Superfície do Solo.....	42
3.3.1.1 Tensão de Toque.....	47
3.3.1.2 Tensão de Passo.....	49
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	51
4.1 Características Construtivas do Sistema Monofilar com Retorno por Terra.....	51
4.2 Medição da Resistência de Aterramento	55
4.3 Determinação da Resistividade e da Estratificação do Solo	56
4.4 Medição dos Parâmetros Elétricos	58
4.5 Medição dos Potenciais de Superfície.....	58
4.5.1 Tensão de Passo.....	59

4.5.1.1 Determinação da Tensão de Passo Máxima.....	61
4.5.2 Tensão de Toque	65
4.5.2.1 Determinação da Tensão de Toque Máxima.....	66
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
5.1 Análise dos Dados da Tensão de Passo.....	69
5.2 Análise dos Dados da Tensão de Toque.....	99
CONCLUSÕES.....	106
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109

1 RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi analisar os dados de potenciais de superfície gerados no solo por uma rede monofilar com retorno por terra – MRT, os quais poderiam provocar fibrilação ventricular no ser humano, causada pela menor corrente de curto-circuito que vier a ser injetada no sistema de aterramento, seja pela tensão de passo, ou pelo contato com a estrutura energizada, denominada de tensão de toque.

A pesquisa foi realizada na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul no Campus de Campo Grande – MS, utilizando-se um protótipo da rede MRT, construída de acordo com as normas da Empresa Energética de Mato Grosso do Sul (ENERSUL).

No período de 1996 a 1998 foram realizadas semanalmente medições dos potenciais de superfície sobre os sistemas de aterramento de alta e baixa tensão, considerando estes sistemas isolados e interligados, resultando num total de 6.864 medições de tensão de passo e 246 medições da tensão de toque.

Os menores valores calculados de corrente de curto-circuito que poderiam gerar potenciais de passo e toque e provocar fibrilação ventricular no ser humano foram, indicaram que a tensão de toque é a mais perigosa.

Os maiores valores de tensão de passo e tensão de toque, foram os responsáveis pelos menores valores da corrente de curto-circuito, que podem provocar a fibrilação ventricular . Estes valores ocorreram em sua maioria nas medições da tensão de passo realizadas no aterramento de alta tensão desconectado do aterramento de baixa tensão, tendo uma forte tendência destes valores no sentido sul, concordando com os menores valores de resistividade superficial.

ANALYSIS OF THE SURFACE POTENTIALS GENERATED IN THE SOIL TROUGH THE SINGLE WIRE EARTH RETURN SYSTEM

Botucatu, 2001. 120p.

TESE (Doutorado em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura)

Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: Isidoro Casal Caminha Júnior

Adviser: Prof. Dr Odivaldo José Seraphim

1.1 Summary

The objective of this research was to analyze the surface potentials generated data in the soil by a single wire network with return for earth - MRT, which can provoke ventriculated fibrillation in the human being, it causing the smallest short circuit current than it comes to be injected in the ground layering system, it be for the step tension, or through contact in the structure with tension, denominated of touche tension.

The research was been accomplished in the Federal University of Mato Grosso do Sul Campus of Campo Grande - MS, utiling a prototype of the MRT network built in accordance with the norms of the Energy Company of Mato Grosso do Sul (ENERSUL).

In the period from 1996 to 1998 weekly readings of surface potentials on ground layering system was taken for the high and lowers tension, considering these systems isolated and joyned, resulting in a total of 6.864 readings of step tension and 246 touche tension.

The smallest calculated values of short circuit current that can generate step potentials, touche, ventriculated fibrillation in the human being were, respectively, 1,92 kA and 0,46 kA, indicating that the touch tension is the most dangerous.

The highest values of step tension and touch tension, it were the responsible for the smallest values of the short circuit current, that can provoke the ventriculated fibrillation. These values occurred in its majority in the readings of the step tension realized in the ground layering of the high tension disconnected of the lower tension, having a strong tendency of these values in the south direction, agreeing with the smallest values of surfacial resistivity.

Key – Words: single wire, soil resistivity, ground system, surfacial potentials.

2 INTRODUÇÃO

O sistema monofilar com retorno por terra, utilizando o solo como condutor da corrente elétrica foi empregado pela primeira vez por Leoyd Mandeno Auckeand, no ano de 1941 na Nova Zelândia, sendo posteriormente difundido na Austrália e atualmente em grande expansão no Brasil, como alternativa eficiente e barata para o atendimento de cargas tipicamente rurais, caracterizado por pequenas potências e longas distâncias.

Por volta dos anos 80 a ELETROBRÁS iniciou a divulgação do Sistema Monofilar com Retorno por Terra (MRT), por meio de palestras e estudos de pesquisadores brasileiros, embora o seu uso na COPEL, já era uma realidade desde a década de 70.

A necessidade de reduzir ao máximo os investimentos em construção de redes elétricas e a adequação das características dos tipos de sistemas de distribuição às cargas foram requisitos básicos para utilização e implantação de redes monofilares com retorno por terra (MRT).

O sistema MRT tem trazido grandes benefícios para o meio rural pois através dele viabilizou-se o atendimento a muitas propriedades, possibilitando o acesso à energia, mesmo quando as mesmas se encontravam muito longe do sistema elétrico.

Para evitar o emprego indiscriminado de sistemas com redes monofilares, constituem-se parâmetros essenciais o planejamento das áreas, a avaliação prévia das características das cargas a serem atendidas, a resistividade do solo na região e o seu posicionamento em relação aos alimentadores existentes.

Neste sistema o meio de dispersão das correntes de retorno é o solo, o qual pode apresentar variações consideráveis, em função da formação geológica, nível de compactação, teor de umidade e de sais nele contidos. Sendo o valor de resistência de aterramento e mesmo a impedância de aterramento fortemente dependentes do valor da resistividade do solo.

Assim sendo, para se projetar corretamente um sistema de aterramento, visando que o mesmo tenha capacidade adequada de dispersão de corrente, e ainda, que mantenha os potenciais resultantes no solo e nos equipamentos aterrados dentro dos limites toleráveis pelo corpo humano, é necessário conhecer perfeitamente o valor da resistividade do solo, onde o mesmo será implantado, a estratificação que o mesmo apresenta em termos de variação de resistividade aparente e a finalidade que se destina o sistema de aterramento, bem como indicar qual o tipo de aterramento e configuração mais adequado.

Como nesse sistema o aterramento do Posto de Transformação conduz a corrente que passa pelo primário do transformador e vai para o solo (corrente de retorno), há necessidade de projetá-lo de modo que o mesmo possa garantir a continuidade do sistema elétrico, e nas subestações devem ser considerados os potenciais de superfície sob o

aspecto de segurança de pessoal e o valor da resistência de aterramento sob o aspecto de desempenho.

As normas técnicas de algumas Empresas, recomendam um valor mínimo para resistência de aterramento, para que os potenciais de superfície fiquem abaixo dos níveis de segurança exigidos.

Esta pesquisa tem como objetivo analisar os dados de potenciais de superfície gerados no solo por uma rede monofilar com retorno por terra – MRT, os quais podem provocar fibrilação ventricular no ser humano, causada pela menor corrente de curto-circuito que vier a ser injetada no sistema de aterramento, através da tensão de passo ou pelo contato na estrutura energizada, pela tensão de toque.

Para tanto, procurou-se verificar quais são os fatores físicos e construtivos que atuam nos valores desses potenciais, para com isso, alertar os usuários desse tipo de sistema de eletrificação rural quanto aos cuidados e procedimentos a serem adotados para que a segurança de pessoas e animais seja realizada da melhor maneira possível.

3 REVISÃO DA LITERATURA

O elevado custo dos investimentos na eletrificação rural, associado às dificuldades na obtenção de recursos, impõe a necessidade de estudos de racionalização do sistema elétrico, de modo a adequá-lo às características das cargas elétricas nas áreas rurais brasileiras.

O processo de eletrificação rural é um dos fatores decisivos no combate ao êxodo rural, processo este que proporciona o aumento da produtividade agrícola e a elevação do nível social e econômico do homem do campo.

O transporte de energia elétrica no meio rural enfrenta dificuldades econômicas e técnicas, motivadas pelas particularidades da eletrificação rural que atende consumidores dispersos em grandes áreas, segundo Carvalho (1987).

O desenvolvimento de políticas sociais é uma atribuição do Estado, como meio de atender o direito de cada cidadão de ter acesso aos serviços públicos. Ao conduzir esse processo, o Estado tenta fazer crer que atua na concepção e na implantação de

propostas que tem como objetivo o desenvolvimento conjunto da nação e que os critérios de decisão resultam de avaliações objetivas de como atingir as metas propostas,(Tendrih, 1990).

As grandes extensões, a reduzida densidade de carga e as distâncias aos centros já eletrificados tornaram-se, de acordo com Sotille (1986), um desafio às empresas concessionárias de energia elétrica, dentro da expectativa de levar o progresso às regiões mais carentes do país.

A eletrificação rural é uma questão política. Ela é discutida ora como questão social, ora como uma questão econômica, ora como uma questão técnica. Nas três esferas destaca-se o caráter político das decisões, (Ribeiro, 1993).

O desenvolvimento rural sustentável está presente como um dos temas centrais das agendas políticas dos governos dos países em desenvolvimento, entendido universalmente como um dos meios mais adequados de se alcançar o crescimento econômico. O discurso dos governos do terceiro mundo quase sempre aborda o suprimento de energia à agricultura como uma de suas metas prioritárias, (Ribeiro, 1997).

Lopes et al. (1993) analisando os diferentes tipos de redes de distribuição rural, concluíram que primeira alternativa deverá ser sempre o sistema monofásico, no caso desta alternativa não ser técnica, econômica ou seguramente viável, deve-se optar pela segunda alternativa, como sendo o sistema bifásico e finalmente em ultimo caso optar pelo sistema trifásico.

Ribeiro (1997) faz uma análise da prática da eletrificação rural. A produção rural necessita de fontes eficientes de energia e o estado deve estimular que os proprietários façam uso das forças de mercado para modernizar sua atividade. Importantes autores afirmam que a eletrificação rural deva ser vista como um investimento que se faz na infraestrutura energética de uma região com objetivos de produzir retorno econômico. Essa opinião é criticada à luz da dimensão que hoje se dá ao conceito de desenvolvimento rural sustentável.

Mais do que um item de política macroeconômica, a eletrificação deve ser entendida sob o prisma social, como insumo indispensável ao resgate da cidadania e deve ser levada igualmente a todos os setores da população. A igualdade só será alcançada com uma política de eletrificação com fins explícitos de incluir o atendimento do pobre rural como meta a ser atingida. Isto não ocorre com as políticas convencionais, as quais são socialmente excludentes.

Os pequenos proprietários não têm acesso aos recursos de mercado e são marginalizados também pela concessionária. Finalmente, é apresentado um modelo de eletrificação que visa explicitamente atender o pequeno proprietário rural.

Os consumidores rurais deverão ser classificados, conforme Amaral Pinto et al. (1986), como pequenos consumidores, a despeito de serem grandes ou pequenos proprietários, com exceção de instalações rurais que exijam grandes demandas, como agro-indústrias, usinas de processamento de cana-de-açúcar e álcool, etc. É crescente o uso da eletricidade na vida de todos os povos do mundo civilizado. Porém, seu uso traz certo grau de perigo, devido, de um lado, à suscetibilidade do corpo humano e animal à passagem de

corrente elétrica e, de outro lado, à possibilidade de defeitos nos componentes elétricos, tanto nos sistemas de fornecimento de energia quanto nas instalações dos consumidores. Em todos os métodos de proteção contra perigos associados ao uso da eletricidade o sistema de aterramento tem papel muito importante.

Pesquisadores verificaram que as cargas elétricas podiam ser dissipadas pela conexão do corpo carregado para a massa da terra por meio de eletrodos. O desenvolvimento da ciência e a necessidade de conduzir maior quantidade de corrente para a terra, acarretaram o aumento de área dos eletrodos. De diversos tipos de eletrodos chegaram-se às hastes de terra conhecidas atualmente. A resistência de terra é a resistência entre o eletrodo de terra em questão e a massa geral da terra, ou seja, entre o eletrodo específico e um eletrodo de resistência zero.

Podemos citar uma forma simples de eletrodo para um estudo teórico, um hemisfério com sua superfície plana junto à face da terra na Figura 01.

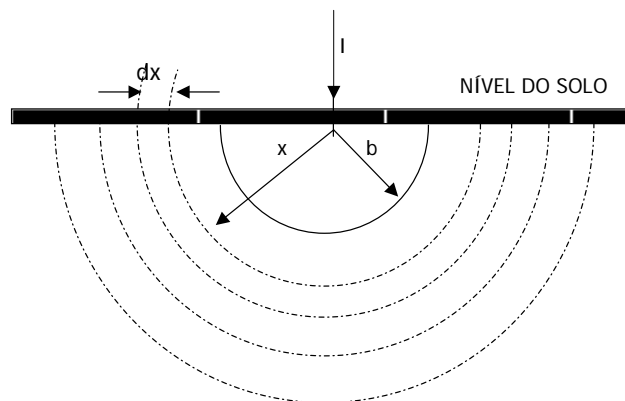


Figura 01 - Forma simples puntual de eletrodo de terra

A resistência total desse eletrodo é a soma das resistências de um número finito de camadas hemisféricas finas. As superfícies de cada camada são equipotenciais, enquanto o eletrodo transporta a corrente. Essas camadas finas expandem-se da superfície do eletrodo para o infinito.

Considerando cada uma dessas camadas, a resistência é dada pela fórmula:

$$R = \rho \cdot dx / a \quad \text{em que:}$$

R = resistência, em Ω ;

ρ = resistividade do solo, em $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$;

dx = espessura da camada, em m;

a = área da superfície da camada, em mm^2 .

A medida que se afasta do eletrodo, a área da superfície da camada adquire grande valor (por exemplo, para 3 m de raio a área da camada elementar é de $28,4 \text{ m}^2$).

O incremento de resistência devido à fina camada, a uma distância, por exemplo, de 9 m do eletrodo, é muito pequeno, em relação à soma total de resistência já obtida nesse ponto. Diante disso, pode-se voltar a atenção para uma área limitada em torno do eletrodo, pois dentro dessa área grande parte da resistência total é confinada.

São os seguintes fatores que influenciam a resistência de terra de um eletrodo ou de uma combinação de eletrodos:

- a composição física e química do solo nas imediações do eletrodo;
- a temperatura do solo;
- a umidade do solo;
- a composição mecânica do solo;

- comprimento, forma, número e espaçamento dos eletrodos;
- a profundidade dos eletrodos.

Os quatro primeiros causam variações na resistividade do solo perto dos eletrodos, enquanto os dois restantes são diretamente ligados ao tipo de sistema de eletrodos em uso.

A composição do solo permite indicação aproximada da resistividade. Investigações recentes voltaram sua atenção para a variação de resistividade em vários tipos de rochas. Muitos progressos têm sido obtidos nesse sentido, tornando possível levantamentos geológicos profundos pela medição de resistividade, podendo obter a partir dos valores encontrados o tipo e o período de rocha envolvida.

A temperatura do solo nas vizinhanças dos eletrodos tem apreciável efeito sobre a resistividade, especialmente quando a temperatura cai abaixo de zero grau Celsius.

A umidade do solo, relacionada com a temperatura, varia na ordem de 5% por cada grau Celsius. Abaixo de 0° C ocorre rápido aumento da resistência pelo congelamento da água existente no solo.

A condutividade do solo é devida, quase que na totalidade, à presença de água. A rocha compacta e seca constitui verdadeiro isolante. Se for muito pura, a água de embebedimento aumentará pouco a condutividade da terra. Sua ação depende essencialmente da presença de sais dissolvidos ou da adição de sais, para diminuir a resistência da terra.

É importante que o eletrodo esteja sempre em contato com camadas permanentemente úmidas o que, em alguns casos é conseguido com dificuldade. Dessa maneira, evita-se o problema do efeito das variações sazonais sobre o eletrodo que está próximo da superfície.

Em análise das resistências de aterramento de sistema monofilar MRT, Maciel (1982), observou que a variação destas, para hastes colocadas a 1,2 e 3 metros de profundidade é mais coerente com a precipitação pluvial do que com a umidade do solo das amostras coletadas às profundidades das pontas de hastes.

Segundo Tagg (1964) os principais fatores que determinam a resistividade do solo são: temperatura, tamanho dos grãos, compactação, concentração e a composição química dos sais dissolvidos na água retida.

Em pesquisa realizada por Schiesser (1923) constatou-se que a água em presença no solo aumenta a condutividade elétrica, diminuindo consideravelmente a resistividade e a resistência de aterramento.

3.1 O Solo como Condutor de Corrente Elétrica

Desde o início do fornecimento de energia elétrica, o solo tem sido usado como condutor de eletricidade, seja para assegurar a funcionalidade de um circuito elétrico ou para estabelecer uma forma segura de proteção de equipamentos elétricos, pessoas e animais.

Quando o solo é utilizado como condutor, isso, usualmente, é feito para retornos de corrente. Obrigatoriamente, ter-se-ão dois aterramentos, um de entrada e outro de saída, os quais podem ser constituídos de um ou mais eletrodos. Para análise, sempre foi considerada a situação em que cada um dos dois aterramentos é constituído de um único eletrodo e cravado no solo a distância muito grande, em relação às suas dimensões.

O fluxo de corrente difunde-se pela terra, de maneira que depende, de um lado, de elementos locais, como forma da superfície, qualidade do solo, homogeneidade do

solo, umidade, temperatura e, de outro lado, de elementos geométricos, tais como distancia entre eletrodos, forma, comprimento e disposição dos eletrodos.

A resistência de terra de um sistema de aterramento é a soma das resistências do eletrodo de aterramento para terra, a resistência das hastes, a resistência das conexões e do condutor terra. Esse valor é determinado pela razão entre o potencial aplicado aos eletrodos e a corrente que passa nos eletrodos para a terra.

Se os dois eletrodos forem idênticos, a metade da resistência total será, muitas vezes, designada resistência de terra de um dos eletrodos ou resistência do eletrodo de aterramento.

Quando se aplica uma diferença de potencial entre duas hastes (A e B) cravadas na terra (solo homogêneo) a distância de 50 a 60 metros, um fluxo de corrente é criado entre as duas hastes, conforme se vê na Figura 02a. Se um dos terminais de um voltímetro for conectado à primeira haste de aterramento e o outro conectado a uma haste de ferro galvanizado (haste de prova P) que é cravada na terra em diferentes pontos entre os eletrodos de aterramento, onde x é a distância entre o eletrodo e a haste de prova P, a curva que representa a distribuição de potencial entre os eletrodos de aterramento é dada na Figura 02b.

O potencial varia na vizinhança dos eletrodos de aterramento (AD e CB) e é constante no trecho DC. Tal distribuição de potencial é consequência do fato de que as linhas do primeiro eletrodo divergem e no segundo eletrodo as, correntes convergem. Como resultado, a densidade de corrente é muito maior na vizinhança dos eletrodos que distantes deles.

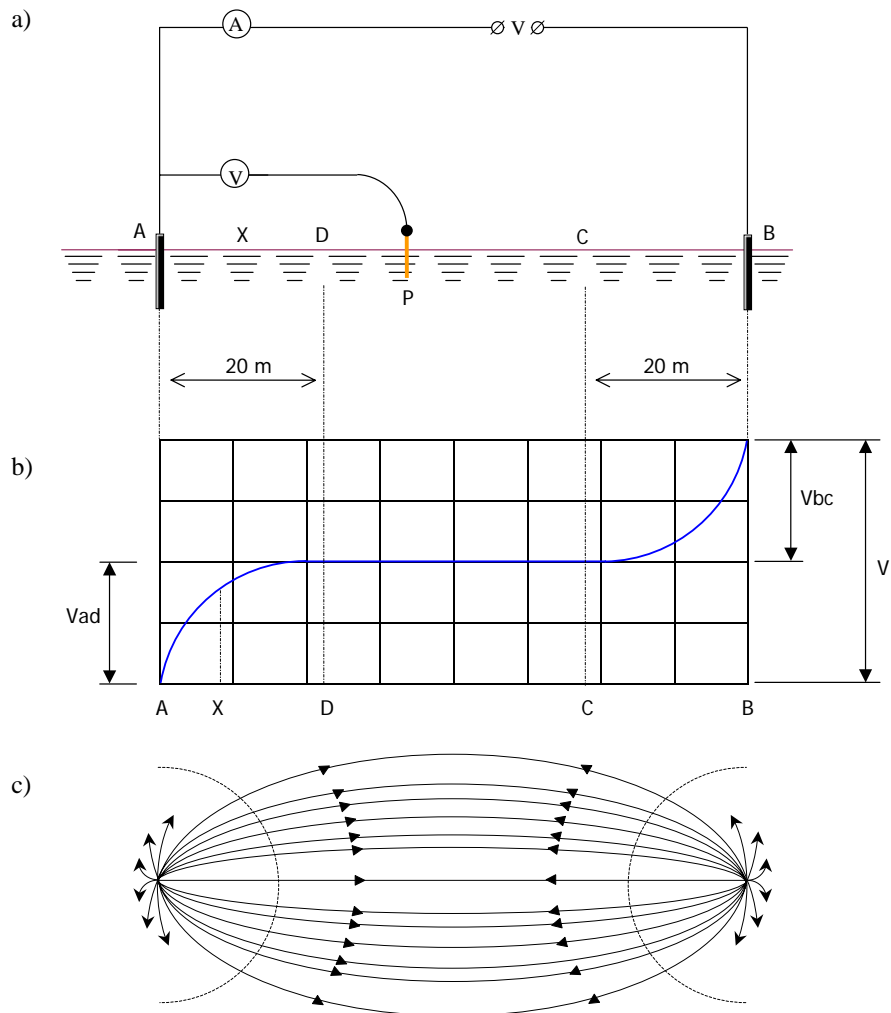


Figura 02 – Distribuição de potencial entre dois eletrodos de aterramento

- a) circuito para estabelecimento da distribuição do potencial
- b) curva de distribuição do potencial
- c) fluxo de corrente por terra

A resistência elétrica da terra tende para zero, pois tem-se um condutor cuja bitola tende para o infinito e a resistência de um corpo é inversamente proporcional à sua área de seção transversal.

A resistência do eletrodo de aterramento pode ser definida como sendo a relação $R_{at} = V_{ad} / I$ para o primeiro eletrodo A em que:

R_{at} = Resistência de terra do eletrodo A, em Ω ;

V_{ad} = Diferença de potencial de A até D , em Volts;

I = corrente do circuito, em A .

A resistência de terra para o segundo eletrodo B (R_b) será V_{bc} / I em que V_{bc} é a diferença de potencial de B até C e I a corrente do circuito.

Não houve queda de tensão na região DC, o condutor foi considerado de bitola infinita.

A distribuição de potencial ao longo da linha entre os eletrodos A e B é dada pela curva da Figura 3 em que φ_a e φ_b são as alturas dos cones de tensão dos eletrodos A e B, respectivamente.

A forma da curva depende apenas da configuração e disposição dos eletrodos de aterramento. A corrente elétrica, ao passar de um eletrodo para a terra, inicia em um metal de baixa resistência, passando para o solo que o circunda. O solo adjacente pode ser comparado a um invólucro de alta resistência elétrica, e seu efeito é impedir a passagem da corrente elétrica. A medida que vai atravessando cada invólucro, a corrente encontra outros, de dimensões maiores, e uma área ainda maior se oferece à sua passagem, e, em conseqüência cada vez menos resistência. A corrente chega a atingir invólucros de tão grandes dimensões, que a densidade de corrente torna-se baixa, e, virtualmente, nenhuma resistência é oferecida à sua passagem.

O gradiente de potencial nas redondezas do eletrodo depende da resistividade do terreno, da densidade da corrente no solo na saída do eletrodo e da raiz quadrada da superfície do eletrodo, à qual ele é inversamente proporcional.

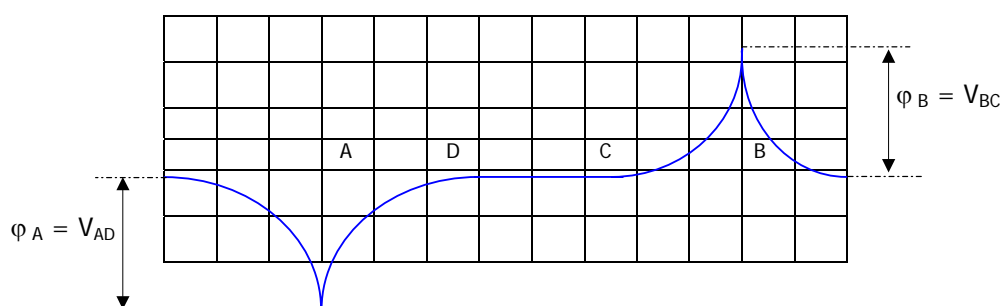


Figura 03 – Distribuição de potencial ao longo da linha.

CESP (1997) descreve que a corrente elétrica uma vez tendo atingido o solo, se dispersa através de uma enorme área. Em alguns tipos de solo a dispersão da corrente pode atingir profundidades de 3.000 metros, isto é, tudo se passa como se o solo fosse um condutor de 3.000 metros de diâmetro, o qual possui uma seção transversal de aproximadamente $7 \times 10^6 \text{ m}^2$.

Estes valores de profundidade média da corrente decrescem para solos de baixa resistividade. Para solos montanhosos a profundidade média do caminho de retorno da corrente no solo é de 2.600 metros, ou seja, corresponderia a um condutor com 5.200 metros de diâmetro, equivalente aproximadamente a $21 \times 10^6 \text{ m}^2$ de seção transversal.

A circulação da corrente em profundidades crescentes tenderá a reduzir a resistência do condutor solo, mas por outro lado resultará em valores crescentes para a reatância da linha devido ao aumento do afastamento dos dois condutores, “solo” e aéreo

metálico. Além disso, quando a profundidade do caminho da corrente é grande, também será grande o diâmetro do condutor resultante.

O fluxo magnético produzido por uma corrente que se desloca em um anel é proporcional a:

$$\frac{I.A}{L} \quad \text{onde:}$$

I = corrente no anel, em Ampère;

A = área do anel, em m²

L = comprimento do circuito magnético, em m.

Em solos de alta resistividade, onde grandes anéis são encontrados, o fluxo magnético é maior e se estende longe do condutor aéreo podendo envolver as linhas de telecomunicação e provocar tensões induzidas nas mesmas.

3.1.1 Resistividade do Solo

A prospecção geofísica é um conjunto de técnicas físicas e matemáticas aplicadas à exploração do subsolo. Dentre estas técnicas é a prospecção geométrica que estuda, por meio de medições efetuadas na superfície, a distribuição em profundidade de algumas grandezas eletromagnéticas. As três principais são: permeabilidade magnética (μ), constante dielétrica (ϵ) e resistividade (ρ).

Historicamente, Gray & Wheeler iniciam o estudo da resistividade das rochas, enquanto outros cientistas dirigiram suas atenções aos campos elétricos produzidos artificialmente, entre eles Brown, que foi o primeiro a patentear em 1883, um sistema de

prospecção elétrica com dois eletrodos. Em 1902, Dalft e Willians obtiveram outra patente baseada no emprego de correntes elétricas de baixa frequência.

Os métodos elétricos de campo artificial entram em verdadeira aplicação ao redor de 1915 com Conrad Schumberguer e o americano Frank Wenner que independentemente idealizam o dispositivo tetraeletródico, servindo de base para o progresso destas aplicações.

Harrison (1953) comenta que as medições de resistividade do solo podem ser afetadas pelas correntes e tensões estranhas presentes no solo, porque os aparelhos de medições são calibrados para lerem diretamente a resistência em ohm, e isso tem sido generalizado também para circuitos através do solo.

Thapar (1963) faz testes de medições de resistividade em solo não uniforme, para projetos de sistemas de sistemas de aterramento em subestações de alta tensão, o que não era comum nos anos anteriores a ele. Utilizando - se do método de quatro eletrodos, o mesmo autor analisa alguns parâmetros que estão presentes na medição da resistividade do solo, tal como a variação lateral da resistividade quando comparada com as variações verticais. Pelas suas análises, a resistividade do solo somente é em função da profundidade abaixo da superfície.

Portanto, é pratico e conveniente assumir que o potencial de um ponto P, na superfície do solo, é causado por uma corrente I circulando para um outro ponto Q na superfície, a uma distância (s) de P, o que é dado pela Equação 01.

$$V_{P-Q} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot s} [\rho_2 - (\rho_2 - \rho_1)e^{-bs}] * I \quad (V) \quad (01)$$

A equação 01 é verdadeira se a curva de resistividade for expressada pela Equação 02.

$$\rho = \rho_2 - (\rho_2 - \rho_1) \cdot e^{-bs} \cdot (2 - e^{-bs}) \quad [\Omega xm] \quad (02)$$

Onde ρ é a resistividade média para espaçamento (s), ρ_1 e ρ_2 são as resistividades aproximadas para pequenos e grande valores de (s), respectivamente, correspondendo à resistividade perto da superfície e à grandes profundidades. A constante (b) pode ser determinada na convergência da curva (ρ x s).

Tagg (1964) em suas investigações quanto a resistividade do solo, observa que quando quatro eletrodos estão espaçados em um alinhamento de igual intervalo, a efetiva profundidade de penetração da corrente elétrica no solo é igual a este intervalo.

Parasnis (1971) define resistividade como a resistência que experimenta uma corrente elétrica ao percorrer um caminho no solo, não havendo portanto relação com o volume de solo envolvido.

Orellana (1972) descreve a prospeção geométrica fundamentando as medições da resistividade do solo e suas interpretações, onde apresenta vários métodos de medições de resistividade, como os métodos de quatro eletrodos (Wenner) e de três eletrodos (Schumberguer).

Segundo Orellana (1972) a finalidade de sondagens elétricas verticais e da maioria dos métodos geométricos é a determinação da estrutura do subsolo na zona estudada. Para chegar a ele é necessário superar duas etapas: na primeira dela tenta-se obter a distribuição da resistividade do subsolo, e na segunda, busca-se o significado geológico de tais resistividades, com o qual se passa de um corte geométrico a um corte geológico.

O Comitê de Distribuição (1982), através da utilização de vários métodos de estratificação do solo, considerou os métodos combinados de Tagg para a primeira camada e as demais pelo método de Pirson, como os mais precisos.

O método dos pontos para medição de resistividade do solo apresentado pelo Instituto of Electrical and Electronics Engineers, IEEE (1983) é considerado o mais utilizado, apresentando, na prática, a média da resistividade a uma determinada profundidade em função do espaçamento dos eletrodos. Tal método é composto por pequenos eletrodos, os quais são cravados na superfície do solo, a uma profundidade (b) e espaçados em alinhamento a uma distância (a). Uma corrente elétrica (Is) circula pelos eletrodos externos através do solo e mede-se a diferença do potencial entre os eletrodos internos. Com esses parâmetros determina-se o valor da resistência ôhmica (R), pela lei de Ohm.

O valor da resistividade do solo em função do espaçamento (a) e da profundidade (b), é dado pela Equação 03.

$$\rho = \frac{4.\pi.a.R}{1 + \frac{2.a}{\sqrt{(a^2 + 4b^2)} - \frac{a}{\sqrt{(a^2 + b^2)}}}} \quad [\Omega xm] \quad (03)$$

Considerando o espaçamento entre os eletrodos adjacentes iguais, o método dos quatro eletrodos torna-se o arranjo desenvolvido por Wenner. Como valor de (b) é bem menor do que o valor de (a), a Equação 03 se reduz a Equação 04, onde fornece aproximadamente a resistividade média do solo para profundidade (a).

$$\rho = 2.\pi.a.R \quad [\Omega xm] \quad (04)$$

A redução da estratificação do solo em duas camadas, conforme o Comitê de Distribuição - CODI (1982) é um procedimento que oferece uma suficiente precisão para caracterizar o solo em função de suas resistividades, para fins de utilização na engenharia elétrica.

Dawallibi & Blattner (1984) consideram o método de Wenner, de relativa simplicidade para interpretação dos dados, nas medições de resistividade do solo. Analisaram seus resultados e observaram que as variações da resistividade são atribuídas a pequenas descontinuidades do local, ou a imprecisão nas medições relacionadas a correntes elétricas dispersas no solo, ou na sensibilidade inadequada dos equipamentos de medição. Na maioria dos casos, a resistividade aparente, plotada como uma função do espaçamento do eletrodo, mostra grandes variações com este, indicando assim que o solo não é homogêneo.

Caldecott (1984) compara os métodos de Wenner e da "driven rod", na medição da resistividade em um tanque eletrolítico, composto por duas camadas de resistividade, com valores do coeficiente de reflexão (K), variando de -1 a $+1$.

Observou-se no método de Wenner que a resistência diminui com o aumento do espaçamento entre hastes para todos os valores de K , o mesmo ocorrendo na aplicação do método da "driven rod", quando a profundidade da haste aumenta para um valor L .

Segundo Leon (1982) a resistividade de um solo supostamente homogêneo é diretamente proporcional à resistência de um eletrodo. Sendo que o mesmo eletrodo cravado num solo não homogêneo, não terá a sua resistência proporcional à resistividade do solo, dependendo de todos os fatores geológicos que influenciam a desuniformidade.

A Companhia Energética de São Paulo, CESP (1986), elabora um programa de computador para cálculo de sistemas de aterramento para redes de distribuição, a fim de

controlar os potenciais de superfície do solo. Para tanto, é necessário a estratificação do solo em "n" camadas, e em seguida reduzi-las a somente duas, para obter a resistividade equivalente do solo. A homogeneidade do solo é determinada pelas duas camadas de diferentes resistividades e espessuras definida pelo fator de estratificação ou reflexão (K) dado pela Equação 05.

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (05)$$

Rodrigues (1986) propõe um método numérico iterativo dos mínimos quadrados, com correções diferenciais, para determinar a estratificação do solo em duas camadas, através de um programa computacional (ESTRAT) pois considera o método da superposição de curvas padrão muito subjetivo e sujeito a erros, comprometendo assim o projeto do sistema de aterramento.

Leite & Pereira Filho (1995) comentam que a quantidade de camadas utilizadas no modelo, para estratificação do solo, é função da precisão desejada para os cálculos, características do solo real e disponibilidade de ferramentas matemáticas que permitam calcular as grandezas de interesse.

Segundo Ruppell (1913), citado por Paula Filho (1976), a natureza do solo influi de maneira bastante significativa sobre sua resistividade elétrica, e elaborou o Quadro 01 para diversos tipos de solo, determinando os valores de suas respectivas resistividades. Através deste estudo observou que a umidade do solo influencia de maneira bastante acentuada sobre a resistividade do mesmo e determina que se um solo com teor de 20%, passar para um teor de umidade de 5 %, sua resistividade aumentaria de 400 vezes. Pesquisou também o efeito da compressão do solo, sobre sua resistividade, quando variou a pressão de 20 gf/cm² para a pressão de 200 gf/cm², observou uma diminuição da

resistividade de 35% sobre a terra de jardim e de 16% sobre a areia com 5% de teor de umidade.

Schiesser (1923) afirma que a presença de água no solo é o fator determinante para aumentar sua condutividade elétrica, pois esta traz consigo a presença de sais dissolvidos pela troca iônica com as cargas elétricas do solo, ou por adição de sais, com isso tem-se uma diminuição na resistência de aterramento.

QUADRO 01- Valores de resistividade dos solos caracterizados por Ruppel (1913)

Solos Caracterizados	$\rho(\Omega\text{xc}m)$
Terra normal dos campos	$0,33 \times 10^4$
Terra argilosa com 20% de umidade	$0,33 \times 10^4$
Terra argilosa com 40% de umidade	$0,076 \times 10^4$
Humus com 20% de umidade	$0,96 \times 10^4$
Humus com 60% de umidade	$0,09 \times 10^4$
Terra de jardim, 50% de umidade	$0,13 \times 10^4$
Areia com 9% de umidade	$1,30 \times 10^4$

Devido ao grande número de variáveis que influenciam no valor da resistência de terra de um sistema de aterramento, Schiesser (1923) considera que a composição do solo ao redor do eletrodo, a temperatura, a umidade e a compactação do solo, são fatores que atuam de maneira significativa nos valores da resistividade do solo e na resistência de terra de eletrodo ou de um sistema de aterramento.

Tagg (1964) considera que a resistividade do solo pode ser determinada pela quantidade de água retida por ele e pela resistividade desta, definindo então que a condução de eletricidade pelo solo através da água retida torna-se uma condução eletrolítica.

O autor faz ainda algumas considerações a respeito dos fatores acima, comentando que o tipo de solo é muito importante na determinação da resistividade, porém estes não claramente definidos, e o termo argila pode aparecer numa variedade de solo. O mesmo tipo geral de solo ocorre em várias localidades e é freqüentemente notado que a resistividade num determinado local é diferente em outros.

Zoppetti (1972) elabora vários gráficos de seus ensaios realizados em sistemas de aterramento, onde considerou a umidade e a salinidade, em função da resistividade do solo.

O Comitê de Distribuição (1982) estabelece um conjunto de critérios e a correspondente fundamentação teórica, visando o estabelecimento de práticas de aterramentos uniformes entre as empresas do setor de energia elétrica. As metodologias desenvolvidas tiveram como pressuposto a necessidade de obter o máximo de segurança com o mínimo de investimentos nos sistema de aterramento.

Apresenta também alguns fatores que influenciam nos sistemas de aterramento e as metodologias que determinam os valores de resistência de terra, resistividade e estratificação do solo. No Quadro 02 são mostrados os valores característicos de resistividade em função dos tipos de solo.

O IEEE (1983), na determinação das resistividades dos solos não homogêneos, considera complexas tais medições, devido ao número de variáveis envolvidas, citadas por Tagg (1964). Analisando a curva da resistividade em função da

QUADRO 02 - Resistividade em função do tipo de solo, CODI (1982).

Tipo de solo	$\rho(\Omega m)$
limo	20 a 100
humus	10 a 150
lama	5 a 100
terra de jardim com 50% de .umidade	140
idem com 20% de umidade	480
argila com 40% de umidade	80
idem com 20% de umidade	330
argila seca	1500 a 5000
areia com 90% de umidade	1300
areia comum	3000 a 8000
calcário fissurado	500 a 1000
calcário compacto	1000 a 5000
granito	1500 a 10000
basalto	10000 a 20000

temperatura do solo, nota-se que a resistividade aumenta lentamente com o decréscimo da temperatura de 25°C para 0°C . Abaixo de 0°C a resistividade aumenta rapidamente. Em função dos valores de resistividade classifica-os nos limites apresentados no Quadro 03.

Dawallibi & Blattner (1984), através das técnicas de interpretação por programas de computação, demonstram que as grandes variações nas medições de resistividade do solo não devem ser um obstáculo no desenvolvimento de modelos detalhados de estrutura do solo. Consideram para tal afirmação que, para um sistema de aterramento em energia elétrica, o solo pode ser razoavelmente aproximado por uma estrutura de duas camadas.

QUADRO 03 - Classificação dos valores de resistividade segundo o IEEE (1983).

- Muito baixo	10 a 30	($\Omega \times m$)
- Baixo	100	($\Omega \times m$)
- Médio	300	($\Omega \times m$)
- Alto	1.000	($\Omega \times m$)
- Muito alto	3.000	($\Omega \times m$)
- Altíssimo	10.000	($\Omega \times m$)

Seraphim (1992) comenta que em solos com maior teor de argila apresentam os maiores índices de porosidade. A dispersão total das partículas dos solos argilosos, acrescidos de suas maiores plasticidades e coesão, se constituem num solo com maior poder de retenção de água. Estas particularidades permitem manter um contato elétrico mais eficiente com a haste, nos solos argilosos.

Seraphim & Piedade (1992) concluíram que o aumento do teor de umidade do solo nem sempre corresponde a uma diminuição proporcional na resistência de

aterramento, sendo esta mais influenciada pela composição química dos sais dissolvidos na água retida pelo solo.

Segundo a NBR-7117 (1981) a resistividade é bastante sensível ao teor de umidade do solo até um valor de 20%, aumentando a umidade acima deste valor provocará variações menores na resistividade.

Carvalho (1986) apresenta o sistema monofilar com retorno por terra (MRT) como uma alternativa econômica para a eletrificação rural no Brasil, justificando que este sistema não tem apresentado problemas de ordem técnica, durante a sua operação, que possa ser considerado exclusivo deste sistema. Essas afirmações concordam com as de Sotille (1986), que destacam também a importância das características do solo (resistividade), como um fator de viabilização do sistema MRT, podendo ser econômico, técnico ou de segurança pessoal. Porém analisando todas as condições que envolvem este sistema, conclui-se que é possível executar este tipo de sistemas mesmo em regiões com altíssimos valores de resistividade.

Leite & Pereira Filho (1995) salientam que outro fator que influencia muito a resistividade é a quantidade de sais presentes na composição da água. Convém ressaltar que a resistividade da água pura é quase infinita, ou seja, a água seria um isolante perfeito caso não contivesse sais que, através da ionização, permitem a condução de correntes elétricas.

3.2 Sistema Monofilar com Retorno por Terra

Os sistemas MRT - Monofilar com Retorno por Terra começaram a ter sua implantação incentivada no Brasil pela ELETROBRÁS em torno dos anos 80, embora o seu uso na COPEL, já era uma realidade desde a década de 70.

Através da ELETROBRÁS - Assessoria de Eletrificação Rural – ASER, o sistema foi submetido a análise dos especialistas das empresas CESP, CEEE, CEMIG, LIGHT, COPEL, CELPE, CERJ, COBER e CPFL, que emitiram entre outros produtos, as “Normas para Projeto”, através de recomendações a serem observadas para a adoção de padrões, planejamento, projetos e aterramento deste sistema.

A partir do fim da década de 80, várias empresas passaram a adotar o uso desta alternativa para áreas rurais, com bons resultados na qualidade da energia fornecida.

Com a evolução significativa deste sistema as concessionárias convenientes do CODI entenderam ser oportuno a análise e discussão atual do sistema MRT quanto aos procedimentos de operação, manutenção e segurança no trabalho e para o público em geral.

Dependendo da natureza do sistema elétrico existente, tipos de sistemas de proteção, carga a ser ligada e características do solo onde será implantado, pode se apresentar nas seguintes versões:

3.2.1 Sistema Monofilar sem Transformador de Isolamento

Constitui-se de um único condutor metálico ligado diretamente a uma das fases de uma linha trifásica, tendo o solo como o meio de retorno da corrente. Os transformadores de distribuição por ele alimentados têm seus enrolamentos primários ligados entre o condutor e o solo, representado na Figura 04.

Este sistema só pode ser originado em alimentadores cuja saída da subestação de origem é estrela-aterrado. No seu emprego deve-se procurar manter um adequado balanceamento de fases, com o objetivo de concentrar as correntes de retorno nas áreas servidas pelo sistema, reduzindo-se desta forma os riscos de atuação indevida dos dispositivos de proteção contra falta fase-terra da Subestação (S/E).

Apresenta-se como uma simplificação do monofásico multi-aterrado convencional com a eliminação do condutor neutro e, conseqüentemente, dos aterramentos ao longo da linha. É comprovadamente a versão mais prática e econômica do MRT, sendo, portanto, a mais recomendada.

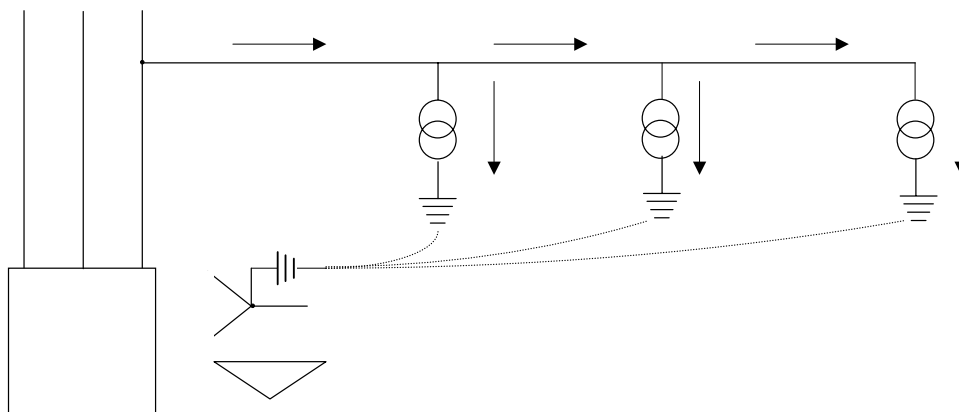


Figura 04 - Sistema Monofilar sem Transformador de Isolamento

3.2.2 Sistema Monofilar com Transformador de Isolamento

Consiste de um único condutor metálico partindo de um sistema trifásico através de um transformador de isolamento, tendo o solo como caminho de retorno da corrente, Figura 05. O transformador de isolamento tem seu enrolamento primário ligado a duas fases do sistema trifásico e o secundário entre o condutor metálico e a terra.

Apresenta-se como solução para o emprego do MRT a partir de sistemas isolados. Para os casos onde o sistema na S/E é estrela-aterrado, sua utilização poderá vir a ser justificada aliando-se as seguintes vantagens:

- Limitar a zona de circulação das correntes de retorno pela terra, evitando atuação indevida de dispositivo de proteção sensível a falta fase-terra de alta impedância;
- Adequar a tensão do sistema MRT às tensões nominais padronizadas;

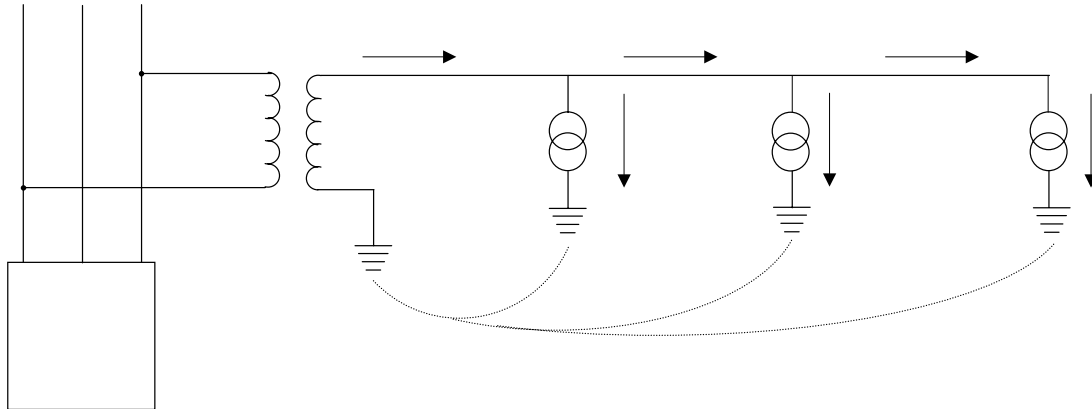


Figura 05 - Sistema Monofilar com Transformador de Isolamento

- Elevar a tensão para permitir o atendimento a uma área mais ampla em condições econômicas;

- Limitar as correntes de curto-circuito disponíveis nas linhas MRT

Como desvantagens, além do custo adicional do transformador de isolamento, cumpre destacar:

- Limitação da potência do ramal à potência nominal do transformador de isolamento;

- Limitação da potência do transformador de isolamento dada pela viabilidade de conseguir um aterramento seguro.

Por esses aspectos, sua aplicação deve ser acompanhada de um estudo técnico-econômico, no qual dever-se-ão levar em conta, além dos fatores acima apresentados, outros tais como extensão da área a ser atendida.

3.2.3 Sistema MRT na Versão Neutro Parcial

Consiste da interligação dos aterramentos dos transformadores do ramal MRT através de um condutor adicional. Desta forma, apresenta-se fisicamente como o monofásico fase-neutro multi-aterrado, com a diferença de que o condutor neutro não está conectado á subestação de origem, Figura 06.

É empregado como solução para a utilização do MRT em regiões de solos de alta resistividade, quando se torna difícil obter valores de resistência de terra dos transformadores dentro dos limites máximos estabelecidos no projeto. Nesse sistema, a interligação dos aterramentos dos transformadores forma um único sistema de terra, reforçada pelos aterramentos que podem ser acrescentados ao longo do ramal, contribuindo, dessa forma, para baixar o valor da resistência equivalente em cada ponto.

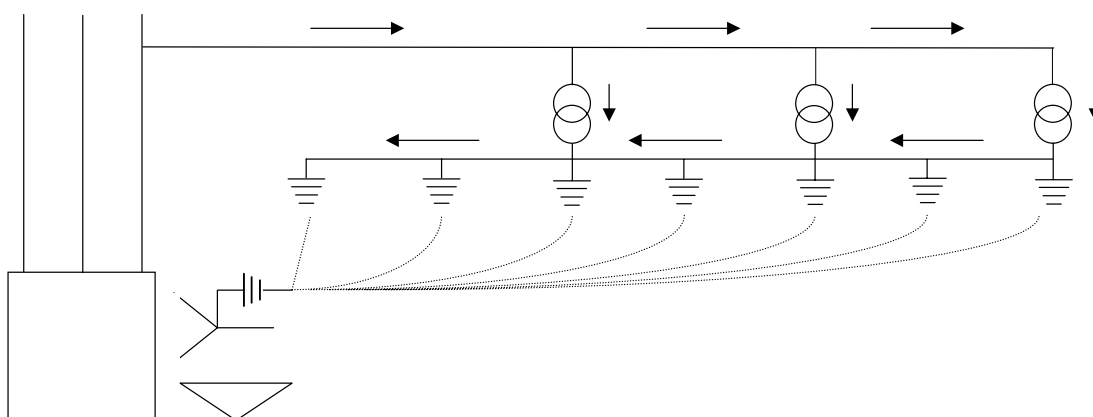


Figura 06 - Sistema MRT na Versão Neutro Parcial

3.2.4 Sistema de Atendimento à Carga

Por conveniência o sistema de atendimento em tensão secundária, disponibilizado por um transformador monofásico (MRT), é o sistema monofásico a três fios. Este sistema tem sido utilizado com êxito sobretudo para o atendimento a cargas rurais residenciais, pequenos motores para irrigação ou cargas de micro-agroindústrias.

Nesse sistema, que não deve ser confundido com o trifásico, os três condutores de alimentação derivam, respectivamente, dos dois extremos do secundário de um transformador e de uma "Tomada Central", conforme Figura 07 abaixo.

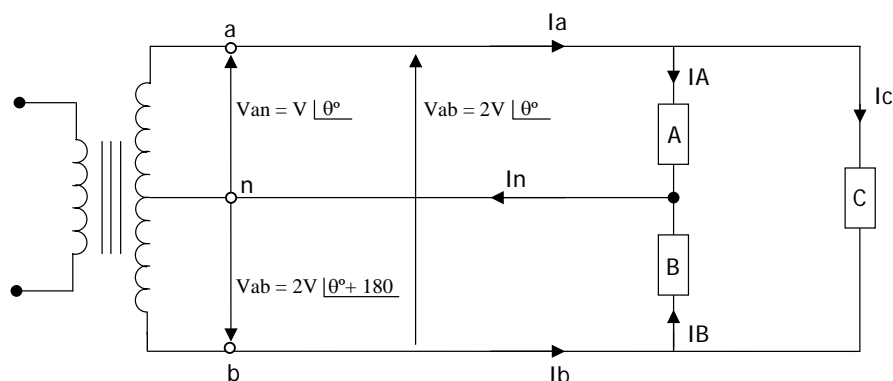


Figura 07 - Esquema de Sistema Monofásico a três fios

O fio central, ou neutro, vai ligado à terra, para proteção dos utilizadores. Entre este fio neutro e os outros dois existem tensões iguais e de fases opostas. Entre os fios extremos (a, b) haverá uma tensão dupla. Tipicamente 115 V entre qualquer dos fios extremos e neutro e 230 V entre os dois fios extremos. O sistema pode, assim, alimentar cargas de 115 ou 230 V. O Decreto 97.280 de 16/12/88 do DNAEE padroniza as tensões 254/127 V.

3.3 Sistema de Aterramento

Entende-se por sistema de aterramento o conjunto de condutores, cabos, hastes e conectores interligados, projetado de modo a suportar a condução e dissipação para o solo das correntes que sejam impostas a esse sistema, que podem ter várias origens, ou seja:

- a) de alta amplitude e alta frequência, resultantes de descargas atmosféricas ou induzidas pela mesma;
- b) de amplitudes variáveis e de baixa frequência (60Hz) resultantes de falhas fase - terra dos sistemas alimentadores de energia elétrica;
- c) de origem eletrostática devido às descargas estáticas induzidas nas carcaças e estruturas metálicas.

Normalmente o aterramento de sistemas de alta tensão é meramente uma medição protetora e a corrente flui no circuito de terra somente durante um curto.

No caso do sistema MRT, no entanto, a instalação de aterramento conduz a corrente de carga do circuito tanto quanto qualquer corrente de curto. Isto coloca o sistema de aterramento da linha MRT em maior proeminência do que a da linha convencional.

A viabilização técnica de sistemas MRT está diretamente ligada às características do solo na área onde se pretende executar o aterramento. Nestes sistemas, como os aterramentos são elementos ativos no circuito, o aspecto segurança das pessoas e/ou animais em contato ou próximas às partes condutoras merece maior peso como fator de projeto.

A preocupação no projeto de uma sistema de aterramento está na determinação do menor valor possível da resistência elétrica oferecida ao escoamento das

correntes, não permitindo, nesta condição, que sejam ultrapassados os valores de potenciais de passo e toque que originariam correntes pelo corpo humano acima dos valores máximos permissíveis.

Portanto, pelo exposto acima, uma sistema de aterramento deve estar ligado basicamente a 2 aspectos:

- segurança das pessoas e/ou animais em contato ou próximas às partes condutoras
- continuidade do sistema elétrico (retorno de corrente pelo solo).

O aspecto de segurança deve ser sempre considerado independentemente da natureza da corrente que deva ser dirigida ao solo (descarga atmosférica, corrente de curto-circuito, indução, retorno, etc.).

Os sistemas de aterramento, além disso, devem ainda proporcionar um caminho seguro para as correntes nas redes de distribuição de energia no sistema monofásico com retorno por terra (MRT), manter os potenciais pelas correntes de falta dentro de limites de segurança e promover a sensibilização das proteções dos sistemas.

Para se projetar corretamente um sistema de aterramento, para que o mesmo possua capacidade adequada de dispersão de corrente, é necessário conhecer perfeitamente o valor da resistividade do solo e a estratificação que o mesmo apresenta em relação a variação de resistividade. Esse tipo de preocupação pode ser encontrado em Kitagawa (1990), quando do estudo da tensão de passo.

No trabalho realizado por Simon (1971) pode-se verificar que a variação da resistência de um sistema de aterramento pode comprometer tecnicamente os sistemas monofilar com retorno por terra (MRT).

No trabalho conduzido por Pedersen (1990) pode-se verificar uma série de danos provocados por descargas atmosféricas em sistemas elétricos, onde salienta o sistema de aterramento como meio de dispersão da corrente, limitando tanto quanto possível seus efeitos destrutivos.

Silva Júnior et al. (1992) desenvolvendo pesquisa na região nordeste do Estado de Mato Grosso do Sul (Costa Rica, Paraíso e Paranaíba), caracterizado pelo Latossolo Vermelho e Areia Quartzosa, comparando os valores de resistências de aterramento projetados e medidos, concluíram que 83% dos eventos apresentavam erro inferior a 20%.

Estudos realizado neste mesmo local, Silva Júnior et al. (1992) concluíram que a diferença máxima entre os valores medidos e projetados em um sistema de aterramento em linha foi de 5 Ohm e a variação da resistência elétrica medição em dois meses deve-se a variação da umidade do solo.

Pelo que se pode expor, verifica-se que a medição de potencial de passo, a resistividade do solo e a resistência do sistema de aterramento são importantes quando se tem como objetivo o desempenho e segurança de um sistema MRT, levando a desvinculação dos baixos valores de resistência, condicionando-os principalmente aos gradientes de potenciais na superfície considerados admissíveis a pessoas e animais que mantenham contato com as instalações elétricas

Harrison (1953) em suas investigações observou que há uma componente reativa no solo, que deve ser considerada nas medições de resistência de terra. Pesquisou a influência da variação da frequência da tensão de alimentação, no valor da impedância de aterramento, considerando uma faixa de frequência entre 0 e 1000 Hz

Abreu (1961) considera que a distância entre as hastes auxiliares, na medição da resistência de aterramento, deve variar na ordem de 15 metros, para pequenos sistemas, e 30 metros, no caso de maiores. A distância da haste de corrente deverá ser no mínimo cinco vezes a maior dimensão do sistema de aterramento, devendo a haste de potencial ser localizada no centro dos extremos.

Tagg (1964) determina, através de deduções de equações, o ponto de instalação da haste de potencial, na medição da resistência de aterramento, o qual deve estar a 61,8 % da distância correspondente a haste de corrente.

Este resultado foi baseado num eletrodo de aterramento esférico ideal porém pode ser estendido a outras configuração de aterramento .

Paula Filho (1976) obtém, através de várias formulações empíricas, as curvas da resistência de aterramento em relação às dimensões e profundidades dos eletrodos de cobre, dos tipos: tubo, tira e placa. Tais resultados comprovaram que dois tubos espaçados de 2 metros entre si e ligados em paralelo, são mais eficiente que um tubo de diâmetro igual à soma dos dois.

Para Leon (1982), a distância da haste de corrente deve ser instalada em torno de dez vezes a maior dimensão do sistema de aterramento, e a haste de potencial 61,7 % desta distância.

Ainda segundo Leon (1982), as hastes e sistemas de aterramento, quando submetidos às correntes elétricas industriais (baixa frequência), comportam-se como resistências puras. Entretanto, tratando-se de correntes de grande intensidade e de frequência elevadas (ocasionadas por descargas atmosféricas), a impedância de aterramento varia com raiz quadrada da resistividade do solo.

O Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE (1983), recomenda que os valores das resistências de terra dos eletrodos de corrente e de potencial, devem estar de acordo com as necessidades dos instrumentos usados nas medições. Para os instrumentos comerciais a resistência do eletrodo de potencial pode ser 1000 Ω . A resistência de terra do eletrodo de corrente deve ser usualmente menor do que 500 Ω . Como regra geral considera-se que a razão entre a resistência de terra do eletrodo de corrente e a resistência de terra que está sendo medida, nunca deve exceder 1000 para 1, preferencialmente 100 para 1 ou menos.

O Comitê de Distribuição (1982) fornece as formulação necessárias para determinação da resistência do sistema de aterramento, sendo este do tipo haste rígida, de seção circular ou cantoneira, com cravação vertical no solo, atingindo camadas do solo mais profundas e na maioria dos casos são de menor valor de resistividade. Os tipos da configurações utilizadas nos sistemas de aterramento determinam o valor da resistência de terra, e dependendo do tipo de solo e/ou da finalidade do sistema, podemos ter os seguintes tipos:

- Uma única haste de comprimento e diâmetro variáveis;
- Anéis concêntricos;
- Hastes interligadas em paralelo, dos tipos: alinhadas, em triângulo, em quadrado vazio, em quadrado cheio e em círculo;
- Hastes interligadas em série, do tipo profunda

A resistência de terra é fixada pelas normas técnicas e pelas concessionárias de Energia Elétrica, em valores máximos admissíveis, isto é, dependendo da finalidade e da utilização do sistema de aterramento.

A Companhia Paulista de Força e Luz (1982) fixa este valor para os aterramentos de transformadores rurais em 10Ω , em situação de solo úmido, e 25Ω para solo seco. Caso estes valores não sejam conseguidos, utilizando-se da configuração básica, será necessário a execução de aterramento do tipo profundo, conforme orientações técnicas desenvolvida por esta concessionária.

A utilização de corrente contínua nas medições de resistência de terra, conforme o Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE (1983), cria uma ação química de polarização junto as hastes e o solo, decorrente de uma circulação eletrolítica da corrente elétrica.

Gomes et al. (1990), consideram que para projetos de sistemas de aterramento, o valor de resistividade a ser empregado nos cálculos, deve ser o que represente a situação do solo que o eletrodo abrangerá, ou seja, por onde o eletrodo fará escoar a corrente elétrica de defeito.

O projeto de sistemas de aterramento requer o cálculo da resistência de aterramento e dos potenciais na superfície do solo. O método das imagens é utilizado para este cálculo e o modelo típico do solo é uma estratificação horizontal em 2 camadas.

A extensão do método das imagens para solos com múltiplas camadas horizontais apresenta problemas numéricos importantes, de forma que a técnica de imagens complexas foi utilizada para permitir este cálculo, porém restringindo a posição dos eletrodos à primeira camada.

Pereira Filho (1999) faz aplicação do método de imagens complexas a eletrodos situados em qualquer camada de solos com estratificação horizontal, deduzindo as

funções kernel para posições arbitrárias da fonte e do objeto e determinando os resíduos e pólos das imagens utilizando a decomposição em autovalores e autovetores.

Foi desenvolvido um programa que calcula a resistência de aterramento e os potenciais na superfície do solo para solos com até 4 camadas, realizando comparações com outros trabalhos publicados e os resultados obtidos permitem validar o uso do programa para esta aplicação.

As ferramentas disponíveis no mercado mundial podem ser divididas em dois grandes grupos, um deles utilizando o método dos elementos finitos, com grande flexibilidade para modelar os eletrodos e o solo desenvolvido por Cardoso (1987) e outro, utilizando o método das imagens, com maior disseminação entre os projetistas de sistemas de aterramento, porém com maiores limitações de modelamento.

Os pacotes computacionais mais conhecidos que utilizam o método das imagens são o SGA do Electric Power Research Institute, o CYMGRD da CYME International e o CEDEGS da Safe Engineering Services & Technologies.

No Brasil a produção de pacotes computacionais desta natureza para uso por projetistas ainda é rara. Leite & Pereira Filho (1995) desenvolveram o código de cálculo do programa Tecat IV , que calcula estratificação de solos em até quatro camadas e sistemas de aterramento em solos de duas camadas.

Dentre os pacotes citados por Pereira Filho (1999), que utilizam o método das imagens, somente o CEDEGS executa cálculos em solos estratificados em mais de duas camadas. Considerando que uma estratificação em duas camadas impõe limitações severas no modelo dos solos em análise, é justificável e interessante expandir o domínio de aplicação de técnicas baseadas no Método das Imagens para solos com mais de duas camadas, comenta o autor.

Quando o modelo utilizado é de apenas duas camadas o ajuste de curvas é realizado facilmente, já para número de camadas maior que dois não há solução analítica, sendo necessário uma integração bastante trabalhosa para contornar o problema de integração, este tipo de preocupação pode ser encontrado por Ghosh (1971), que introduziu a aplicação de filtro digitais na estratificação horizontal de solos. Posteriormente Pereira Filho & Cardoso (1998) utilizando da mesma aplicação e obtiveram resultado eficaz.

3.3.1 Potenciais na Superfície do Solo

Os gradientes de tensão ao longo da superfície da terra dentro e fora de sistemas de aterramento de uma subestação podem ser grandes, em condições adversas, com riscos para o ser humano.

Potenciais perigosos podem ocorrer quando elevadas correntes fluírem para o solo, seja por elevadas potências, seja durante descargas atmosféricas. Infelizmente, a precisão de cálculo desses gradientes de voltagem raramente é prática.

A geometria do sistema de aterramento é, freqüentemente, mais complexa do que parece e o conhecimento das características do subsolo na maioria das vezes é incompleto.

Uma estação com resistência de terra baixa pode ser perigosa em algumas circunstâncias. Por outro lado, algumas estações com resistência de terra alta são seguras ou podendo tornarem-se seguras, por cuidado de projeto.

Não só a magnitude dos gradientes locais é fator problema em segurança, mas outras inclusões, tais como duração do choque, resistência do corpo, condições físicas do indivíduo e probabilidade de contato são, também, fatores a serem estudados.

É verdadeiro que a segurança proveniente de elevadas correntes para a terra pode não chegar a uma ciência exata, porém, muitas informações úteis viabilizam a elaboração de sistemas considerados seguros.

Para a execução do projeto de um sistema de aterramento é necessário modelar o solo de uma forma adequada, possibilitando o cálculo de resistências de aterramento e de potenciais na superfície do solo.

A primeira consideração a respeito do aterramento das linhas MRT é a proteção da vida de pessoas e animais. Estudos realizados por vários pesquisadores, apontam o risco quando quedas de tensão no sistema de aterramento são superiores a 40 V.

Harvey et al. (1959) concluíram que o dimensionamento de um sistema de aterramento deve ser feito de forma que o potencial de passo não ultrapasse 40 V e que, uma tensão de 13 V nas patas de um boi (potencial de pata) chega a causar desconforto.

O Código de Instalação do Sistema MRT australiano aplica um coeficiente de segurança de 2 sobre 40 volts, limitando, no código de aterramento, a tensão máxima em 20 volts em condições normais de operação. Com tal limitação, o risco de morte é desprezível.

Experiências feitas para determinação de distribuição de tensão em torno dos eletrodos de terra da Subestação de Isolamento, executados com haste de 6" (seis polegadas) dentro da terra, demonstraram que pode haver algum risco, quando a diferença de potencial entre os eletrodos e a massa da terra exceder 40 V. Foram observadas indicações de que os gradientes na superfície do solo são menores que os gradientes medidos a 6" de profundidade pelas hastes de terra.

O limiar da sensação de corrente alternada para o corpo humano é de 1 mA. Correntes de 9 a 25 mA já são quase dolorosas e podem resultar em descontrole muscular, suficiente para dificultar a retirada de objetos energizados agarrados pelas mãos. Ainda no intervalo de 9 a 25 mA podem ocorrer problemas respiratórios, que podem desaparecer quando a corrente for interrompida, ou, quando a contração for mais severa, verifica-se a interrupção respiratória. O limiar para fibrilação ventricular varia de 50 a 100 mA. Nenhuma boa base experimental foi encontrada para esses valores e, provavelmente, incluem um fator de segurança.

O valor de 100 mA é baseado em extenso trabalho da Universidade de Columbia (USA), com correntes de duração máxima de 3 segundos.

Schiesser (1923), fazendo considerações sobre as diferenças de potencial admissíveis para a segurança das pessoas, indica 150 V, em corrente alternada, como sendo perigosa para que um homem toque dois pontos com essa diferença de potencial. Esse é o limite também fixado pelas normas americanas.

O que se deve considerar, entretanto, é a intensidade e o percurso da corrente elétrica que atravessa o corpo. Admite ainda o autor que uma corrente de 0,1 A já dificulta a recuperação do acidentado e que 0,5 A é mortal. Como a resistência interna do corpo humano (300 a 700 Ω) é muito pequena, em relação às resistências de contatos (50 k Ω /cm² - pele seca), o que define, realmente, a corrente no corpo são as resistências de contato. A norma alemã, citada por Schiesser (1923) prevê que a diferença de potencial não deve ultrapassar 40 volts, quando se tratam de locais úmidos.

Grande & Corvacan (1979) dizem que a COPEL (Concessionária de Energia Elétrica do Paraná) usa, há vários anos, o sistema MRT, e menciona a resistência de terra

de 10Ω para todas as potências de transformadores. Afirma ainda que o limite estabelecido para a resistência de terra (10Ω) garante o limite de potencial de toque e não é privativo do sistema MRT.

Analisando o exposto acima e utilizando as curvas de potencial de transferência, em função da resistência de terra para as várias potências do transformador do consumidor, poderemos estabelecer o limite máximo de resistência de terra para cada potência.

Para isso foi considerada segura uma tensão de 25 volts do cabo de aterramento para a terra, em condições normais de operação (potencial de transferência). Essa tensão foi escolhida considerando que ao ser aplicada sobre um corpo humano, com resistência elétrica de 1000Ω , causará uma corrente de 25 mA, que é o limite superior de corrente já quase dolorosa e pode resultar em descontrole muscular, com pouca possibilidade de ocorrer problemas respiratórios. O potencial de toque será ainda inferior e o valor de 1000Ω é conservativo sob o ponto de vista de segurança.

A escolha deste valor coincide com a aplicação de um fator de segurança 1,6 sobre 40 V, que é o limite de tensão apontado por alguns autores e por normas alemãs, acima do qual, há possibilidade de risco de acidente, com queda de tensão em sistema de aterramento. Foram determinados ainda os potenciais de toque correspondentes às resistências de terra que forneceram o potencial de transferência de 25 volts, para as várias potências das estações. Para determinação dos valores de R_{at} recomendados para cada estação transformadora sob condições de regime, deve-se aplicar o valor da potência nominal do transformador na equação:

$$R_{at} = \frac{40 \text{ V} / 1,6}{P_n / V_{f-t}} \quad \text{onde:}$$

R_{at} = Resistência de terra, em Ω

P_n = Potência Nominal do transformador, em kVA

V_{f-t} = Tensão entre fase e terra primário, em Volts

Para estações de isolamento a aplicação obedece o mesmo critério levando-se em conta a tensão de saída do transformador.

Nos casos de solos com alta resistividade, projetos específicos poderão ser desenvolvidos, que resultem em valores de resistência de terra superiores aos recomendados, desde que respeitados os limites adequados para os gradientes de potencial de superfície, conforme dados fornecidos nos Quadros 04 e 05. (CODI, 1982).

QUADRO 04 - Valores recomendados de resistência de terra (R_{at}) para estações transformadoras, dadas em Ω .

Potência do Transformador (kVA)	Tensão entre Fase e Terra (kV)			
	$\frac{11,4}{\sqrt{3}}$	$\frac{13,8}{\sqrt{3}}$	$\frac{23}{\sqrt{3}}$	$\frac{34,5}{\sqrt{3}}$
3	55	66	110	166
5	33	40	66	99
10	16	20	33	49
15	11	13	22	33

As concessionárias de energia elétrica fixam os valores máximo admissíveis para a resistência de aterramento. A Companhia Paulista de Força e Luz, CPFL (1982) fixa este valor em 10Ω para aterramento de transformadores rurais em situação de solo úmido e 25Ω para solo seco.

QUADRO 05 - Valores recomendados de resistência de terra (R_{at}) para estações de isolamento, dadas em Ω .

Potência do Transformador (kVA)	Tensão no Secundário do Trafo de Isolamento (kV)			
	$\frac{11,4}{\sqrt{3}}$	$\frac{13,8}{\sqrt{3}}$	$\frac{23}{\sqrt{3}}$	$\frac{34,5}{\sqrt{3}}$
25	6,5	8,0	13	20,0
50	3,0	4,0	6,5	10,0
75	-	2,5	4,0	6,5
100	-	1,5	3,0	5,0

3.3.1.1 Tensão de Toque

Segundo Kindermann (1995), tensão de toque é a tensão elétrica existente entre os membros superiores e inferiores de um indivíduo, devido a um defeito no equipamento. Por exemplo, um defeito de ruptura na cadeia de isoladores de uma torre de transmissão. O cabo condutor ao tocar na parte metálica da torre produzirá um curto circuito do tipo fase-terra, e a corrente de curto-circuito passará pela torre, fluindo para a

terra e percorrendo o solo até atingir a malha da subestação, retornando pelo cabo da Linha de Transmissão até o local do curto.

No solo, a corrente de curto-circuito gerará potenciais distintos desde a base da torre até uma distância remota.

Uma pessoa tocando na torre, no momento do curto circuito, ficará submetida a um choque proveniente da tensão de toque. Entre a palma da mão e o pé haverá uma diferença de potencial chamada de tensão de toque. Por Norma, e nos projetos de sistema de aterramento, considera-se que a pessoa está afastada de 1m do equipamento em que está tocando com a mão.

A resistência do corpo humano para corrente alternada de 50 ou 60 Hz, pele suada, para tensão de toque maior que 250V fica saturada em 1000 Ω .

Cada pé em contato com o solo, terá uma resistência de contato representado por $R_{contato}$.

Assim, a tensão de toque é representada pela Equação 06.

$$V_{toque} = (R_{corpohuma} + \frac{R_{contato}}{2}) I_{choque} \quad (06)$$

Segundo recomendações da IEEE (1983), pode-se considerar que:

$$R_{contato} = 3\rho_s \quad \text{onde:}$$

$\rho_s \Rightarrow$ resistividade superficial do solo, isto é, a resistividade da primeira camada da estratificação do solo.

Deste modo temos a Expressão 07, para tensão de toque.

$$V_{toque} = (1000 + \frac{3\rho_s}{2})I_{choque}$$

$$V_{toque} = (1000 + 1,5\rho_s)I_{choque} \quad (07)$$

O aterramento na base da torre só estará adequado se, no instante do curto-circuito monofásico à terra, a tensão de toque ficar abaixo do limite de tensão para não causar fibrilação ventricular. A tensão de toque é perigosa porque o coração está no trajeto da corrente de choque, aumentando o risco da fibrilação ventricular.

3.3.1.2 Tensão de Passo

Segundo Kindermann (1995), a tensão de passo é a tensão elétrica entre os dois pés no instante da operação ou defeito tipo curto circuito monofásico à terra no equipamento.

No caso da torre de transmissão, a pessoa receberá entre os dois pés a tensão de passo. Nos projetos de aterramento de acordo com Norma, considera-se a distância entre os dois pés de 1m.

Pela as Expressões de 08 a 10, obtêm-se que:

$$V_{passo} = (R_{corpohumano} + 2R_{contato})I_{choque} \quad (08)$$

$$V_{passo} = (1000 + 2.3.\rho_s)I_{choque} \quad (09)$$

O aterramento só estará bom se a pior tensão de passo for menor do que o limite de tensão de passo para não causar fibrilação ventricular no ser humano.

$$V_{passo} = (1000 + 6\rho_s)I_{choque} \quad (10)$$

A tensão de passo é menos perigosa do que a tensão de toque. Isto se deve ao fato do coração não estar no percurso da corrente de choque. Esta corrente vai de um pé ao outro, mas mesmo assim ela também é perigosa. As veias e artérias vão da planta do pé até o coração.

Sendo o sangue condutor a corrente de choque devido a tensão de passo vai do pé até o coração e deste ao outro pé. Por este motivo, a tensão de passo é também perigosa e pode provocar a fibrilação ventricular.

Deve ser lembrado que as tensões geradas no solo pelo curto-circuito criam superfícies equipotenciais. Se a pessoa estiver com os dois pés na mesma superfície de potencial, a tensão de passo será nula, não havendo choque elétrico.

A tensão de passo poderá assumir uma gama de valores, que vai desde zero até a máxima diferença entre duas superfícies equipotenciais separadas de 1m.

Um agravante é que a corrente de choque devido a tensão de passo contrai os músculos da perna e coxa, fazendo a pessoa cair, e, ao tocar no solo com as mãos, a tensão se transforma em tensão de toque no solo.

Neste caso, o perigo é maior, porque o coração está contido no percurso da corrente de choque.

No gado, a tensão de passo se transforma em tensão de pata, isto é, de pata à pata. A tensão de pata é maior que a tensão de passo do homem, com o agravamento de que no gado a corrente de choque passa pelo coração. Portanto, o gado está mais sujeito à fibrilação ventricular que o homem.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Características Construtivas do Sistema Monofilar com Retorno por Terra

A pesquisa foi desenvolvida nas dependências do Campus de Campo Grande da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, coordenadas geográficas 20° 26' 29", Latitude S, 54°38' 19", Longitude W, 540 m de altitude, onde foi construída uma linha monofilar com retorno por terra, em uma área com solo do tipo Latossolo Vermelho arenoso, tendo a grama como cobertura vegetal, com um comprimento de 245 metros com as seguintes características:

- tensão de alimentação de 7,967 kV;
- postes de eucalipto tratado, com alturas de 10 m e 11m;
- condutor de alumínio 4 AWG – CAA;
- estruturas U2, U3 e U4;
- chave fusível unipolar, NBI 95 kV, $I_n = 100A$, capacidade de interrupção 10 kA;

- para-raio tipo válvula, tensão nominal 12 kV, tensão de impulso disrruptiva, onda plena máxima 70 kV, tensão residual para 10 kA, máximo 43 kV;
- transformador de distribuição da classe de tensão de 15 kV e 60 Hz, marca Brasil S/A, monofásico, F-T, potência de 15 kVA, secundário 2F + N em 214/107V, impedância de 2,4% ;
- os sistema de aterramentos do lado da alta tensão - AT e do lado da baixa tensão – BT, foram construídos com hastes do tipo copperweld de 2,40 metros de comprimento por 16 milímetros de diâmetro, com o aterramento AT (Posto de Transformação) formado por 4 hastes, sendo três ligadas em triângulo espaçadas de 5,0 m e mais uma haste radial a 4,5 m, e o sistema de aterramento BT (carga), constituindo de quatro hastes em linhas espaçadas de 3,0 m, cravadas a 0,50 m da superfície do solo e interligadas com cabo de cobre nú de seção 25mm^2 ;

Na Figura 08 observa-se o transformador de distribuição (MRT) e seu diagrama de ligação, enquanto que na Figura 09, tem-se a estrutura MRT - com posto de transformação monofásica e respectivo secundário. A Figura 10 apresenta um croqui do traçado da rede dentro das dependências da Universidade.

Na Figura 11, observam-se as configurações dos sistemas de aterramento AT e BT, visto do lado do transformador e da carga, respectivamente, podendo ser interligados através do cabo neutro para realizar manobras de interligação e desligamento dos dois sistemas, nas medições dos potenciais de passo e toque.

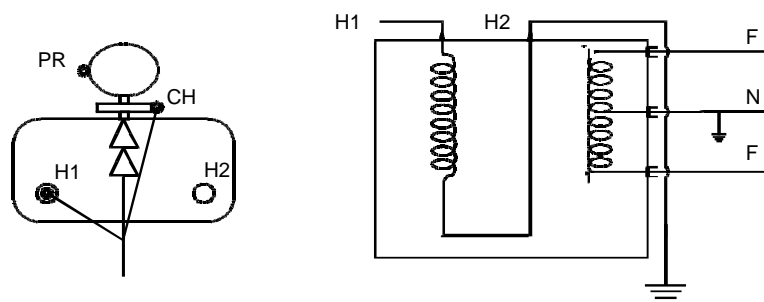


Figura 08 – Transformador de distribuição e seu diagrama de ligação.

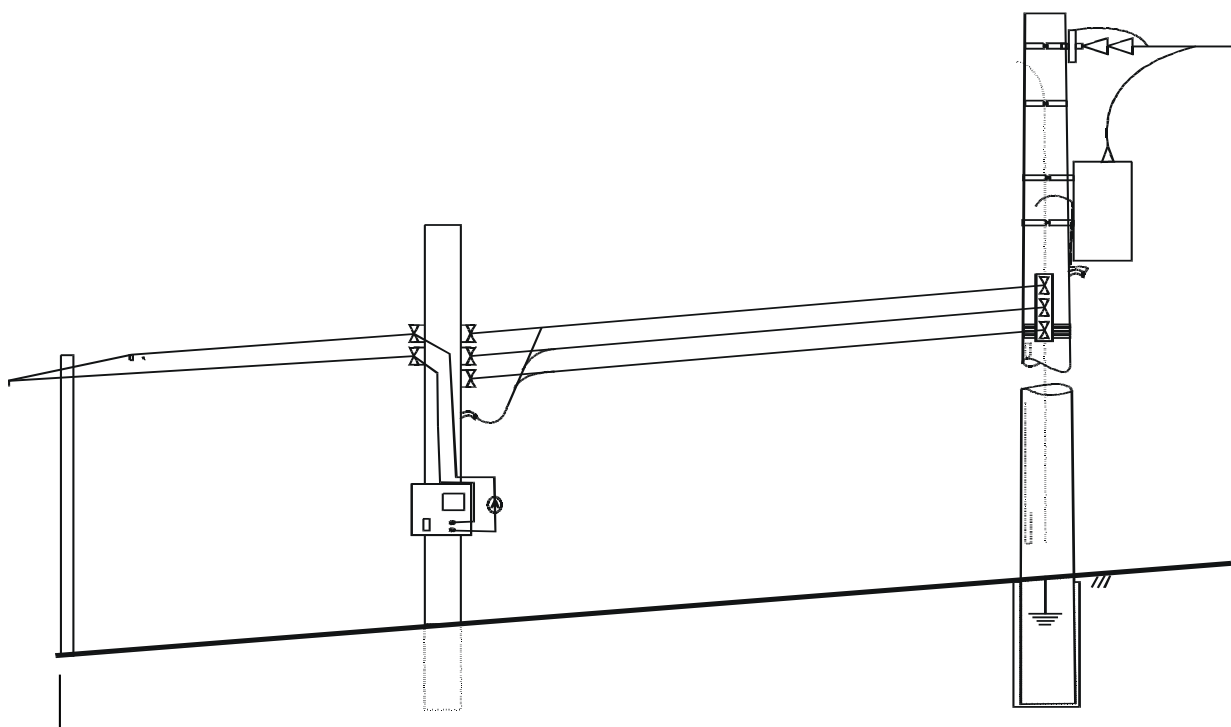


Figura 09 – Estrutura Posto de Transformação MRT e do ponto de Carga

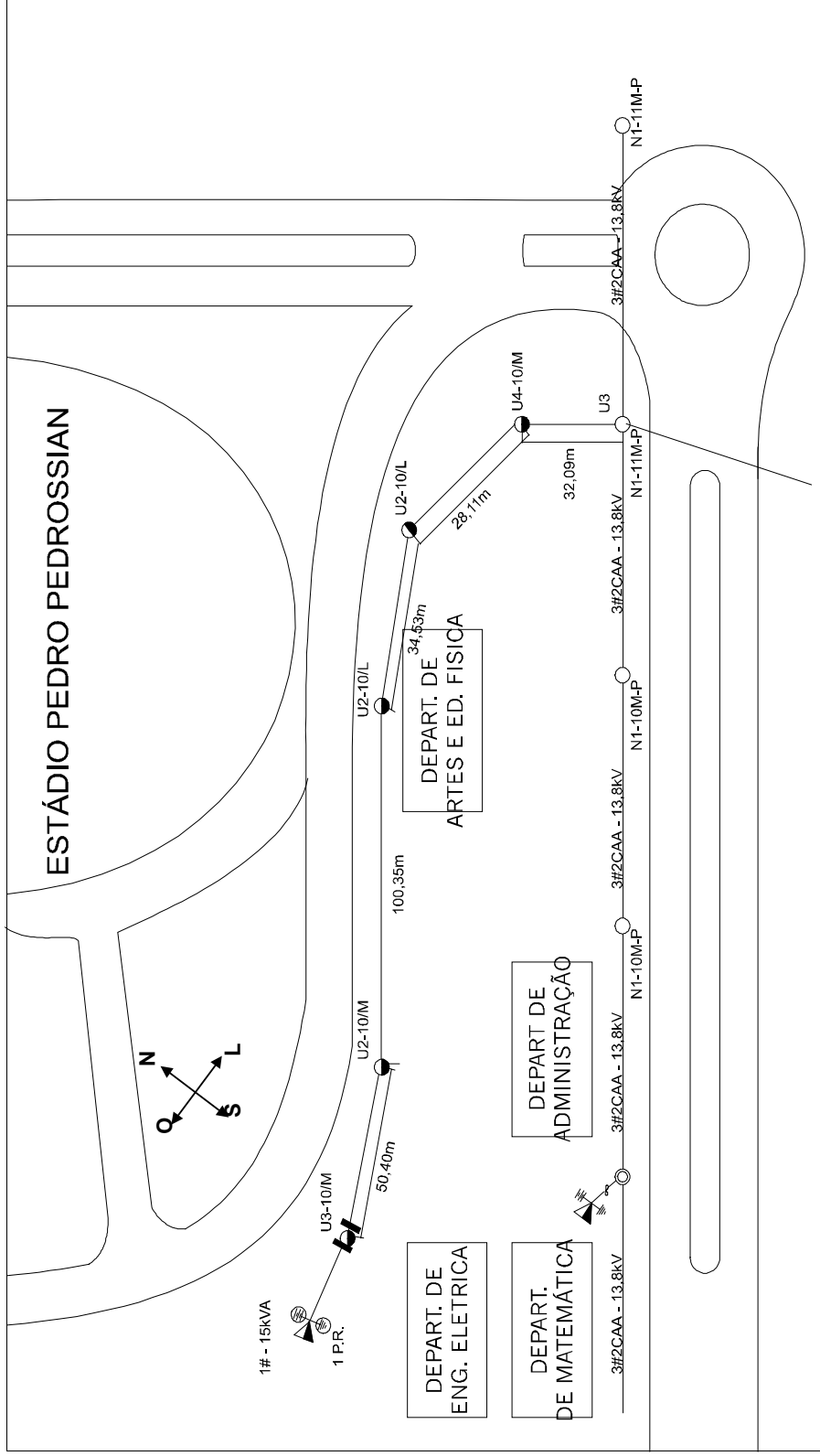


Figura 10 – Croqui do Sistema MRT instalado na UFMS

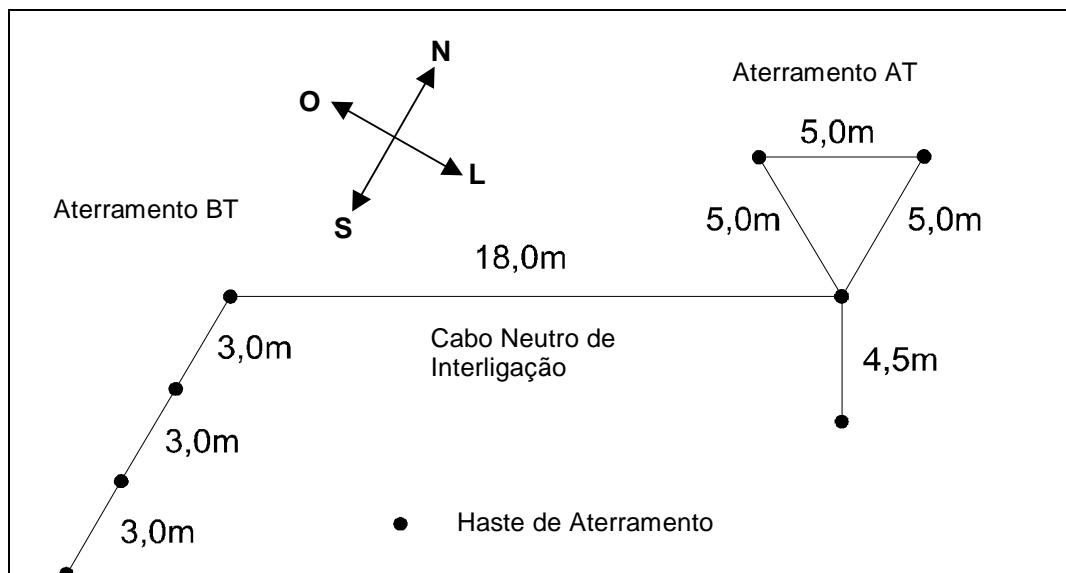


Figura 11 – Configuração dos Sistemas de Aterramento de Alta e Baixa Tensão.

4.2 Medição da Resistência de Aterramento

Para medição da resistência de aterramento utilizou-se de um Megger, marca Yokogawa nº 080/92, modelo 3244A, pertencente ao Departamento de Engenharia Elétrica da UFMS, o qual possui 4 terminais, sendo os terminais C1 e P1 jampeados e ligados ao sistema de aterramento a ser medido e os terminais C2 e P2 ligados aos eletrodos de corrente e potencial, respectivamente, conforme especificações contidas em Kindermann & Campagnolo (1995) e Gomes et al. (1990), aplicando o método da diferença de potencial (DDP) esquematizado na Figura 12.

Durando o período de 1996 a 1998, foram realizadas semanalmente duas medições da resistência no sistema de aterramento AT, considerando primeiramente este

interligado com o sistema de aterramento BT e a outra medição com o aterramento BT desligado, coincidindo com as medições de resistividade do solo e dos potenciais de superfície.

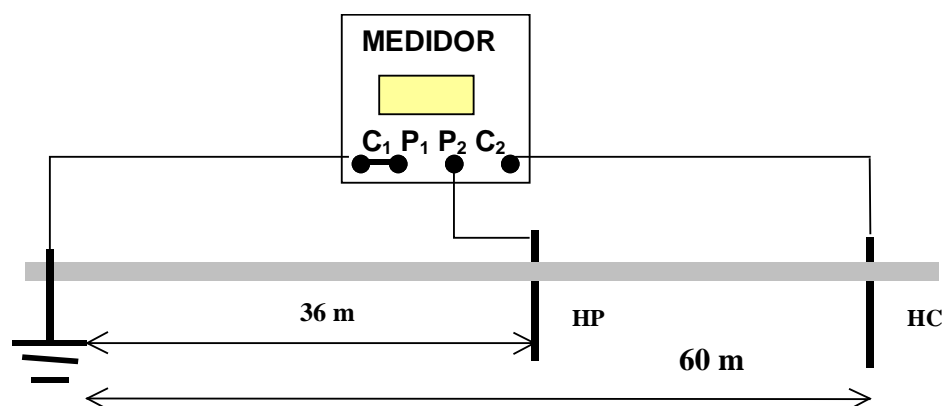


Figura 12 – Diagrama de medição da resistência de aterramento (R_{at}), pelo método da diferença de potencial (d.d.p.).

4.3 Determinação da Resistividade e da Estratificação do Solo

Na medição da resistência de terra, para determinação da resistividade do solo, utilizou-se do medidor de resistência de aterramento e resistividade do solo, marca Yokogawa nº 080/92, modelo 3244A.

Para esta medição adotou-se o método de Wenner, o qual consiste no uso de quatro eletrodos alinhados, devidamente cravados no solo, a uma profundidade (p), e equidistantes de uma distância (a). Os valores adotados para (a) foram (0,5; 1; 2;4; 8; 16 e 32) metros e para (p) 0,40 m, conforme recomendado por Leite (1995). A Figura 13 ilustra a forma de instalação do aparelho no solo, conforme método utilizado.

Tagg (1964) em suas investigações quanto a resistividade do solo, observou que quando quatro eletrodos estão espaçados em um alinhamento de igual intervalo, a efetiva profundidade de penetração da corrente elétrica no solo é igual a este intervalo. Desta forma a cada valor de (a) obtém-se um valor de resistência $R(a)$.

De posse dos valores medidos de $R(a)$ calcula-se a resistividade (ρ) através da Equações 03 e 04, em função do espaçamento (a) e da profundidade de cravação das hastes (p) , sendo que utiliza-se a Equação 03 para $(a / p) < 20$ e a Equação 04 para $(a / p) > 20$.

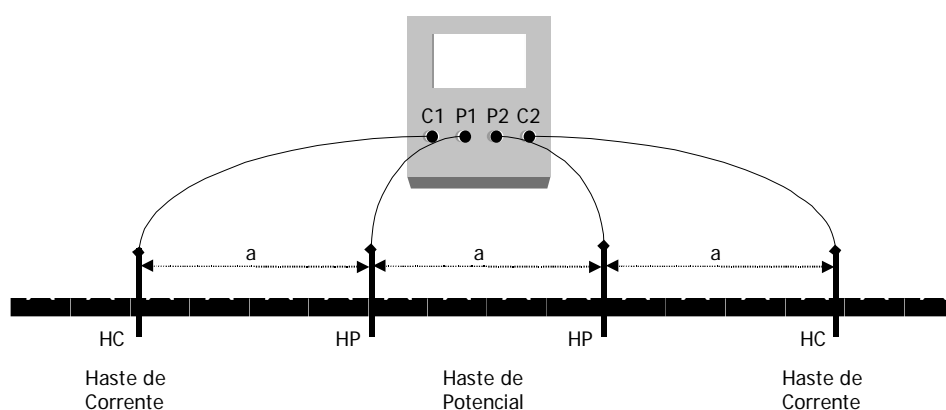


Figura 13 – Diagrama de instalação do medidor da resistividade do solo, pelo Método de Wenner.

As medições da resistividade foram realizadas simultaneamente às medições das resistências de aterramento, em área próxima ao local de instalação do posto de

transformação, em condições do solo com diferentes índices de precipitação, sendo os dados pluviométricos fornecidos pelo Departamento de Hidráulica e Transporte da UFMS.

Utilizou-se Software TecAt-IV Plus Pro Win 2.0-3, desenvolvido por Leite & Pereira Filho (1995) e editado pela Officina de Mydia, para o processamento dos valores da resistência de terra na determinação das resistividades superficiais, isto é, primeira camada estratificada, calculada pela Equação 03, valores estes utilizados no cálculo dos potenciais de superfície.

4.4 Medição dos Parâmetros Elétricos

Para as medições dos parâmetros elétricos envolvidos na determinação dos potenciais de superfície, foram utilizados um multímetro digital marca Minipa, modelo ET2070, display de cristal líquido, com tecla Data Hold, para as medições de tensão de passo (V_P) e tensão de toque (V_T), e um Multímetro do tipo alicate marca Engro, modelo AOV-1200, analógico 50/60Hz, para as medições da corrente de carga (I_C) no secundário do transformador, provocada por um fio de níquel-cromo com seção de $2,5 \text{ mm}^2$ e 19,5 m de comprimento.

4.5 Medição dos Potenciais de Superfície

A corrente elétrica dissipando-se pelo solo provoca uma distribuição de potencial, tanto na superfície como no interior do mesmo. A distribuição de potenciais na superfície do solo dá origem a grandezas denominadas de tensão de passo e tensão de

toque, que vem a ser a diferença de potencial entre dois pontos, seja na superfície do solo ou entre a superfície e um ponto energizado.

4.5.1 Tensão de Passo.

As tensões de passo ocorrem quando entre os membros de apoio (pés), aparecem diferenças de potencial. Isto pode acontecer quando os membros se encontrarem sobre linhas equipotenciais diferentes. Estas linhas equipotenciais se formam na superfície do solo quando do escoamento da corrente de curto-circuito. É claro que, se naquele breve espaço de tempo os dois pés estiverem sobre a mesma linha equipotencial ou, se um único pé estiver sendo usado como apoio, não haverá a tensão de passo.

Para se medir a tensão de passo (V_p) foi utilizado duas placas de alumínio medindo 20x10 cm, sendo colocadas sobre o solo espaçadas de 1 metro. Em cada placa aplicou-se uma massa de 40 kg, para simular o peso do corpo humano e foi inserida entre as placas uma resistência de 1000 Ω (valor este usado nos projetos de desenvolvimento dos sistemas de aterramento, relativos a segurança humana, recomendação da IEEE-80). Com o multímetro mediu-se a tensão de passo sobre a resistência.

Através das Figura 14 observam-se as instalações descritas e utilizadas na medição das tensões de passo, dentro das especificações de segurança regidas pelas normas vigentes.

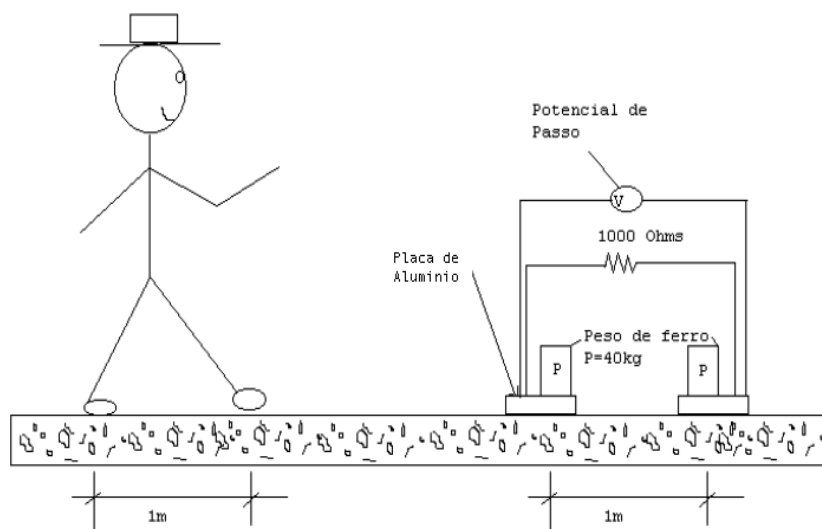


Figura 14 – Esquema de ligação para medir tensão de passo (V_P).

Foram realizadas medições semanais, no período de 1996 a 1998, num total de 48 medições, com 32 sobre a área de influência do aterramento AT e 16 na área de influência do aterramento BT, das 32 medições realizadas do lado da AT, 16 foram realizadas com os aterramentos AT e BT interligados e 16 medições com o aterramento da carga desligado. Nas 16 medições realizadas do lado da carga os aterramentos AT e BT estavam interligados.

No período 1996 a 1998 foram utilizados 143 dias com um total de 6.864 medições, sendo 2.288 medições do lado da carga e 4.576 no lado do transformador.

Tanto no primário como no secundário foram realizadas medições em 2 direções, formando um ângulo de 90° entre si, afastando-se 1 metro do poste, após cada medição, mantendo-se uma distância máxima de 5,0 metros em torno do poste, como observado na Figura. 17.

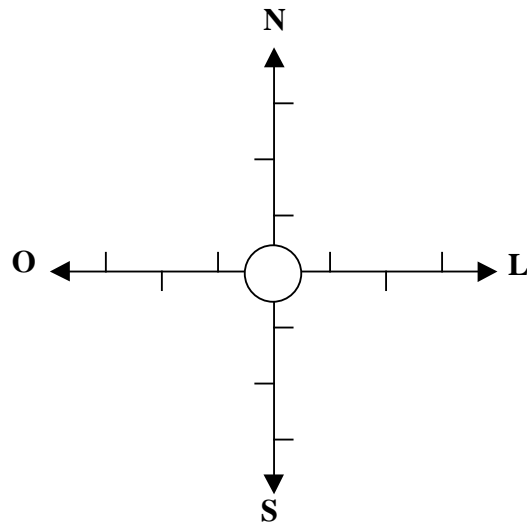


Figura 15 - Direção da medição da Tensão de passo em relação ao poste.

4.5.1.1 Determinação da Tensão de Passo Máxima

Conforme pesquisa realizada por Charles Francis Dalziel, como citado por Kindermann & Campagnolo (1995), 99,5% das pessoas com peso igual ou superior a 50 kg, pode suportar, sem a ocorrência de fibrilação ventricular, uma corrente elétrica calculada pela Equação (13), ocasionada por uma tensão de passo ou tensão de toque.

$$i = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad \text{sendo } 0,03 \text{ s} \leq t \leq 3 \text{ s} \quad (13)$$

onde:

i - corrente máxima de choque para não causar fibrilação ventricular (A)

t - duração do choque(s).

cabe salientar que: o tempo de choque é limitado pela atuação do sistema de proteção.

A definição clássica do potencial de passo para análise de segurança é a diferença de potencial que aparece entre dois pontos situados no chão e distanciados de 1m, devido à passagem de corrente de curto-circuito pela terra (I_F). Na Figura 16 temos esquema de ligação do potencial de passo, e a tensão de passo máxima expressa pela Equação 14.

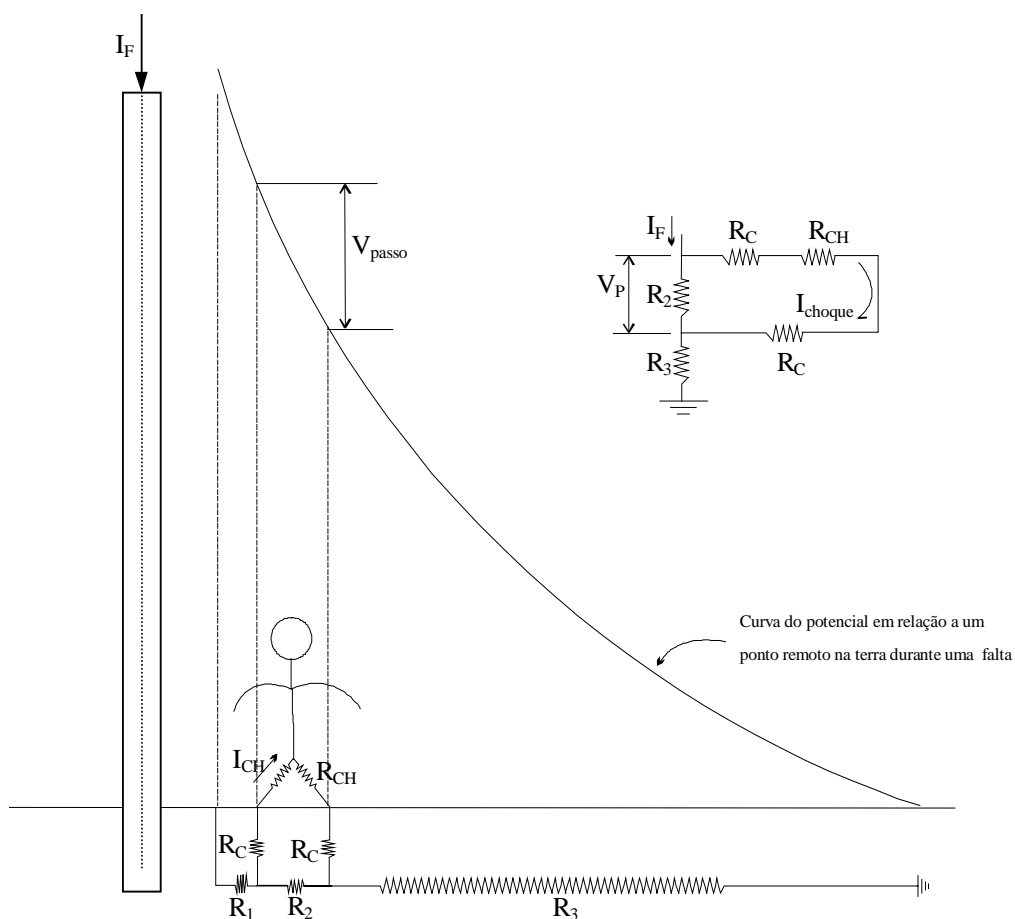


Figura 16 – Esquema elétrico da ocorrência da tensão de passo.

$$V_{pmax} = (R_{ch} + 2R_C)i \quad (14)$$

onde:

V_{pmax} - potencial de passo máximo, dado em (V).

R_{ch} - resistência do corpo humano 1000Ω .

R_C - resistência de contato, dada em (Ω).

i - corrente que percorre o corpo humano, dada em (A).

I_F - corrente de falta ou curto-circuito, dada em (A).

De acordo com a recomendação da IEEE - 80 tem-se a Equação 15.

$$R_C = 3 \rho_S \quad (15)$$

onde:

ρ_S = resistividade superficial do solo ($\Omega \times m$)

Substituindo-se o valor de R_{ch} e a Equação 15 na Equação 14 temos a Equação 16, para uma distância padrão de um metro.

$$V_{pmax} = (1000 + 6\rho_S)i \quad (16)$$

O potencial de passo máximo é limitado pela corrente máxima permissível que circula pelo corpo humano para não causar fibrilação ventricular, sendo expressa pela equação 16, e pela substituição da Equação 13 na 16, resultando a Equação 17.

$$V_{pmax} = (1000 + 6\rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (17)$$

O valor de tensão máxima, devido à corrente aplicada ao solo, para valores referidos à máxima corrente de curto-circuito fase-terra, pode-se considerar extrapolação linear, supondo que a terra mantenha as características resistivas invariáveis para altas correntes.

Para determinação da mínima corrente de curto-circuito (I_{CC}) que não causará fibrilação ventricular, deve-se extrair o maior valor da tensão de passo medida no dia, entre as 48 medições realizadas para as três situações estudadas. Com a corrente de carga e a tensão de passo máxima, através de uma equação linear, calculou-se o valor de I_{CC} , como pode-se visualizar na Figura 17.

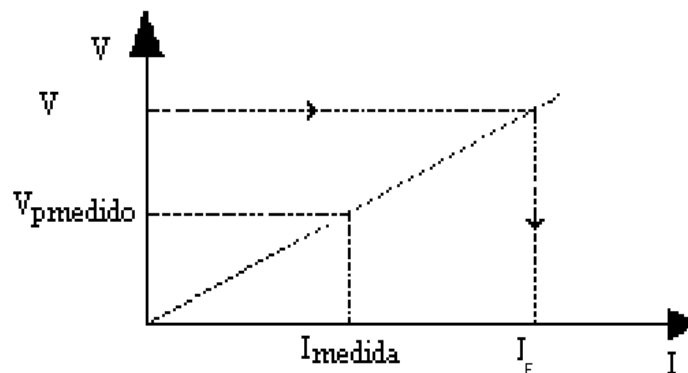


Figura 17 – Extrapolação da maior tensão de passo e da corrente de carga medida, com a tensão de passo máxima calculada, para determinar I_{CC} .

4.5.2 Tensão de Toque

A diferença de potencial entre o ponto da estrutura condutora de energia elétrica, situado ao alcance do toque de uma pessoa, e um ponto na superfície do solo a 1m da base da estrutura, define-se como a tensão de toque.

Para medir a tensão de toque, utilizou-se de uma placa de alumínio medindo 10 x 20 cm, terminais próprios para interligação de voltímetro e uma resistência de 1000Ω para simular a resistência do corpo humano, e sobre a placa foi colocado uma massa de 80kg para simular o peso do ser humano e a 1 metro de distância do pé da estrutura (primária e secundária), conforme Figura 18.

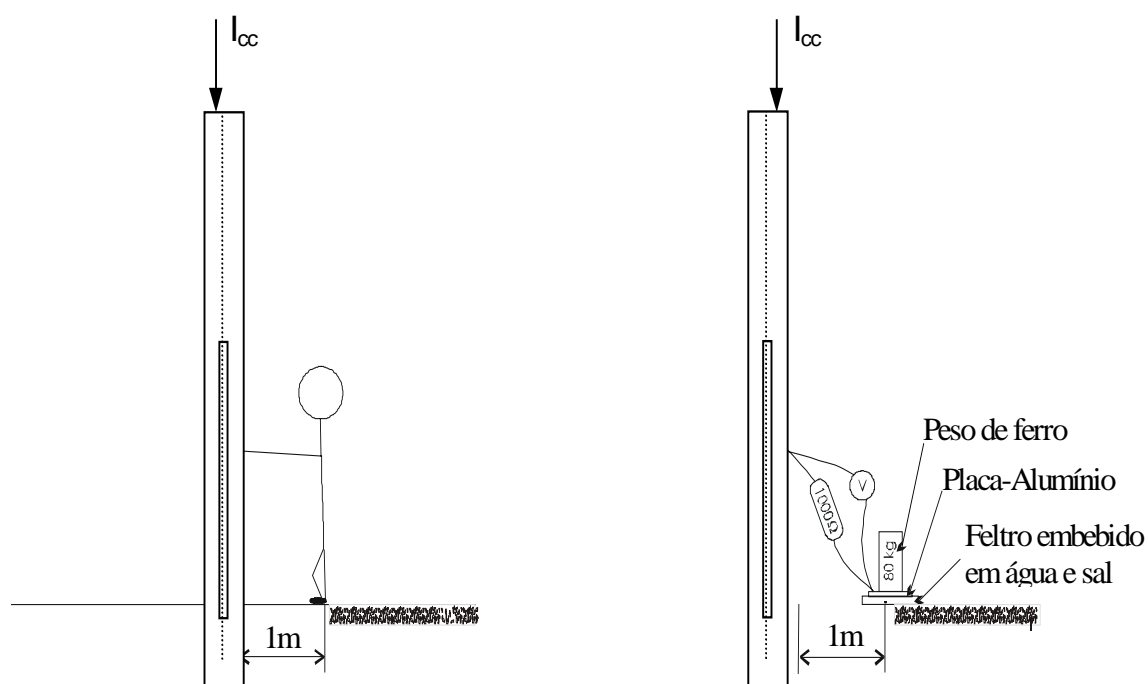


Figura 18 – Esquema de ligação para medir tensão de toque (V_T).

4.5.1.1 Determinação da Tensão de Toque Máxima

O potencial máximo gerado por um aterramento durante o período de defeito não deve produzir uma corrente de choque superior à limitada por Dalziel.

Pela esquema elétrico da Figura 19, pode-se obter a Equação 18 da tensão de toque máxima em relação à corrente elétrica de choque.

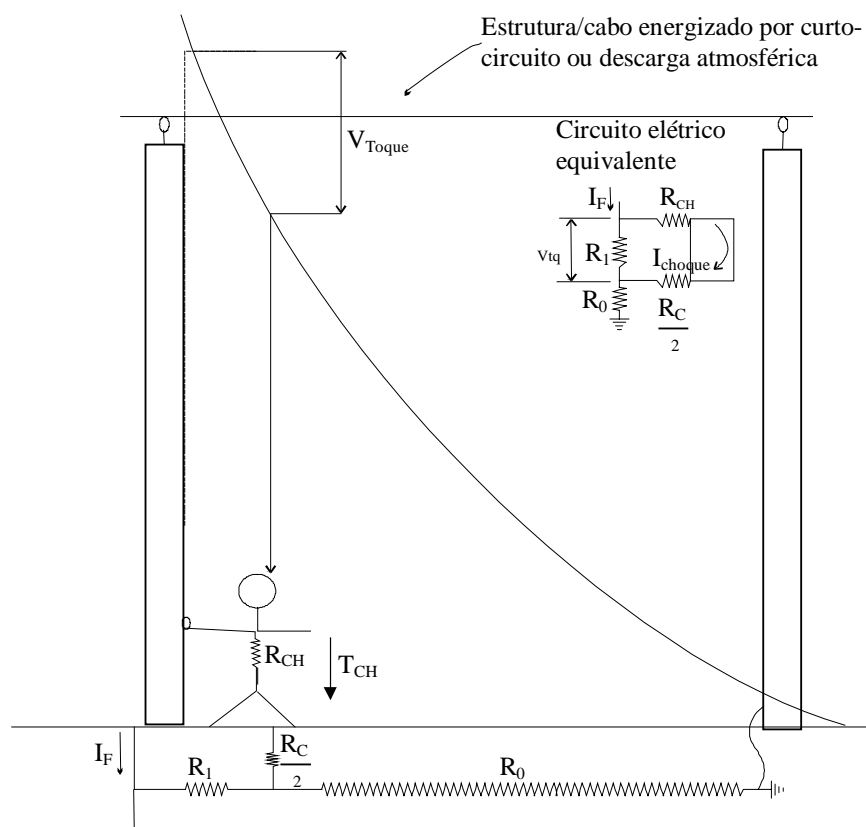


Figura 19 – Esquema elétrico da ocorrência da tensão de toque.

$$V_{toque} = \left(R_{ch} + \frac{R_c}{2} \right) I_{choque} \quad (18)$$

onde:

R_{ch} - resistência do corpo humano 1000Ω .

R_c - resistência de contato (Ω), considerada igual a $3\rho_s$ (resistividade superficial do solo), de acordo com a recomendação da IEEE-80.

I_{choque} - corrente de choque que percorre o corpo humano (A)

I_F - corrente de falta ou curto-circuito (A).

Substituindo R_{ch} na Equação (18) tem-se a equação (19).

$$V_{toque} = (1000 + 1,5\rho_s) I_{choque} \quad (19)$$

A tensão de toque máxima permissível entre a mão e o pé, para não causar fibrilação ventricular, é a produzida pela corrente limite de Dalziel. Substituindo a Equação 13 na equação na Equação 19, obtendo-se a Equação 20.

$$V_{toque\ máximo} = (1000 + 1,5\rho_s) \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (20)$$

O valor de tensão de toque máxima, devido à corrente aplicada ao solo, para valores referidos à máxima corrente de curto-circuito fase-terra, pode-se considerar como

uma equação linear, supondo que a terra mantenha as características resistivas invariáveis para altas correntes.

Para determinação da mínima corrente de curto-circuito (I_{CC}) que não causará fibrilação ventricular, deve-se extrair o maior valor da tensão de toque medida no dia, entre as medições realizadas nas estruturas do lado da alta e da baixa tensão. Com a corrente de carga e a tensão de toque máxima, através de uma Equação Linear, calculou-se o valor de I_{CC} , como pode-se visualizar na Figura 20.

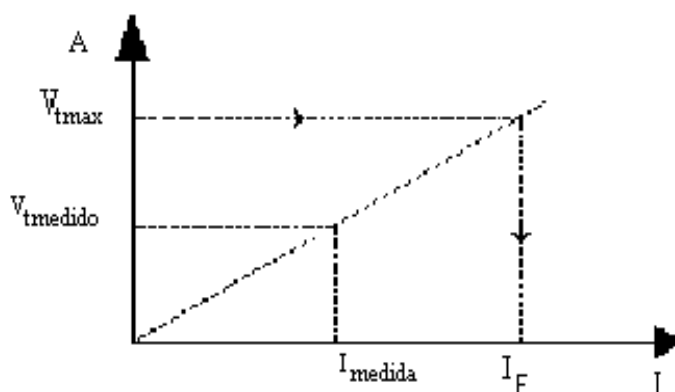


Figura 20 – Extrapolação da maior tensão de toque e da corrente de carga medida, com a tensão de toque máxima calculada, para determinar I_{CC} .

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise dos dados da tensão de passo

Nos Quadros de 06 a 08, estão apresentados os maiores valores diários medidos para a tensão de passo $V_{p(med)}$, considerando os sistemas de aterramento AT e BT interligados, tanto do lado do posto de transformação como do lado da carga, e para uma segunda medição do lado do posto de transformação com os sistemas de aterramento desconectados.

Para selecionar estes valores foi utilizada uma programação de Macro na Planilha do Excel sobre um banco de dados gerado pelas medições diárias, envolvendo a resistividade do solo R_{Sup} , a resistência de aterramento R_{At} e o sentido que ocorreram estes máximos valores, referente ao ano de 1996, da mesma maneira, os Quadros de 10 a 12, representam os valores do ano de 1997 e os Quadros de 14 a 16, o ano de 1998.

Com valores da resistividade do solo, foram calculados os máximos valores da tensão de passo $V_{p(calc)}$, e os valores mínimos da corrente de curto-circuito $I_{cc(min)}$, capaz de provocar fibrilhação, em função da corrente de carga I_{carga} e da tensão de passo medida $V_{p(med)}$.

QUADRO 06 – Parâmetros elétricos medidos e calculados, para análise da tensão de passo, do lado do posto de transformação, com os sistemas de aterramento AT e BT interligados. (1996)

Data (d/m/a)	V _p (med) (mV)	I _{carga} (Amp.)	V _p (calc) (Volts)	I _{cc} (min) (kA)	ρ _S (Ohm.m)	R _{At} (Ohm)	Sentido
07/03/96	200	50	67,05	20,93	*	*	Sul
12/03/96	290	29	319,70	31,82	628	85	Leste
21/03/96	269	18	433,40	29,30	910,6	72	Sul
26/03/96	*	*	382,87	*	785	38	Norte
02/04/96	10,9	25	446,03	1018,05	942	44	Norte
09/04/96	1,4	18	641,84	8210,58	1428,7	50	Leste
19/04/96	15,4	24	389,18	603,64	800,7	43	Leste
23/04/96	300	13	509,19	21,96	1099	48	Sul
02/05/96	2,9	30	547,09	5631,48	1193,2	60	Sul
07/05/96	2,8	20	67,05	496,09	0	59	Norte
14/05/96	201	18	370,23	33,00	753,6	120	Oeste
21/05/96	8,3	20	281,81	676,02	533,8	81	Oeste
04/06/96	198	13	372,76	24,36	759,88	52	Sul
11/06/96	54	19	268,54	97,69	500,83	58	Sul
18/06/96	278	16	572,36	32,78	1256	63	Leste
25/06/96	344	23	445,78	29,66	941,372	68	Leste
02/07/96	52	12	458,66	111,78	973,4	76	Sul
09/07/96	143	20	427,08	59,44	894,9	76	Sul
16/07/96	39	16	496,56	225,88	1067,6	85	Sul
23/07/96	42	12	603,94	171,69	1334,5	95	Leste
30/07/96	40	14	566,04	197,13	1240,3	95	Leste
06/08/96	19	14	648,15	475,18	1444,4	100	Leste
13/08/96	39	14	1481,90	529,15	3516,8	100	Leste
20/08/96	12	15	1759,82	2188,06	4207,6	112	Leste
27/08/96	5	14	2340,92	6519,41	5652	117	Leste
03/09/96	20	18	1721,92	1541,48	4113,4	106	Leste
10/09/96	277	10	362,65	13,03	734,76	54	Sul
18/09/96	721	16	382,87	8,46	785	46	Sul
24/09/96	71	12	521,83	87,76	1130,4	52	Sul
01/10/96	130	20	382,87	58,62	785	60	Sul
08/10/96	162	14	291,91	25,11	558,92	48	Sul
14/10/96	367	18	363,92	17,77	737,9	98	Sul
22/10/96	348	14	281,81	11,29	533,8	46	Sul
29/10/96	477	13	279,28	7,58	527,52	*	Sul
05/11/96	357	8	281,81	6,64	533,8	44	Leste
12/11/96	387	14	250,22	11,07	455,3	42	Sul
19/11/96	183	13	290,65	20,55	555,78	50	Sul
26/11/96	177	28	350,02	36,13	703,36	54	Sul
10/12/96	737	16	342,44	7,40	684,52	53	Sul
17/12/96	73	15	420,76	86,04	879,2	64	Oeste
24/12/96	67	14	240,12	49,96	430,18	51	Sul
31/12/96	495	17	288,12	9,85	549,5	59	Oeste

* Valores não medidos

QUADRO 07 – Parâmetros elétricos medidos e calculados, para análise da tensão de passo, do lado da carga, com os sistemas de aterramento AT e BT interligados. (1996)

Data (d/m/a)	V_p (med) (mV)	I_{carga} (Amp.)	V_p (calc) (Volts)	$I_{cc(min)}$ (kA)	ρ_S (Ohm.m)	R_{At} (Ohm)	Sentido
07/03/96	76,0	70	67,05	61,69	0,0	*	Norte
12/03/96	670,0	38	319,70	18,05	628,0	85	Norte
21/03/96	51,0	22	433,40	186,05	910,6	72	Norte
26/03/96	*	*	382,87	*	785,0	38	Sul
02/04/96	2,9	26	446,03	3979,53	942,0	44	Norte
09/04/96	4,1	22	641,84	3426,64	1428,7	50	Norte
19/04/96	1,7	40	389,18	9113,78	800,7	43	Leste
23/04/96	2,0	19	509,19	4813,52	1099,0	48	Sul
02/05/96	7,2	42	547,09	3175,53	1193,2	60	Norte
07/05/96	5,0	24	67,05	321,47	0,0	59	Norte
14/05/96	23,9	23	370,23	354,61	753,6	120	Leste
21/05/96	12,9	34	281,81	739,43	533,8	81	Norte
04/06/96	256,0	14	372,76	20,29	759,9	52	Leste
11/06/96	270,0	29	268,54	28,72	500,8	58	Leste
18/06/96	867,0	27	572,36	17,74	1256,0	63	Leste
25/06/96	513,0	27	445,78	23,35	941,4	68	Leste
02/07/96	152,0	18	458,66	54,05	973,4	76	Leste
09/07/96	182,0	16	427,08	37,36	894,9	76	Oeste
16/07/96	102,0	20	496,56	96,89	1067,6	85	Oeste
23/07/96	140,0	16	603,94	68,68	1334,5	95	Leste
30/07/96	91,0	21	566,04	129,97	1240,3	95	Leste
06/08/96	37,0	17	648,15	296,30	1444,4	100	Leste
13/08/96	117,0	20	1481,90	251,98	3516,8	100	Leste
20/08/96	46,0	16	1759,82	608,85	4207,6	112	Sul
27/08/96	50,0	18	2340,92	838,21	5652,0	117	Leste
03/09/96	150,0	32	1721,92	365,39	4113,4	106	Leste
10/09/96	776,0	26	362,65	12,09	734,8	54	Norte
18/09/96	776,0	16	382,87	10,83	785,0	46	Leste
24/09/96	220,0	22	521,83	51,92	1130,4	52	Leste
01/10/96	146,0	22	382,87	57,42	785,0	60	Leste
08/10/96	247,0	15	291,91	17,65	558,9	48	Leste
14/10/96	506,0	23	363,92	16,46	737,9	98	Leste
22/10/96	389,0	19	281,81	13,70	533,8	46	Leste
29/10/96	710,0	18	279,28	7,05	527,5	*	Leste
05/11/96	645,0	19	281,81	8,26	533,8	44	Leste
12/11/96	573,0	14	250,22	7,00	455,3	42	Norte
19/11/96	325,0	16	290,65	14,24	555,8	50	Oeste
26/11/96	227,0	14	350,02	21,49	703,4	54	Leste
10/12/96	967,0	23	342,44	8,11	684,5	53	Leste
17/12/96	171,0	17	420,76	41,63	879,2	64	Oeste
24/12/96	134,0	17	240,12	30,33	430,2	51	Leste
31/12/96	561,0	18	288,12	9,20	549,5	59	Leste

* Valores não medidos

QUADRO 08 – Parâmetros elétricos medidos e calculados, para análise da tensão de passo, do lado do posto de transformação, com os sistemas de aterramento AT e BT desconectados. (1996)

Data (d/m/a)	V _p (med) (mV)	I _{carga} (Amp.)	V _p (calc) (Volts)	I _{cc(min)} (kA)	ρ _S (Ohm.m)	R _{At} (Ohm)	Sentido
07/03/96	209,0	92	67,05	29,48	0,0	*	Sul
12/03/96	10,1	46	319,70	1446,54	628,0	85	Leste
21/03/96	270,0	21	433,40	33,55	910,6	106	Oeste
26/03/96	*	*	382,87	*	785,0	72	Sul
02/04/96	4,3	29	446,03	3139,57	942,0	82	Sul
09/04/96	3,7	24	641,84	4142,28	1428,7	95	Oeste
19/04/96	2,3	32	389,18	5389,02	800,7	78	Sul
23/04/96	1,4	17	509,19	6152,62	1099,0	80	Oeste
02/05/96	5,0	36	547,09	3919,51	1193,2	111	Sul
07/05/96	4,5	23	67,05	342,30	0,0	110	Oeste
14/05/96	12,3	20	370,23	599,17	753,6	120	Sul
21/05/96	8,3	20	281,81	676,02	533,8	74	Oeste
04/06/96	374,0	13	372,76	12,90	759,9	95	Sul
11/06/96	159,0	27	268,54	45,40	500,8	108	Oeste
18/06/96	648,0	18	572,36	15,82	1256,0	119	Leste
25/06/96	629,0	20	445,78	14,11	941,4	128	Leste
02/07/96	114,0	14	458,66	56,05	973,4	137	Sul
09/07/96	208,0	17	427,08	34,74	894,9	144	Sul
16/07/96	68,0	18	496,56	132,75	1067,6	160	Leste
23/07/96	84,0	14	603,94	100,15	1334,5	178	Leste
30/07/96	281,0	17	566,04	34,07	1240,3	80	Leste
06/08/96	216,0	13	648,15	38,81	1444,4	193	Sul
13/08/96	133,0	16	1481,90	177,33	3516,8	197	Sul
20/08/96	35,0	15	1759,82	750,19	4207,6	215	Sul
27/08/96	65,0	16	2340,92	573,13	5652,0	226	Leste
03/09/96	82,0	22	1721,92	459,52	4113,4	217	Leste
10/09/96	1100,0	16	362,65	5,25	734,8	100	Sul
18/09/96	1215,0	17	382,87	5,33	785,0	100	Sul
24/09/96	188,0	16	521,83	45,40	1130,4	113	Sul
01/10/96	250,0	20	382,87	30,48	785,0	112	Sul
08/10/96	417,0	16	291,91	11,15	558,9	90	Sul
14/10/96	627,0	25	363,92	14,44	737,9	89	Oeste
22/10/96	627,0	20	281,81	8,95	533,8	80	Sul
29/10/96	952,0	12	279,28	3,50	527,5	*	Sul
05/11/96	712,0	15	281,81	6,20	533,8	84	Leste
12/11/96	868,0	16	250,22	4,59	455,3	77	Oeste
19/11/96	479,0	14	290,65	8,46	555,8	94	Leste
26/11/96	183,0	14	350,02	29,92	703,4	104	Sul
10/12/96	1717,0	20	342,44	4,02	684,5	103	Sul
17/12/96	244,0	21	420,76	36,04	879,2	121	Oeste
24/12/96	144,0	16	240,12	26,57	430,2	96	Sul
31/12/96	1103,0	17	288,12	4,42	549,5	108	Oeste

* Valores não medidos

QUADRO 09 – Menores valores de corrente de curto-circuito para provocar fibrilhação ventricular, indicando o ponto de ocorrência e as condições dos aterramentos. (1996)

Data d/m/a	Icc (mínimo) (kA)	Sentido	Local	Condições dos Aterramentos	Distância (m)
07/03/96	20,93	Sul	Lado do Transformador	Interligados	3
12/03/96	18,05	Norte	Lado da Carga	Interligados	2
21/03/96	29,30	Sul	Lado do Transformador	Interligados	1
26/03/96	*	*	*	*	*
02/04/96	1018,05	Norte	Lado do Transformador	Interligados	4
09/04/96	3426,64	Norte	Lado da Carga	Interligados	1
19/04/96	603,64	Leste	Lado do Transformador	Interligados	4
23/04/96	21,96	Sul	Lado do Transformador	Interligados	4
02/05/96	3175,53	Norte	Lado da Carga	Interligados	2
07/05/96	321,47	Norte	Lado da Carga	Interligados	1
14/05/96	33,00	Oeste	Lado do Transformador	Interligados	2
21/05/96	676,02	Oeste	Lado do Transformador	Interligados	2
04/06/96	12,90	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	4
11/06/96	28,72	Leste	Lado da Carga	Interligados	1
18/06/96	15,82	Leste	Lado do Transformador	Desconectados	2
25/06/96	14,11	Leste	Lado do Transformador	Desconectados	2
02/07/96	54,05	Leste	Lado da Carga	Interligados	1
09/07/96	34,74	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
16/07/96	96,89	Oeste	Lado da Carga	Interligados	2
23/07/96	68,68	Leste	Lado da Carga	Interligados	1
30/07/96	34,07	Leste	Lado do Transformador	Desconectados	3
06/08/96	38,81	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	2
13/08/96	177,33	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	4
20/08/96	608,85	Sul	Lado da Carga	Interligados	1
27/08/96	459,52	Leste	Lado do Transformador	Desconectados	3
03/09/96	365,39	Leste	Lado da Carga	Interligados	1
10/09/96	5,25	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	4
18/09/96	5,33	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
24/09/96	45,40	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	4
01/10/96	30,48	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
08/10/96	11,15	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
14/10/96	14,44	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	2
22/10/96	8,95	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
29/10/96	3,50	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
05/11/96	6,20	Leste	Lado do Transformador	Desconectados	4
12/11/96	4,59	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	2
19/11/96	8,46	Leste	Lado do Transformador	Desconectados	3
26/11/96	21,49	Leste	Lado da Carga	Interligados	1
10/12/96	4,02	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
17/12/96	36,04	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	1
24/12/96	26,57	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
31/12/96	4,42	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	1

* Valores não medidos

Para melhor diagnosticar, o local de ocorrência dos menores valores da corrente de curto-circuito, e das condições dos sistemas de aterramento, foram elaborados os Quadros 09, 13 e 17, para os anos de 1996, 1997 e 1998, respectivamente.

Analisando o Quadro 09, nota-se que a menor corrente de curto-circuito calculada para este período foi de 3,50 kA, ocorrida a três metros, no sentido Sul do lado do posto de transformação, na condição dos sistemas de aterramento AT e BT desconectado.

Na condição dos sistemas de aterramento AT e BT interligados, Quadro 06, pode-se observar as seguintes ocorrências dos menores valores da corrente de curto-circuito:

- No posto de transformação apenas 7 ocorrências de corrente de curto circuito mínimo foram encontradas, representando 17% do total das medições, sendo 3 no sentido Sul, 2 no sentido Oeste, 1 no Norte e 1 no sentido Leste.
- Na carga apenas 11 ocorrências de corrente de curto circuito mínimo, representando 26% do total, sendo 5 no sentido Leste, 4 no sentido Norte, 1 no sentido Oeste e 1 no sentido Sul, quase em sua totalidade a um metro da carga.

No posto de transformação, na condição dos sistemas de aterramento AT e BT desconectados, Quadro 08, pode-se observar 23 ocorrências dos menores valores da corrente de curto-circuito, representando 55%, sendo que:

- 13 ocorrências foram na direção do Sul, 4 na direção Oeste e 6 na direção Leste, representando 57%, 17% e 26%, respectivamente. Existe portanto, uma

predominância da direção Sul, coincidindo com o sentido em que encontra-se a Subestação de origem do alimentador que deriva o sistema MRT em estudo.

- 11 ocorrências foram a três metros do posto de transformação, representando 48% do total. Destas, 8 foram no sentido Sul, representando 73% das ocorrências, confirmando que este local é onde as pessoas e animais estão mais vulneráveis ao choque elétrico.

Para melhor analisar os dados de corrente de curto-circuito para as condições de sistemas de aterramento AT e BT, interligados ou desconectados, em função da época do ano, da resistividade superficial, a resistência de aterramento e o índice pluviométrico, foram elaborados os gráficos das Figuras 21 a 27, para o ano de 1996, as Figuras 28 a 34 para o ano de 1997 e as Figuras de 35 a 41 para o ano de 1998.

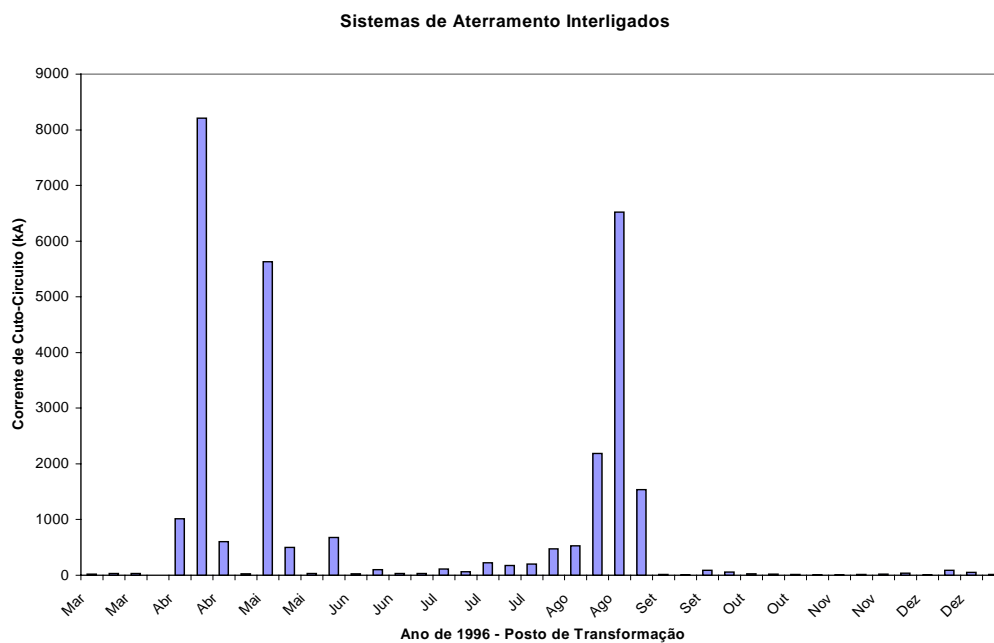


Figura 21 – Mínimos valores da corrente de curto-circuito calculados para o lado do posto de transformação, com os sistemas de aterramento interligados. (1996)

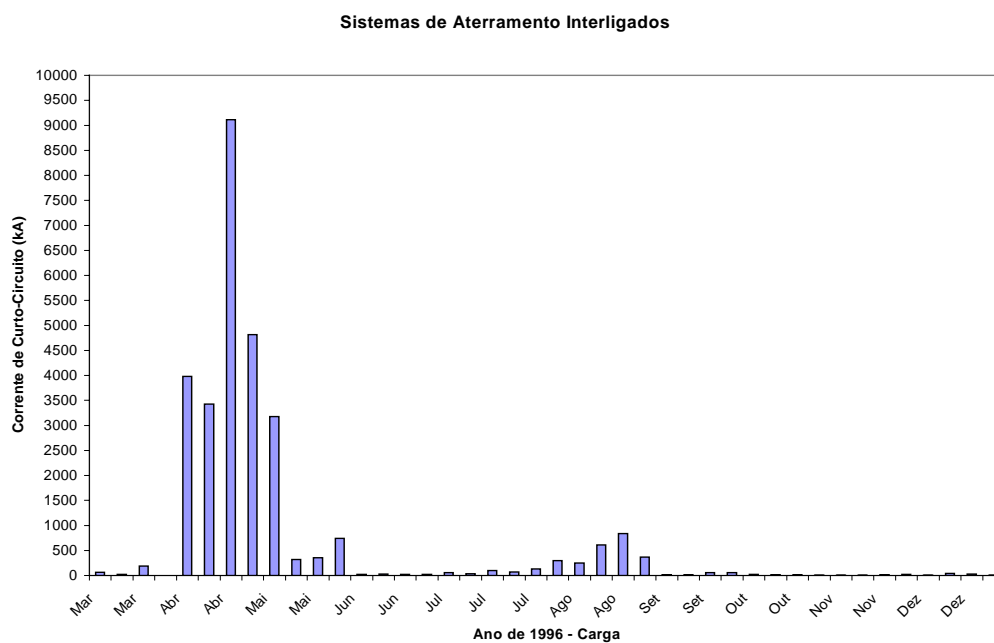


Figura 22 – Mínimos valores da corrente de curto-circuito calculados para o lado da carga com os sistemas de aterramento interligados. (1996)

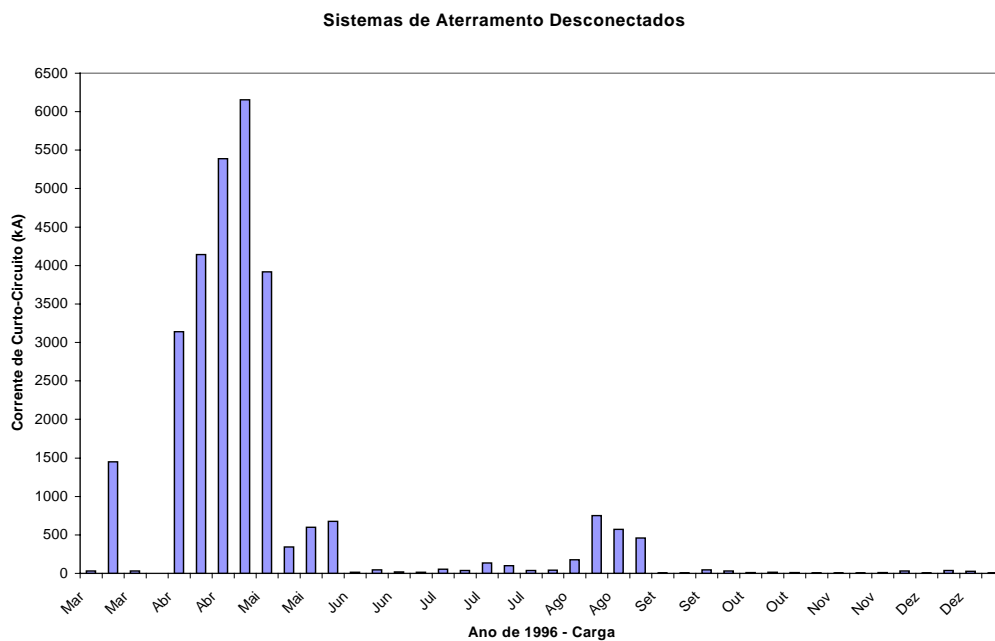


Figura 23 – Mínimos valores da corrente de curto-circuito calculados para o posto de transformação, com os sistemas de aterramento desconectados. (1996)

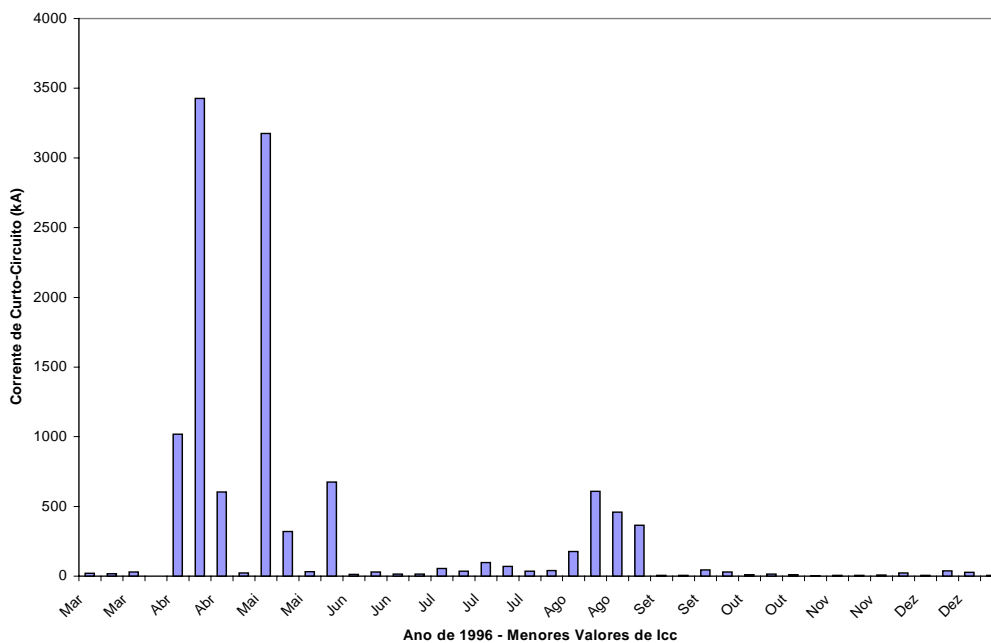


Figura 24 – Mínimos valores da corrente de curto-circuito, considerando as situações dos sistemas de aterramento interligados e desconectados. (1996)

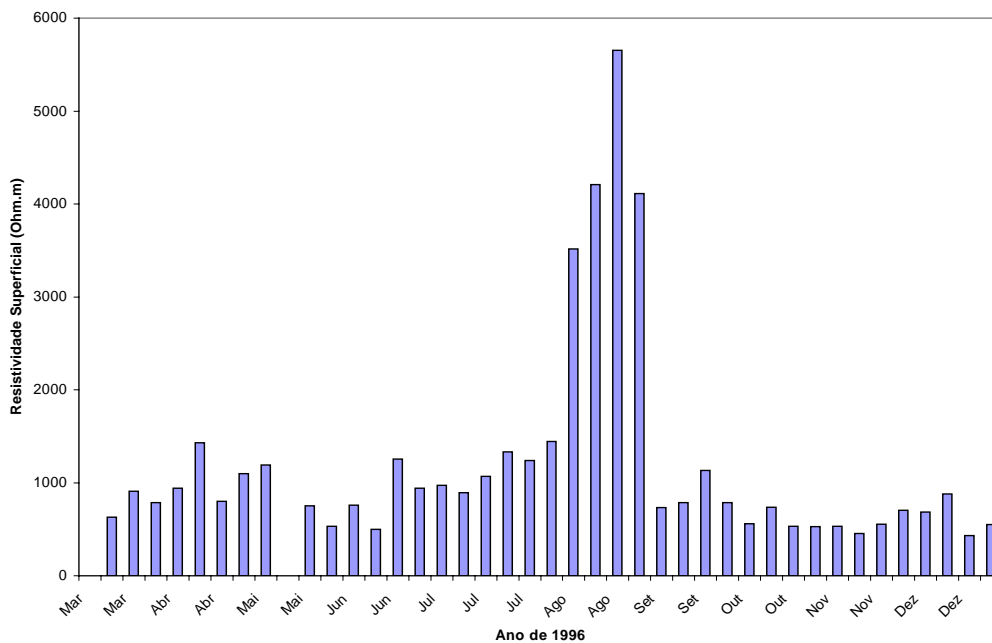


Figura 25 – Resistividade superficial do solo. (1996)

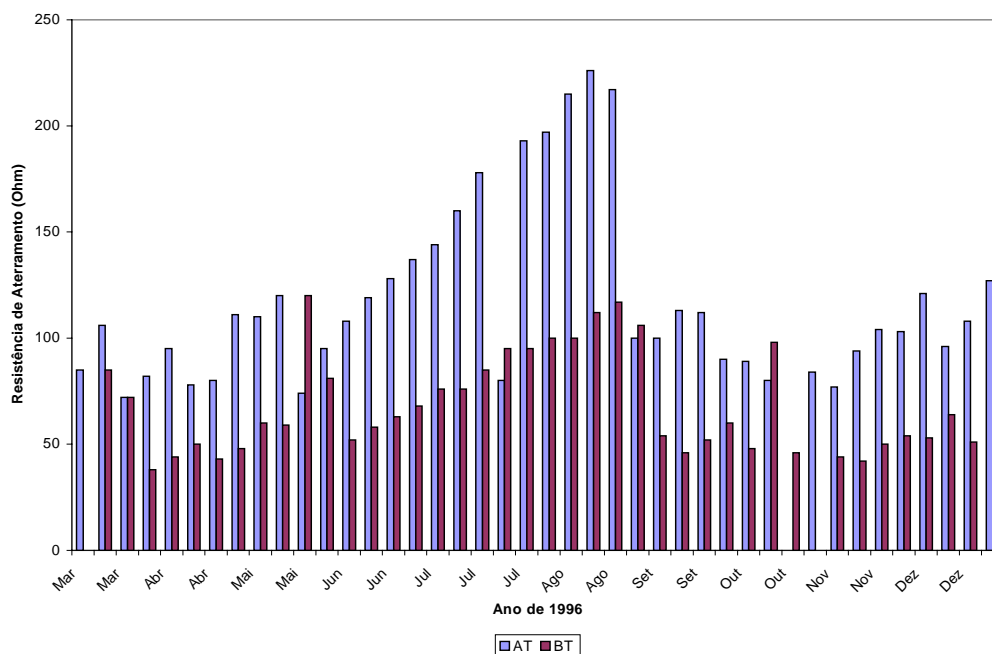


Figura 26 – Resistência de aterramento do lado AT com sistemas desconectados e do lado BT com os sistemas interligados.

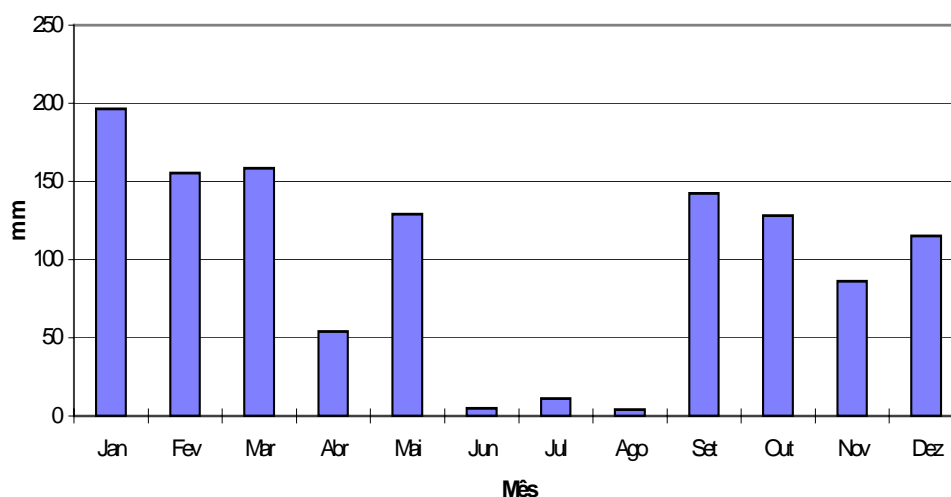


Figura 27 – Precipitação pluviométrica durante o ano de 1996.

Pode-se notar entre os gráficos das Figuras 23 a 29, que há uma coincidência entre os menores valores da corrente de curto-circuito, que provocariam fibrilação ventricular com os maiores valores da resistividade superficial e os menores índices pluviométricos, indicando uma forte relação entre estes fatores.

Nesta primeira análise referente aos dados de 1996, nota-se que os maiores valores medidos da resistividade superficial, juntamente com o tipo de ligação dos sistemas de aterramento, isto é, sistemas interligados, trazem um maior nível de segurança para as pessoas que circulam próximo posto de transformação de um ramal MRT, onde se tem os menores valores da resistência de aterramento, os quais estão diretamente ligados à resistividade superficial, como pode-se notar na Figura 26.

QUADRO 10 – Parâmetros elétricos medidos e calculados, para análise da tensão de passo, do lado do posto de transformação, com os sistemas de aterramento AT e BT interligados. (1997)

Data (d/m/a)	V_p (med) (mV)	I_{carga} (Amp.)	V_p (calc) (Volts)	$I_{cc(min)}$ (kA)	ρ_S (Ohm.m)	R_{At} (Ohm)	Sentido
07/01/97	97,0	14	315,91	45,39	618,58	50	Leste
14/01/97	147,0	15	254,01	25,81	464,72	44	Sul
21/01/97	506,0	16	226,22	8,03	395,64	40	Sul
28/01/97	225,0	21	237,59	22,08	423,90	44	Leste
04/02/97	533,0	11	231,28	4,75	408,20	36	Sul
11/02/97	563,0	18	235,07	7,48	417,62	39	Sul
18/02/97	293,0	14	240,12	13,13	430,18	36	Sul
25/02/97	233,0	16	240,12	16,42	430,18	35	Sul
04/03/97	830,0	20	289,39	6,94	552,64	38	Sul
11/03/97	139,0	16	226,22	25,93	395,64	45	Sul
18/03/97	452,0	22	246,43	11,94	445,88	40	Sul
25/03/97	238,0	17	294,44	20,94	565,20	40	Sul
01/04/97	1365,0	14	307,07	3,51	596,60	47	Sul
08/04/97	58,0	14	284,33	68,32	540,08	45	Sul
15/04/97	745,0	19	323,49	8,21	637,42	51	Oeste
22/04/97	578,0	16	265,38	7,95	492,98	40	Oeste
29/04/97	269,0	18	283,07	18,86	536,94	47	Leste
06/05/97	229,0	18	313,39	24,52	612,30	53	Sul
13/05/97	98,0	18	446,03	81,53	942,00	57	Leste
20/05/97	307,0	18	284,33	16,60	540,08	50	Leste
27/05/97	259,0	18	270,44	18,71	505,54	40	Sul
03/06/97	216,0	18	265,38	22,02	492,98	47	Leste
10/06/97	27,0	18	274,23	182,01	514,96	30	Leste
17/06/97	629,0	18	251,49	7,17	458,44	30	Sul
24/06/97	69,0	18	218,64	56,80	376,80	73	Sul
01/07/97	194,0	14	251,49	18,07	458,44	75	Sul
08/07/97	268,0	14	270,44	14,06	505,54	85	Leste
15/07/97	370,0	14	379,08	14,28	775,58	96	Oeste
22/07/97	367,0	14	382,87	14,54	785,00	105	Leste
29/07/97	62,0	14	382,87	86,04	785,00	107	Leste
05/08/97	697,0	14	281,81	5,64	533,80	107	Sul
12/08/97	258,0	14	338,65	18,29	675,10	110	Sul
19/08/97	45,0	14	635,52	196,72	1413,00	121	Sul
26/08/97	45,0	15	749,21	248,46	1695,60	130	Sul
02/09/97	26,0	15	458,66	263,33	973,40	149	Leste
09/09/97	19,0	15	490,24	385,14	1051,90	182	Leste
16/09/97	15,0	14	951,33	883,31	2198,00	173	Oeste
23/09/97	58,0	15	408,13	105,05	847,80	150	Leste
30/09/97	186,0	15	302,02	24,25	584,04	119	Sul
07/10/97	815,0	15	357,60	6,55	722,20	122	Oeste
14/10/97	64,0	15	509,19	118,75	1099,00	154	Sul
21/10/97	765,0	15	344,97	6,73	690,80	117	Sul
28/10/97	92,0	15	288,12	46,77	549,50	87	Leste
04/11/97	571,0	15	276,75	7,24	521,24	93	Sul
11/11/97	161,0	14	304,54	26,36	590,32	87	Leste
18/11/97	735,0	15	254,65	5,17	466,29	78	Sul
25/11/97	656,0	15	293,18	6,67	562,06	85	Oeste
02/12/97	540,0	14	209,80	5,42	354,82	76	Oeste
09/12/97	290,0	16	213,59	11,74	364,24	66	Oeste
16/12/97	515,0	15	168,11	4,88	251,20	64	Sul
23/12/97	87,0	16	288,12	52,75	549,50	81	Sul
30/12/97	65,0	15	375,29	86,20	766,16	91	Oeste

QUADRO 11 – Parâmetros elétricos medidos e calculados, para análise da tensão de passo, do lado da carga, com os sistemas de aterramento AT e BT interligados. (1997)

Data (d/m/a)	V_p (med) (mV)	I_{carga} (Amp.)	V_p (calc) (Volts)	$I_{cc(min)}$ (kA)	ρ_S (Ohm.m)	R_{At} (Ohm)	Sentido
07/01/97	173,0	17,0	315,91	30,90	618,58	50	Oeste
14/01/97	247,0	19,0	254,01	19,45	464,72	44	Oeste
21/01/97	853,0	23,0	226,22	6,07	395,64	40	Leste
28/01/97	462,0	25,0	237,59	14,08	423,90	44	Norte
04/02/97	949,0	21,0	231,28	5,10	408,20	36	Leste
11/02/97	667,0	25,0	235,07	8,77	417,62	39	Leste
18/02/97	278,0	18,0	240,12	15,48	430,18	36	Oeste
25/02/97	248,0	18,0	240,12	17,35	430,18	35	Leste
04/03/97	1174,0	26,0	289,39	6,38	552,64	38	Norte
11/03/97	234,0	22,0	226,22	21,18	395,64	45	Leste
18/03/97	546,0	24,0	246,43	10,79	445,88	40	Oeste
25/03/97	289,0	23,0	294,44	23,33	565,20	40	Oeste
01/04/97	696,0	17,5	307,07	7,69	596,60	47	Leste
08/04/97	114,0	19,0	284,33	47,18	540,08	45	Norte
15/04/97	973,0	21,0	323,49	6,95	637,42	51	Leste
22/04/97	731,0	21,0	265,38	7,59	492,98	40	Leste
29/04/97	341,0	18,0	283,07	14,88	536,94	47	Oeste
06/05/97	261,0	18,0	313,39	21,51	612,30	53	Norte
13/05/97	352,0	19,0	446,03	23,96	942,00	57	Norte
20/05/97	309,0	18,0	284,33	16,49	540,08	50	Norte
27/05/97	381,0	18,0	270,44	12,72	505,54	40	Leste
03/06/97	307,0	18,0	265,38	15,49	492,98	47	Norte
10/06/97	8,0	18,0	274,23	614,27	514,96	30	Leste
17/06/97	1541,0	18,0	251,49	2,92	458,44	30	Oeste
24/06/97	78,0	18,0	218,64	50,25	376,80	73	Leste
01/07/97	321,0	14,0	251,49	10,92	458,44	75	Leste
08/07/97	297,0	14,0	270,44	12,69	505,54	85	Leste
15/07/97	112,0	14,0	379,08	47,16	775,58	96	Leste
22/07/97	523,0	14,0	382,87	10,20	785,00	105	Leste
29/07/97	215,0	14,0	382,87	24,81	785,00	107	Leste
05/08/97	768,0	14,0	281,81	5,11	533,80	107	Leste
12/08/97	362,0	14,0	338,65	13,04	675,10	110	Norte
19/08/97	68,0	15,8	635,52	146,92	1413,00	121	Norte
26/08/97	79,0	15,0	749,21	141,53	1695,60	130	Leste
02/09/97	62,0	15,0	458,66	110,43	973,40	149	Leste
09/09/97	50,0	15,0	490,24	146,35	1051,90	182	Leste
16/09/97	38,0	30,0	951,33	373,58	2198,00	173	Leste
23/09/97	105,0	15,0	408,13	58,03	847,80	150	Leste
30/09/97	226,0	15,0	302,02	19,95	584,04	119	Norte
07/10/97	851,0	15,0	357,60	6,27	722,20	122	Leste
14/10/97	99,0	15,0	509,19	76,77	1099,00	154	Leste
21/10/97	752,0	15,0	344,97	6,85	690,80	117	Leste
28/10/97	169,0	15,0	288,12	25,46	549,50	87	Leste
04/11/97	655,0	15,0	276,75	6,31	521,24	93	Leste
11/11/97	120,0	14,0	304,54	35,37	590,32	87	Leste
18/11/97	720,0	15,0	254,65	5,28	466,29	78	Leste
25/11/97	730,0	15,0	293,18	6,00	562,06	85	Leste
02/12/97	570,0	14,0	209,80	5,13	354,82	76	Leste
09/12/97	355,0	16,0	213,59	9,59	364,24	66	Leste
16/12/97	413,0	15,0	168,11	6,08	251,20	64	Leste
23/12/97	106,0	16,0	288,12	43,30	549,50	81	Oeste
30/12/97	82,0	15,0	375,29	68,33	766,16	91	Oeste

QUADRO 12 – Parâmetros elétricos medidos e calculados, para análise da tensão de passo, do lado do posto de transformação, com os sistemas de aterramento AT e BT desconectados. (1997)

Data (d/m/a)	V_p (med) (mV)	I_{carga} (Amp.)	V_p (calc) (Volts)	$I_{cc(min)}$ (kA)	ρ_s (Ohm.m)	R_{At} (Ohm)	Sentido
07/01/97	271	13	315,91	15,09	618,58	90	Oeste
14/01/97	343	12	254,01	8,90	464,72	79	Sul
21/01/97	1187	12	226,22	2,28	395,64	66	Sul
28/01/97	380	15	237,59	9,59	423,90	74	Leste
04/02/97	1442	15	231,28	2,42	408,20	62	Sul
11/02/97	987	13	235,07	3,08	417,62	64	Sul
18/02/97	720	12	240,12	3,98	430,18	65	Sul
25/02/97	438	18	240,12	9,83	430,18	61	Sul
04/03/97	1086	12	289,39	3,18	552,64	64	Sul
11/03/97	251	12	226,22	10,77	395,64	76	Sul
18/03/97	477	11	246,43	5,66	445,88	67	Sul
25/03/97	354	13	294,44	12,49	565,20	74	Sul
01/04/97	1690	19	307,07	3,44	596,60	83	Sul
08/04/97	170	21	284,33	34,97	540,08	77	Sul
15/04/97	1593	13	323,49	2,76	637,42	84	Sul
22/04/97	1298	20	265,38	4,07	492,98	67	Oeste
29/04/97	584	18	283,07	8,69	536,94	74	Oeste
06/05/97	580	18	313,39	9,68	612,30	90	Oeste
13/05/97	1037	18	446,03	7,70	942,00	96	Oeste
20/05/97	717	18	284,33	7,11	540,08	93	Leste
27/05/97	379	18	270,44	12,79	505,54	76	Leste
03/06/97	628	18	265,38	7,57	492,98	84	Sul
10/06/97	458	18	274,23	10,73	514,96	65	Leste
17/06/97	521	18	251,49	8,65	458,44	65	Leste
24/06/97	93	18	218,64	42,14	376,80	95	Leste
01/07/97	730	14	251,49	4,80	458,44	95	Sul
08/07/97	660	14	270,44	5,71	505,54	115	Sul
15/07/97	121	14	379,08	43,65	775,58	134	Sul
22/07/97	864	14	382,87	6,17	785,00	145	Sul
29/07/97	201	14	382,87	26,54	785,00	167	Leste
05/08/97	1465	14	281,81	2,68	533,80	110	Oeste
12/08/97	571	14	338,65	8,26	675,10	134	Leste
19/08/97	142	14	635,52	62,34	1413,00	162	Sul
26/08/97	106	15	749,21	105,48	1695,60	180	Sul
02/09/97	77	15	458,66	88,92	973,40	200	Sul
09/09/97	58	15	490,24	126,17	1051,90	230	Oeste
16/09/97	59	15	951,33	240,61	2198,00	245	Leste
23/09/97	100	15	408,13	60,93	847,80	175	Leste
30/09/97	268	15	302,02	16,83	584,04	135	Sul
07/10/97	1568	15	357,60	3,40	722,20	165	Sul
14/10/97	196	15	509,19	38,78	1099,00	210	Sul
21/10/97	1570	15	344,97	3,28	690,80	127	Oeste
28/10/97	226	15	288,12	19,04	549,50	112	Sul
04/11/97	1643	15	276,75	2,52	521,24	121	Sul
11/11/97	42	14	304,54	101,05	590,32	125	Sul
18/11/97	1560	15	254,65	2,44	466,29	100	Oeste
25/11/97	1839	15	293,18	2,38	562,06	110	Sul
02/12/97	1237	14	209,80	2,36	354,82	86	Sul
09/12/97	421	16	213,59	8,08	364,24	80	Oeste
16/12/97	787	15	168,11	3,19	251,20	80	Oeste
23/12/97	128	16	288,12	35,85	549,50	109	Oeste
30/12/97	151	15	375,29	37,10	766,16	123	Sul

QUADRO 13 – Menores valores de corrente de curto-circuito para provocar fibrilhação ventricular, indicando o ponto de ocorrência e as condições dos aterramentos. (1997)

Data D/m/a	I _{cc} (mínimo) (kA)	Sentido	Local	Condições dos Aterramentos	Distância (m)
07/01/97	15,09	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	2
14/01/97	8,90	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
21/01/97	2,28	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
28/01/97	9,59	Leste	Lado do Transformador	Desconectados	4
04/02/97	2,42	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
11/02/97	3,08	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
18/02/97	3,98	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
25/02/97	9,83	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
04/03/97	3,18	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
11/03/97	10,77	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	4
18/03/97	5,66	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
25/03/97	12,49	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	4
01/04/97	3,44	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
08/04/97	34,97	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
15/04/97	2,76	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
22/04/97	4,07	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	2
29/04/97	8,69	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	1
06/05/97	9,68	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	2
13/05/97	7,70	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	4
20/05/97	7,11	Leste	Lado do Transformador	Desconectados	4
27/05/97	12,72	Leste	Lado da Carga	Interligados	1
03/06/97	7,57	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
10/06/97	10,73	Leste	Lado do Transformador	Desconectados	3
17/06/97	2,92	Oeste	Lado da Carga	Interligados	2
24/06/97	42,14	Leste	Lado do Transformador	Desconectados	2
01/07/97	4,80	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
08/07/97	5,71	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	4
15/07/97	14,28	Oeste	Lado do Transformador	Interligados	2
22/07/97	6,17	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
29/07/97	24,81	Leste	Lado da Carga	Interligados	1
05/08/97	2,68	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	2
12/08/97	8,26	Leste	Lado do Transformador	Desconectados	3
19/08/97	62,34	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
26/08/97	105,48	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	2
02/09/97	88,92	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	2
09/09/97	126,17	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	1
16/09/97	240,61	Leste	Lado do Transformador	Desconectados	2
23/09/97	58,03	Leste	Lado da Carga	Interligados	1
30/09/97	16,83	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
07/10/97	3,40	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
14/10/97	38,78	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
21/10/97	3,28	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	2
28/10/97	19,04	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
04/11/97	2,52	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
11/11/97	26,36	Leste	Lado do Transformador	Interligados	3
18/11/97	2,44	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	2
25/11/97	2,38	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
02/12/97	2,36	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
09/12/97	8,08	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	1
16/12/97	3,19	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	2
23/12/97	35,85	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	3
30/12/97	37,10	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3

Analisando o Quadro 13, nota-se que a menor corrente calculada para este período foi de 2,28 kA, ocorrida a três metros, no sentido Sul do lado do posto de transformação, na condição dos sistemas de aterramento AT e BT desconectado.

Na condição dos sistemas de aterramento AT e BT interligados, pode-se observar as seguintes ocorrências dos menores valores da corrente de curto-circuito:

- No posto de transformação (Quadro 10) apenas 2 ocorrências de corrente de curto circuito mínimo foram encontradas, representando 4% do total das medições, coincidindo com os sentidos Oeste e Leste, a dois e três metros, respectivamente.
- Na carga (Quadro 11) apenas 4 ocorrências de corrente de curto circuito mínimo, representando 8% do total, sendo 3 na direção Leste, a 1 metro da carga e, uma no sentido Oeste, a 2 metros da carga.

No posto de transformação (Quadro 12), na condição dos sistemas de aterramento AT e BT desconectados, pode-se observar 46 ocorrências dos menores valores da corrente de curto-circuito, representando 88%, sendo:

- 28 ocorrências foram na direção do Sul, 12 na direção Oeste e 6 no sentido Leste, representando 61%, 26% e 13%, respectivamente. Existe portanto, uma predominância do sentido Sul, coincidindo com a direção em que encontra-se a Subestação de origem do alimentador de onde deriva o sistema MRT em estudo.
- 26 ocorrências foram a três metros do posto de transformação, representando 57% do total. Destas, 23 foram no sentido Sul, representando quase 89% das ocorrências, confirmando que este local é onde as pessoas e animais estão mais vulneráveis ao choque elétrico.

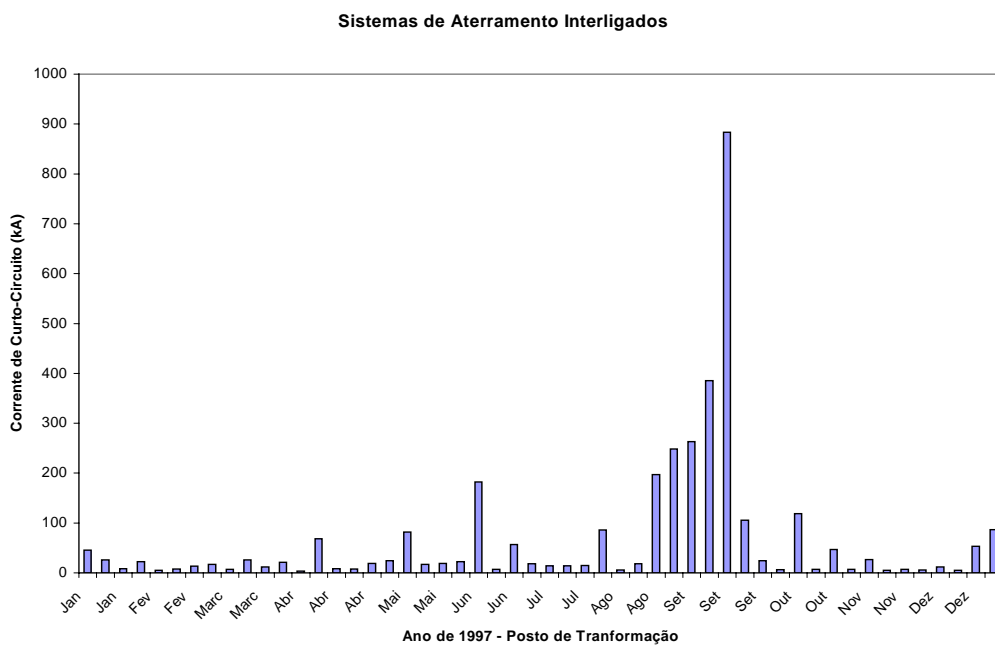


Figura 28 – Mínimos valores da corrente de curto-circuito calculados para o posto de transformação, com os sistemas de aterramento interligados. (1997)

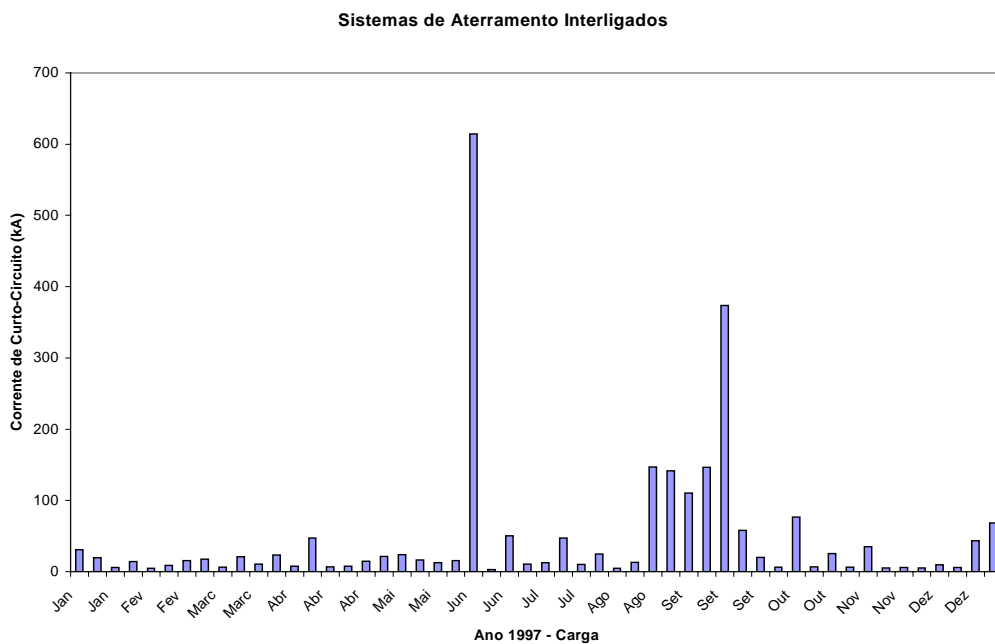


Figura 29 – Mínimos valores da corrente de curto-circuito calculados para o lado da carga, com os sistemas de aterramento interligados. (1997)

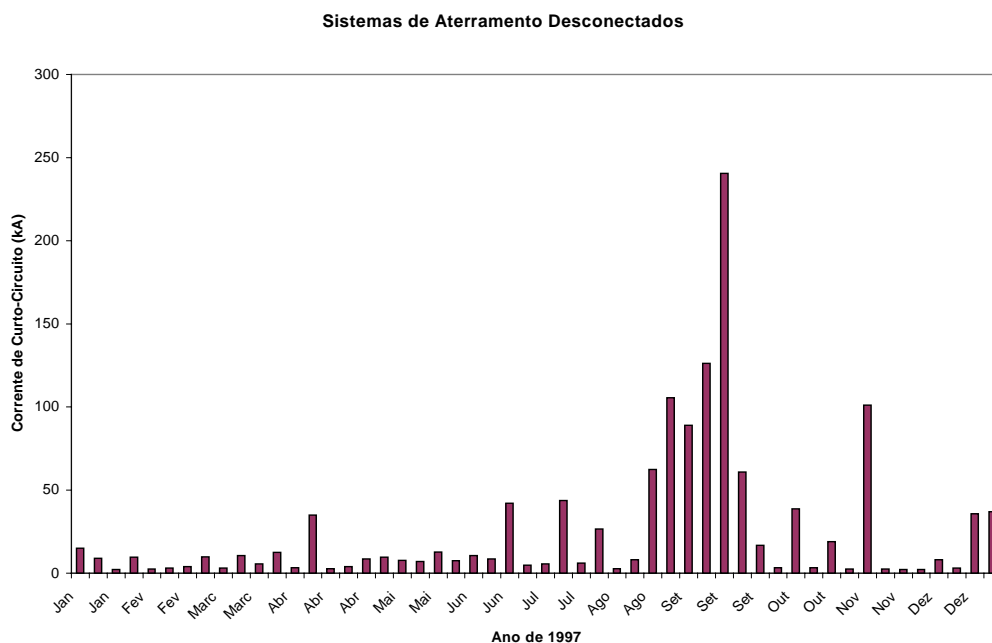


Figura 30 – Mínimos valores da corrente de curto-circuito calculados para o posto de transformação, com os sistemas de aterramento desconectados. (1997)

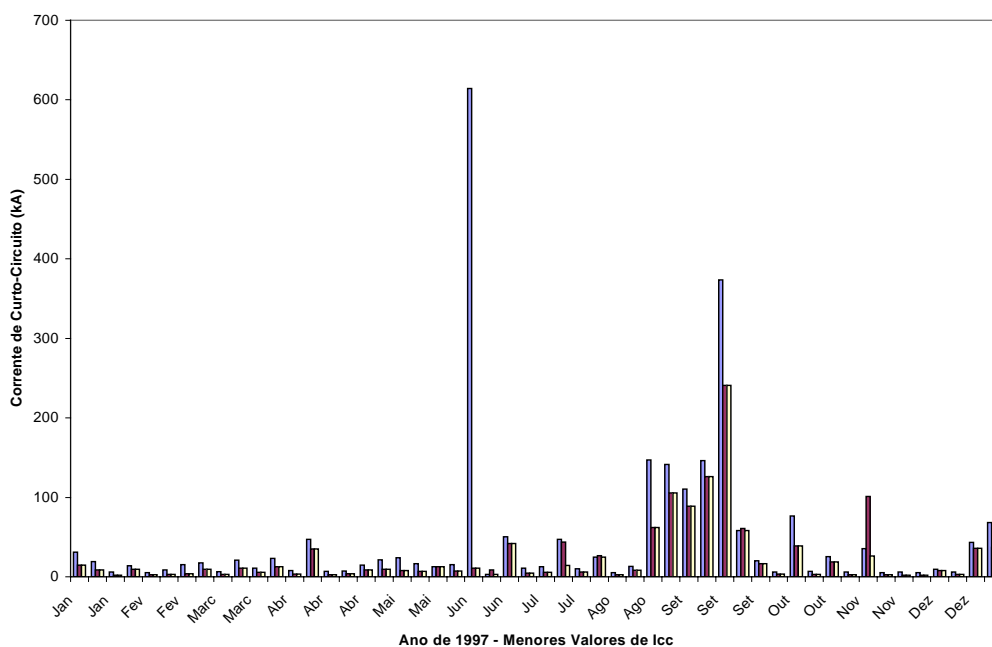


Figura 31 – Mínimos valores da corrente de curto-circuito, considerando as situações dos sistemas de aterramento interligados e desconectados. (1997)

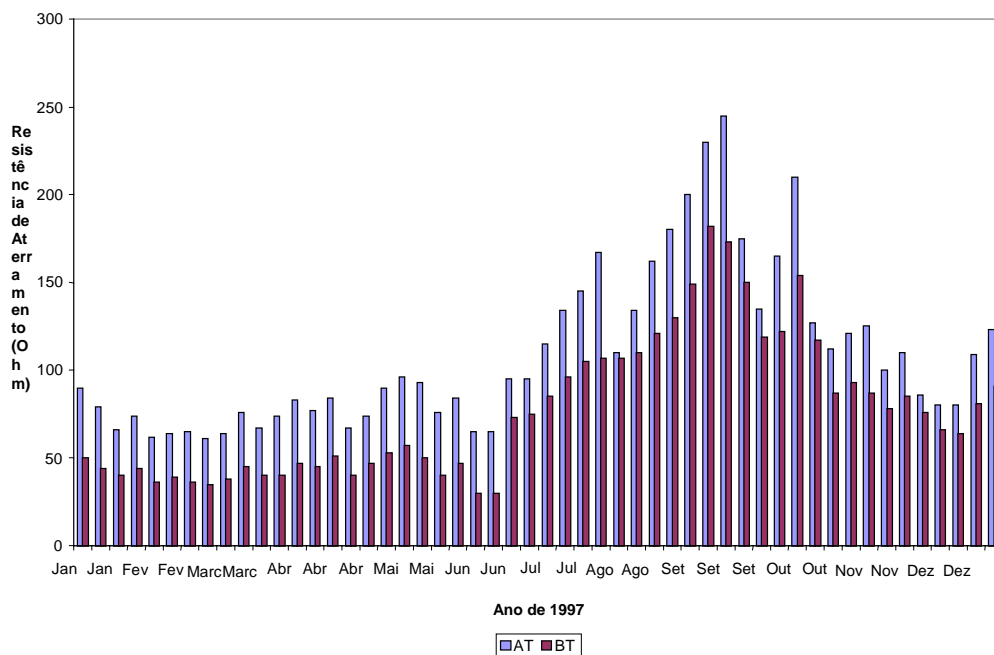


Figura 32 – Resistência de aterramento do lado AT com sistemas desconectados e do lado BT com os sistemas interligados. (1997)

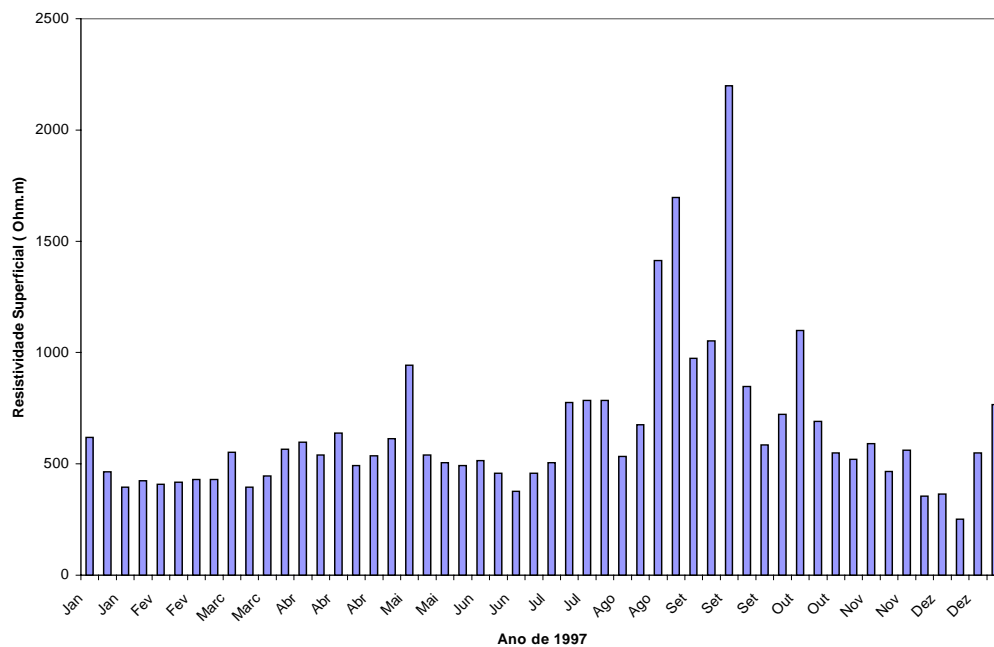


Figura 33 – Resistividade superficial do solo. (1997)

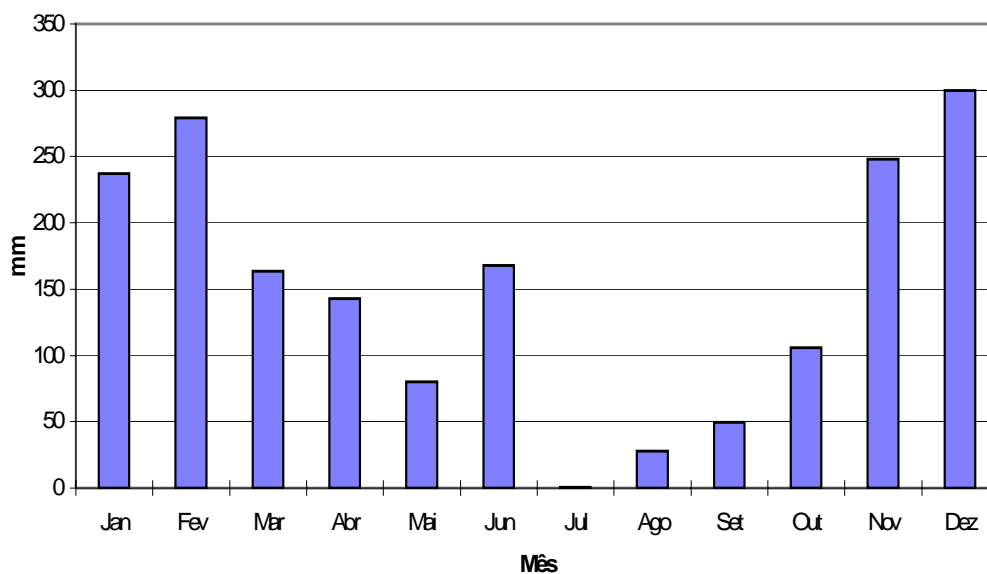


Figura 34 – Precipitação pluviométrica durante o ano de 1997.

Pode-se notar, entre os gráficos das Figuras 28 a 34, que nos meses de agosto e setembro há uma coincidência entre os menores valores da corrente de curto-circuito, que provocariam fibrilação ventricular, com os maiores valores da resistividade superficial e os menores índices pluviométricos, indicando ainda uma maior relação entre estes fatores do que os dados do ano de 1996, para o mesmo período do ano.

Os dados do ano de 1997 confirmam a análise de 1996, mostrando que os maiores valores da resistividade superficial, juntamente com o tipo de ligação dos sistemas de aterramento, isto é, sistemas interligados, trazem um maior nível de segurança para as pessoas que circulam próximo ao posto de transformação, onde também se tem os menores valores da resistência de aterramento, como mostra a Figura 32.

QUADRO 14 – Parâmetros elétricos medidos e calculados, para análise da tensão de passo, do lado do posto de transformação, com os sistemas de aterramento AT e BT interligados. (1998)

Data (d/m/a)	V_p (med) (mV)	I_{carga} (Amp.)	V_p (calc) (Volts)	$I_{cc(min)}$ (kA)	ρ_s (Ohm.m)	R_{At} (Ohm)	Sentido
06/01/98	86	15	324,76	56,38	640,56		Oeste
13/01/98	345	14	285,60	11,54	543,22		Sul
20/01/98	410	15	305,81	11,14	593,46		Sul
27/01/98	95	15	274,23	43,11	514,96		Sul
03/02/98	418	15	288,12	10,29	549,50		Sul
10/02/98	147	15	262,86	26,70	486,70		Oeste
17/02/98	737	15	236,33	4,79	420,76		Sul
23/02/98	594	16	212,33	5,70	361,10		Sul
03/03/98	330	15	247,70	11,21	449,02		Oeste
10/03/98	175	15	218,64	18,66	376,80		Sul
17/03/98	161	15	251,49	23,33	458,44		Leste
24/3/98	441	16	251,49	9,08	458,44		Oeste
31/03/98	363	16	248,96	10,93	452,16		Sul
07/04/98	98	16	272,96	44,37	511,82		Leste
14/04/98	114	16	288,12	40,26	549,50		Sul
21/04/98	104	16	255,28	39,10	467,86		Leste
28/04/98	334	16	265,38	12,66	492,98		Leste
05/05/98	541	15	265,38	7,33	492,98		Sul
13/05/98	67	15	302,02	67,31	584,04		Leste
19/05/98	540	14	303,28	7,83	587,18		Sul
26/05/98	69	15	353,81	76,56	712,78		Sul
02/06/98	91	14	300,76	46,06	580,90		Sul
09/06/98	99	16	326,02	52,45	643,70		Sul
16/06/98	87	15	312,12	53,57	609,16		Sul
23/06/98	181	15	281,81	23,25	533,80		Sul
30/06/98	115	15	274,23	35,61	514,96		Leste
07/07/98	55	15	309,60	84,05	602,88		Sul
15/07/98	75	15	312,12	62,14	609,16		Sul
21/07/98	87	16	312,12	57,14	609,16		Sul
28/07/98	323	16	370,23	18,25	753,60		Leste
04/08/98	53	16	408,13	122,62	847,80		Leste
12/08/98	520	18	278,02	9,58	524,38		Leste
18/08/98	118	32	224,96	30,37	392,50		Leste
25/08/98	72	18	270,44	67,31	505,54		Oeste
01/09/98	65	15	357,60	82,14	722,20		Sul
09/09/98	501	16	276,75	8,80	521,24		Leste
15/09/98	338	16	257,80	12,15	474,14		Leste
22/09/98	119	18	471,30	70,94	1004,80		Leste
29/09/98	566	15	278,02	7,34	524,38		Oeste
06/10/98	234	15	284,33	18,14	540,08		Leste
13/10/98	569	15	271,70	7,13	508,68		Leste
20/10/98	113	17	231,28	34,65	408,20		Norte
27/10/98	695	15	211,06	4,54	357,96		Leste
03/11/98	192	16	265,38	22,02	492,98		Oeste
10/11/98	626	15	293,18	6,99	562,06		Leste
18/11/98	335	15	291,91	13,01	558,92		Oeste
01/12/98	525	15	276,75	7,87	521,24		Oeste
08/12/98	460	15	224,96	7,30	392,50		Leste
15/12/98	447	15	218,64	7,31	376,80		Leste
22/12/98	213	15	288,12	20,20	549,50		Leste
29/12/98	266	16	255,28	15,29	467,86		Leste

QUADRO 15 – Parâmetros elétricos medidos e calculados, para análise da tensão de passo, do lado da carga, com os sistemas de aterramento AT e BT interligados. (1998)

Data (d/m/a)	V _p (med) (mV)	I _{carga} (Amp.)	V _p (calc) (Volts)	I _{cc} (min) (kA)	ρ _S (Ohm.m)	R _{At} (Ohm)	Sentido
06/01/98	197	15	315,91	24,61	618,58	89	Leste
13/01/98	453	14	254,01	8,79	464,72	80	Leste
20/01/98	565	15	226,22	8,08	395,64	78	Leste
27/01/98	108	15	237,59	37,92	423,90	95	Leste
03/02/98	456	15	231,28	9,44	408,20	80	Leste
10/02/98	222	15	235,07	17,68	417,62	82	Leste
17/02/98	705	15	240,12	5,01	430,18	66	Leste
23/02/98	587	16	240,12	5,76	430,18	65	Leste
03/03/98	557	15	289,39	6,64	552,64	65	Leste
10/03/98	198	15	226,22	16,49	395,64	82	Leste
17/03/98	170	15	246,43	22,09	445,88	66	Norte
24/03/98	685	16	294,44	5,85	565,20	60	Leste
31/03/98	510	16	307,07	7,78	596,60	64	Leste
07/04/98	186	16	284,33	23,38	540,08	70	Leste
14/04/98	151	16	323,49	30,39	637,42	70	Leste
21/04/98	114	16	265,38	35,67	492,98	66	Oeste
28/04/98	434	16	283,07	9,74	536,94	73	Leste
05/05/98	510	15	313,39	7,77	612,30	71	Leste
13/05/98	84	15	446,03	53,69	942,00	72	Oeste
19/05/98	658	14	284,33	6,42	540,08	73	Leste
26/05/98	78	15	270,44	67,72	505,54	90	Norte
02/06/98	125	14	265,38	33,53	492,98	76	Leste
09/06/98	199	16	274,23	26,09	514,96	66	Sul
16/06/98	133	15	251,49	35,04	458,44	81	Sul
23/06/98	297	15	218,64	14,17	376,80	80	Leste
30/06/98	128	15	251,49	31,99	458,44	85	Oeste
07/07/98	107	15	270,44	43,20	505,54	94	Oeste
15/07/98	200	15	379,08	23,30	775,58	87	Leste
21/07/98	114	16	382,87	43,61	785,00	91	Norte
28/07/98	375	16	382,87	15,72	785,00	100	Sul
04/08/98	82	16	281,81	79,25	533,80	100	Leste
12/08/98	336	18	338,65	14,83	675,10	62	Oeste
18/08/98	255	16	635,52	14,06	1413,00	62	Leste
25/08/98	123	18	749,21	39,40	1695,60	89	Sul
01/09/98	76	15	458,66	70,25	973,40	100	Leste
09/09/98	453	16	490,24	9,73	1051,90	81	Oeste
15/09/98	260	16	951,33	15,80	2198,00	85	Sul
22/09/98	59	18	408,13	143,08	847,80	94	Oeste
29/09/98	764	15	302,02	5,43	584,04	78	Leste
06/10/98	96	15	357,60	44,23	722,20	85	Sul
13/10/98	423	15	509,19	9,59	1099,00	76	Sul
20/10/98	72	17	344,97	54,38	690,80	75	Oeste
27/10/98	566	15	288,12	5,57	549,50	76	Oeste
03/11/98	77	16	276,75	54,90	521,24	75	Leste
10/11/98	522	15	304,54	8,39	590,32	82	Oeste
18/11/98	125	30	254,65	34,87	466,29	72	Sul
01/12/98	562	15	293,18	7,35	562,06	75	Oeste
08/12/98	338	15	209,80	9,94	354,82	79	Oeste
15/12/98	480	15	213,59	6,80	364,24	71	Oeste
22/12/98	192	15	168,11	22,41	251,20	82	Sul
29/12/98	226	16	288,12	17,99	549,50	86	Leste

QUADRO 16 – Parâmetros elétricos medidos e calculados, para análise da tensão de passo, do lado do posto de transformação, com os sistemas de aterramento AT e BT desconectados. (1998)

Data (d/m/a)	V _p (med) (mV)	I _{carga} (Amp.)	V _p (calc) (Volts)	I _{cc(min)} (kA)	ρ _S (Ohm.m)	R _{At} (Ohm)	Sentido
06/01/98	228	15	315,91	21,27	618,58	104	Oeste
13/01/98	415	14	254,01	9,59	464,72	100	Oeste
20/01/98	933	15	226,22	4,89	395,64	100	Oeste
27/01/98	182	15	237,59	22,50	423,90	135	Sul
03/02/98	659	15	231,28	6,53	408,20	100	Leste
10/02/98	350	15	235,07	19,5	417,62	107	Sul
17/02/98	1557	15	240,12	2,27	430,18	82	Sul
23/02/98	1759	16	240,12	1,92	430,18	62	Sul
03/03/98	1037	15	289,39	3,57	552,64	83	Sul
10/03/98	425	15	226,22	7,68	395,64	107	Norte
17/03/98	339	15	246,43	11,08	445,88	82	Sul
24/03/98	1123	16	294,44	3,57	565,20	85	Sul
31/03/98	793	16	307,07	5,00	596,60	82	Sul
07/04/98	238	16	284,33	18,27	540,08	94	Leste
14/04/98	188	16	323,49	24,41	637,42	99	Sul
21/04/98	179	16	265,38	22,72	492,98	87	Leste
28/04/98	762	16	283,07	5,55	536,94	95	Sul
05/05/98	1123	15	313,39	3,53	612,30	90	Sul
13/05/98	175	15	446,03	25,77	942,00	106	Sul
19/05/98	946	14	284,33	4,47	540,08	107	Sul
26/05/98	205	15	270,44	25,77	505,54	115	Sul
02/06/98	215	14	265,38	19,50	492,98	90	Sul
09/06/98	194	16	274,23	26,76	514,96	104	Leste
16/06/98	146	15	251,49	31,92	458,44	108	Leste
23/06/98	396	15	218,64	10,63	376,80	98	Leste
30/06/98	229	15	251,49	17,88	458,44	105	Sul
07/07/98	160	15	270,44	28,89	505,54	118	Sul
15/07/98	402	15	379,08	11,59	775,58	105	Sul
21/07/98	132	16	382,87	37,66	785,00	115	Sul
28/07/98	738	16	382,87	7,99	785,00	131	Oeste
04/08/98	157	16	281,81	41,39	533,80	145	Sul
12/08/98	750	18	338,65	6,64	675,10	86	Leste
18/08/98	200	16	635,52	17,92	1413,00	86	Oeste
25/08/98	245	18	749,21	19,78	1695,60	109	Sul
01/09/98	240	15	458,66	22,25	973,40	127	Leste
09/09/98	888	16	490,24	4,96	1051,90	90	Oeste
15/09/98	493	16	951,33	8,33	2198,00	100	Sul
22/09/98	124	18	408,13	68,08	847,80	94	Sul
29/09/98	1064	15	302,02	3,90	584,04	92	Sul
06/10/98	182	15	357,60	23,33	722,20	85	Leste
13/10/98	784	15	509,19	5,18	1099,00	91	Sul
20/10/98	120	17	344,97	32,63	690,80	96	Oeste
27/10/98	1504	15	288,12	2,10	549,50	98	Sul
03/11/98	177	16	276,75	23,88	521,24	95	Oeste
10/11/98	1096	15	304,54	3,99	590,32	112	Oeste
18/11/98	553	15	254,65	7,88	466,29	113	Sul
01/12/98	1229	15	293,18	3,36	562,06	97	Oeste
08/12/98	1380	15	209,80	2,43	354,82	112	Oeste
15/12/98	1158	15	213,59	2,82	364,24	96	Oeste
22/12/98	419	15	168,11	10,27	251,20	125	Oeste
29/12/98	570	16	288,12	7,13	549,50	115	Leste

QUADRO 17 – Menores valores de corrente de curto-circuito para provocar fibrilhação ventricular, indicando o ponto de ocorrência e as condições dos aterramentos. (1998)

Data d/m/a	Icc (mínimo) (kA)	Sentido	Local	Condições dos Aterramentos	Distância (m)
06/01/98	21,27	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	1
13/01/98	8,79	Leste	Lado da Carga	Interligados	1
20/01/98	4,89	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	2
27/01/98	22,50	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	2
03/02/98	6,53	Leste	Lado do Transformador	Desconectados	2
10/02/98	17,68	Leste	Lado da Carga	Interligados	1
17/02/98	2,27	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
23/02/98	1,92	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	4
03/03/98	3,57	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
10/03/98	7,68	Norte	Lado do Transformador	Desconectados	4
17/03/98	11,08	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	2
24/03/98	3,57	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
31/03/98	5,00	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
07/04/98	18,27	Leste	Lado do Transformador	Desconectados	2
14/04/98	24,41	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
21/04/98	22,72	Leste	Lado do Transformador	Desconectados	2
28/04/98	5,55	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
05/05/98	3,53	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
13/05/98	25,77	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
19/05/98	4,47	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
26/05/98	25,77	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
02/06/98	19,50	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
09/06/98	26,09	Sul	Lado da Carga	Interligados	4
16/06/98	31,92	Leste	Lado do Transformador	Desconectados	2
23/06/98	10,63	Leste	Lado do Transformador	Desconectados	2
30/06/98	17,88	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	4
07/07/98	28,89	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	2
15/07/98	11,59	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	2
21/07/98	37,66	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
28/07/98	7,99	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	2
04/08/98	41,39	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
12/08/98	6,64	Leste	Lado do Transformador	Desconectados	2
18/08/98	14,06	Leste	Lado da Carga	Interligados	1
25/08/98	19,78	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	1
01/09/98	22,25	Leste	Lado do Transformador	Desconectados	4
09/09/98	4,96	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	2
15/09/98	8,33	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
22/09/98	68,08	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
29/09/98	3,90	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
06/10/98	18,14	Leste	Lado do Transformador	Interligados	1
13/10/98	5,18	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
20/10/98	32,63	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	2
27/10/98	2,10	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
03/11/98	22,02	Oeste	Lado do Transformador	Interligados	1
10/11/98	3,99	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	1
18/11/98	7,88	Sul	Lado do Transformador	Desconectados	3
01/12/98	3,36	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	1
08/12/98	2,43	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	2
15/12/98	2,82	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	2
22/12/98	10,27	Oeste	Lado do Transformador	Desconectados	1
29/12/98	7,13	Leste	Lado do Transformador	Desconectados	2

A menor corrente encontrada neste período foi de 1,92 kA, no posto de transformação, na condição do aterramento de AT desconectado do de BT, ocorrida a três metros, no sentido Sul. Esta é a menor corrente encontrada ao longo dos 3 anos em estudo, portanto servindo como referência para desenvolvimento de estudo de proteção.

Na condição dos sistemas de aterramento AT e BT interligados, pode-se observar as seguintes ocorrências dos menores valores da corrente de curto-circuito:

- No posto de transformação apenas 2 ocorrências de corrente de curto circuito mínimo foram encontradas, representando 4% do total das medições, no sentido Oeste e Leste, a um metro.
- Na carga apenas 4 ocorrências de corrente de curto circuito mínimo, representando 8% do total, sendo 3 no sentido Leste, a 1 metro da carga e, uma no sentido Sul, a 1 metro da carga.

No posto de transformação, na condição dos sistemas de aterramento AT e BT desconectados, pode-se observar 45 ocorrências dos menores valores da corrente de curto-circuito, representando 88 % dessas ocorrências, sendo:

- 26 ocorrências foram no sentido Sul, 10 no sentido Oeste, 8 no sentido Leste e 1 no sentido Norte, representando 58%, 22%, 18% e 2%, respectivamente. Existe portanto, uma predominância do sentido Sul, coincidindo com a direção em que encontra-se a Subestação de origem do alimentador de onde deriva o sistema MRT em estudo.
- 19 ocorrências foram a três metros do posto de transformação, representando 73% do total, no sentido Sul, reafirmando que este local é onde as pessoas e animais estão mais vulneráveis ao choque elétrico.

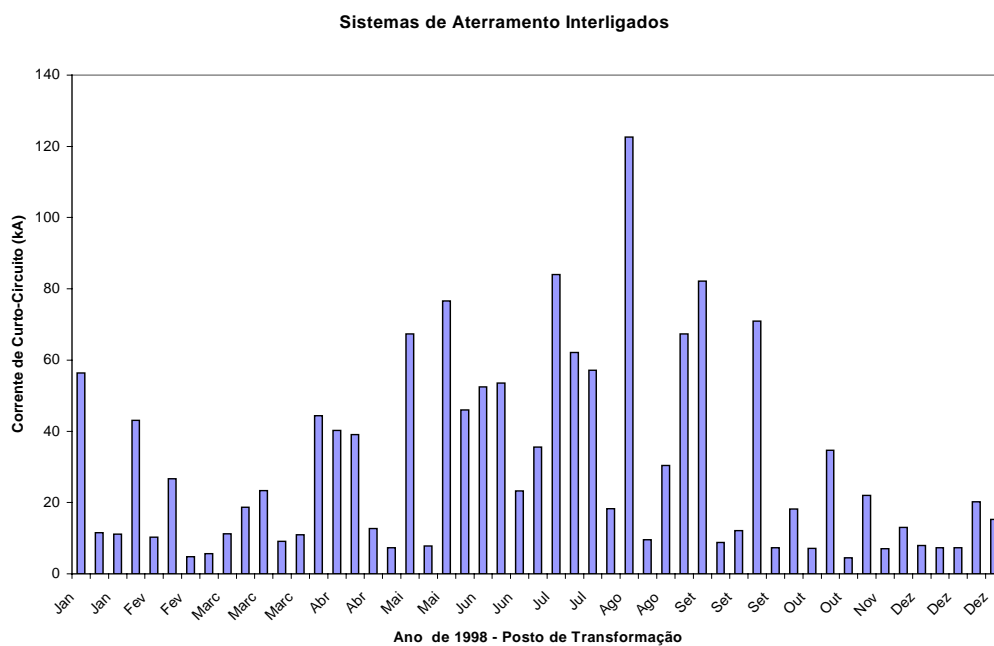


Figura 35– Mínimos valores da corrente de curto-circuito calculados para o posto de transformação, com os sistemas de aterramento interligados. (1998)

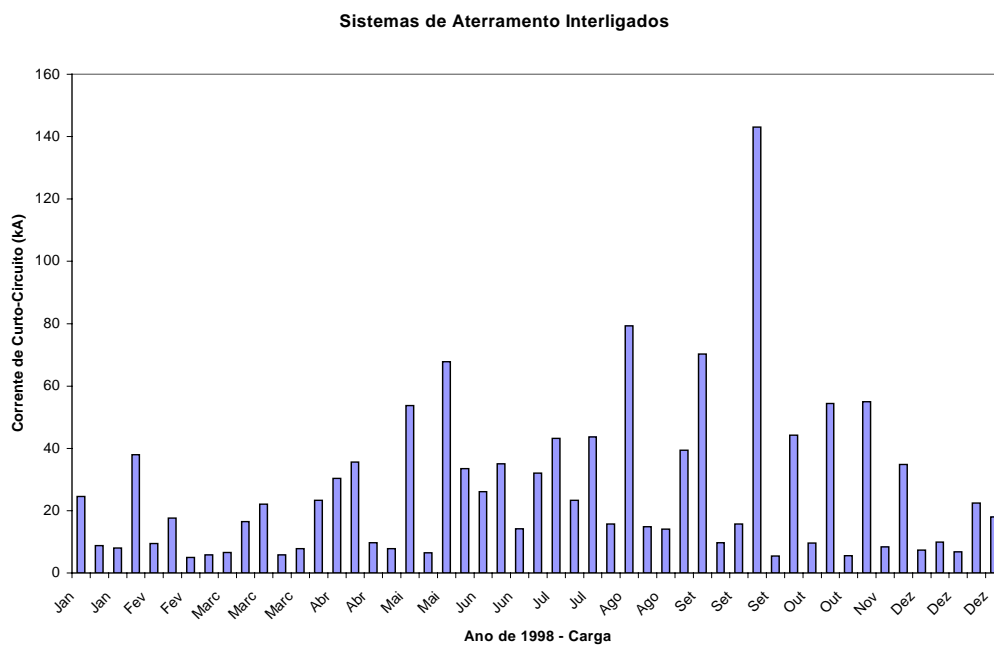


Figura 36 – Mínimos valores da corrente de curto-circuito calculados para o lado da carga, com os sistemas de aterramento interligados. (1998)

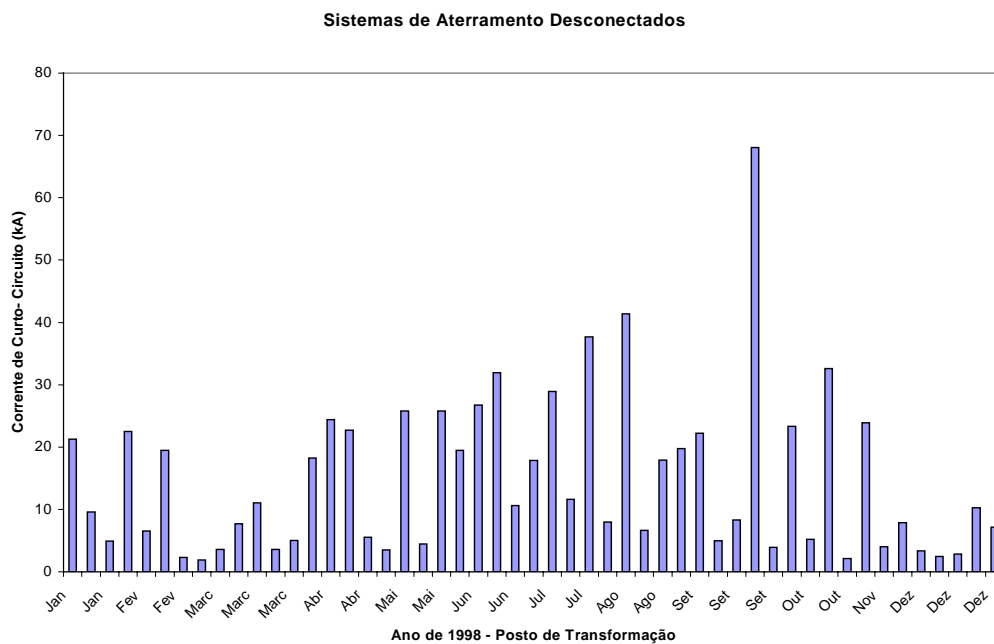


Figura 37 – Mínimos valores da corrente de curto-circuito calculados para o posto de transformação, com os sistemas de aterramento desconectados. (1998)

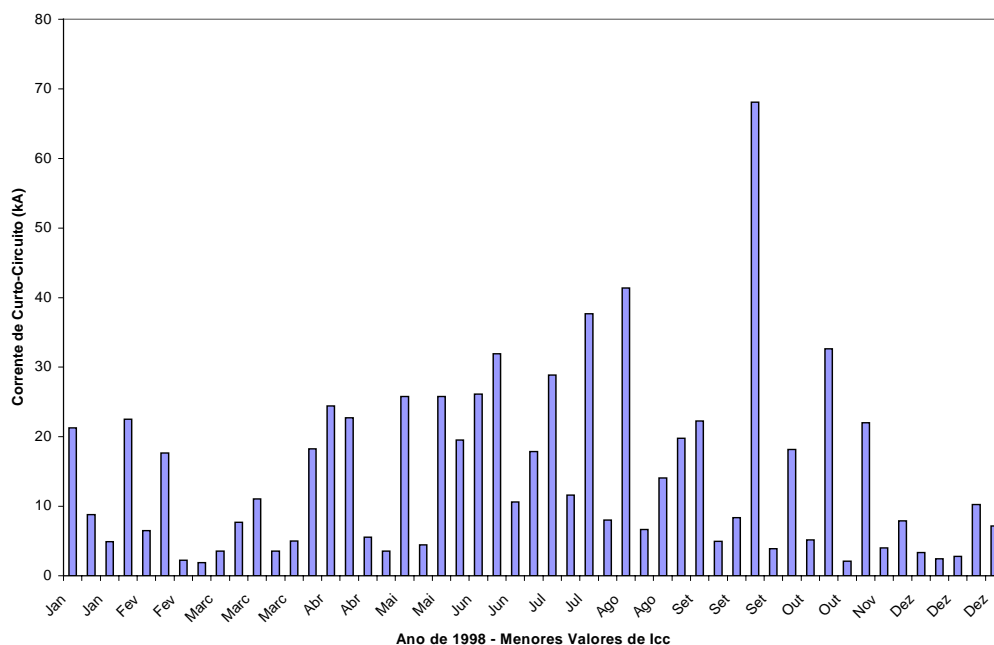


Figura 38 – Mínimos valores da corrente de curto-circuito, considerando as situações dos sistemas de aterramento interligados e desconectados. (1998)

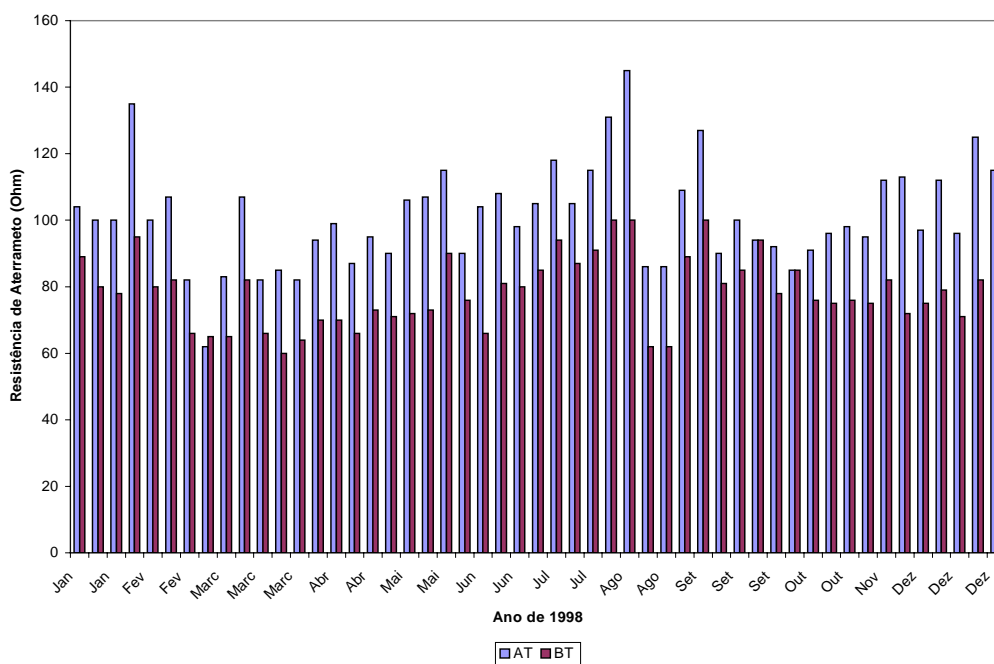


Figura 39 – Resistência de aterramento do lado AT com sistemas desconectados e do lado BT com os sistemas interligados. (1998)

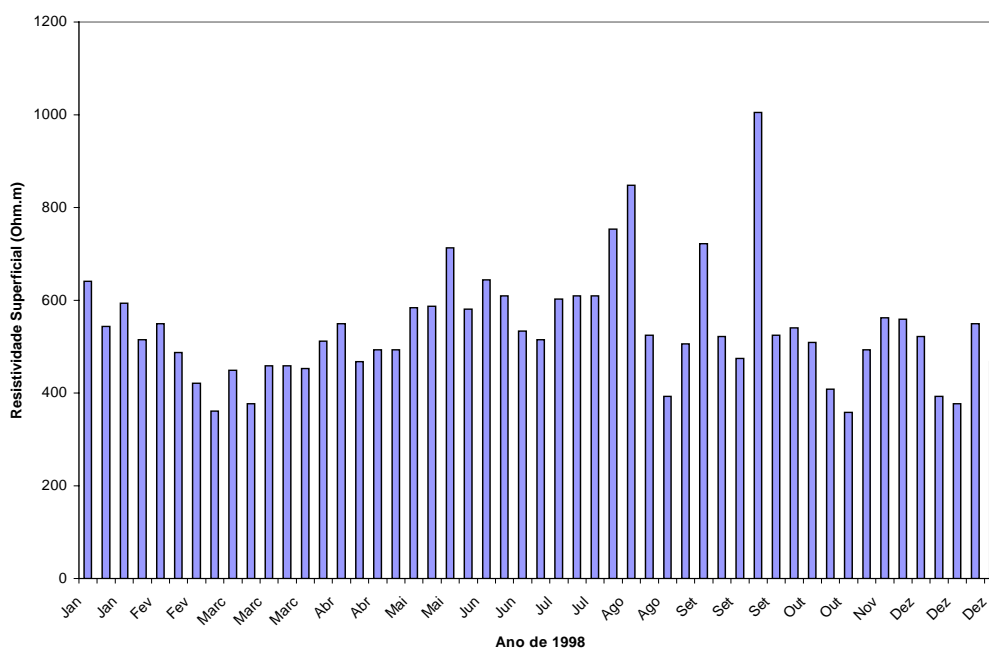


Figura 40 – Resistividade superficial do solo. (1998)

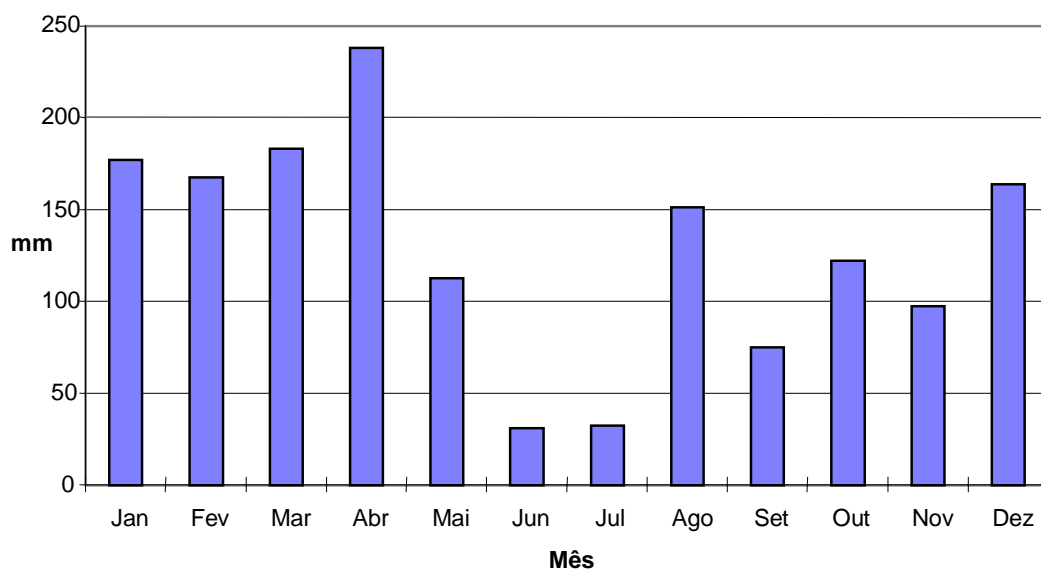


Figura 41 – Precipitação pluviométrica durante o ano de 1998.

Pode-se notar entre os gráficos das Figuras 35 a 41, que há um comportamento mais homogêneo entre os valores apresentados do que ocorreu nos anos anteriores, isto sem alterar as correspondências entre os fatores envolvidos, confirmando de maneira ainda mais clara o estrito relacionamento existente entre a resistividade superficial e os índices pluviométricos, com os valores determinados para a corrente de curto-circuito, que provocariam fibrilação ventricular, pelos dados originados através da tensão de passo.

Perante as análises dos três anos, principalmente do ano de 1998, pôde-se confirmar a teoria de que os maiores valores de resistividade superficial, juntamente com a condição dos sistemas de aterramento AT e BT interligados, oferecem um maior nível de segurança para as pessoas que circulam próximo a um ramal MRT. Porém, como os

menores valores da resistência de aterramento estão diretamente ligados à resistividade superficial, como pode-se notar nas Figuras 26, 32 e 39, que não há uma ligação direta entre os maiores valores da corrente de curto-circuito com os menores valores da resistência de aterramento, seja com os sistemas de aterramento interligados ou desconectados, mostrando que não se deve levar-se só em consideração o valor da resistência de terra e sim os gradientes de potenciais na superfície, potenciais estes que devem limitar a instalação de um sistema MRT.

Os resultados apresentados no Quadro 18, confirmam que as correntes que circulam pelo solo e geram gradientes de potenciais que provocam fibrilação ventricular dependem da resistividade superficial do solo, pois valores praticamente idênticos de corrente circulando pelo solo provocam tensões diferentes, isto se deve, exclusivamente, à resistividade superficial.

QUADRO 18 – Menores valores calculados de corrente de curto-circuito que geram potencial de passo suficiente para provocar fibrilação ventricular.

ANO	Lado do Transformador Aterramentos Interligados		Lado do Transformador Aterramentos Desconectados		Lado da Carga Aterramentos Interligados	
	Icc (mín) (kA)	E(mV)	Icc(kA)	E(mV)	Icc(kA)	E(mV)
1996	6,64	357	3,50	952	7,00	573
	7,40	737	4,02	1.717	7,05	710
	7,58	477	4,42	1.103	8,11	967
1997	3,51	1.365	2,23	787	2,92	1.541
	4,75	533	2,28	1.187	5,10	949
	4,88	515	2,38	1.839	5,11	768
1998	4,79	737	1,92	1.739	4,54	695
	5,43	764	2,10	1.504	5,01	705
	5,57	566	2,27	1.557	5,76	587

Em regiões de baixa resistividade do solo, recomenda-se aplicar uma camada de brita ao redor do posto de transformação e sobre o sistema de aterramento, para elevar o valor da resistividade.

5.2 Análise dos dados da tensão de toque

Nos Quadros de 19 a 21, estão apresentados os maiores valores diários medidos para a tensão de toque $V_{T (med)}$, para os anos de 1996 a 1998, considerando os sistemas de aterramento AT e BT interligados.

Para selecionar estes valores foi utilizada uma programação de Macro na Planilha do Excel sobre um banco de dados gerado pelas medições diárias da tensão de toque, envolvendo a resistividade superficial do solo $R_{Sup.}$, a resistência de aterramento R_{At}

Com os valores da resistividade superficial do solo, foram calculados os máximos valores da tensão de toque $V_{T(calc)}$, e os valores mínimos da corrente de curto-circuito $I_{cc(min)}$, capaz de provocar fibrilhação ventricular, em função da corrente de carga I_{carga} e da tensão de toque medida.

Para melhor analisar os dados de corrente de curto-circuito causados pela tensão de toque, nas condições dos sistemas de aterramento AT e BT interligados, em função da época do ano, da resistividade superficial, da resistência de aterramento e do índice pluviométrico, foram elaborados os gráficos das Figuras 42 a 44, referentes aos anos de 1996, 1997 e 1998, respectivamente, os quais estão comparando também os menores valores da corrente de curto-circuito calculados para a tensão de passo.

Nessas figuras pode-se notar uma homogeneidade entre os valores das corrente de curto-circuito calculadas pela tensão de passo e pela tensão de toque, portanto valendo as mesmas considerações feitas na análise da tensão de passo, quanto ao comportamento da resistividade superficial e o índice pluviométrico.

Não se pode analisar os valores das duas correntes porque os valores da tensão de passo e de toque são diferentes, porém, uma corrente de menor valor pode causar mais sensação de choque numa pessoa através da tensão de toque do que na tensão de passo. Este fato está relacionado com as Equações 17 e 20, onde a resistividade superficial é multiplicada por 6 vezes no cálculo da tensão máxima de passo e por 1,5 vezes no cálculo da tensão máxima de toque.

QUADRO 19 – Parâmetros elétricos medidos e calculados, para análise da tensão de toque, do lado do posto de transformação, com os sistemas de aterramento AT e BT interligados. (1996)

Data (d/m/a)	V_T (med) (mV)	I_{carga} (Amp.)	V_T (calc) (Volts)	$I_{cc(min)}$ (kA)	$\rho_{Sup.}$ (Ohm.m)	R_{At} (Ohm)
07/03/96	9750,0	50	67,05	20,93	0,00	85
12/03/96		29	130,22	31,82	628,00	106
21/03/96	1101,0	18	158,64	29,30	910,60	72
26/03/96			146,01		785,00	82
02/04/96	32,6	25	161,80	1018,05	942,00	95
09/04/96	27,2	18	210,75	8210,58	1428,70	78
19/04/96	9,7	24	147,58	603,64	800,70	80
23/04/96	34,0	13	177,59	21,96	1099,00	111
02/05/96	4,7	30	187,06	5631,48	1193,20	110
07/05/96	27,7	20	67,05	496,09	0,00	120
14/05/96	139,4	18	142,85	33,00	753,60	74
21/05/96	135,2	20	120,74	676,02	533,80	95
04/06/96	684,0	13	143,48	24,36	759,88	108
11/06/96	712,0	19	117,42	97,69	500,83	119
18/06/96	903,0	16	193,38	32,78	1256,00	128
25/06/96	435,0	23	161,73	29,66	941,37	137
02/07/96	379,0	12	164,95	111,78	973,40	144
09/07/96	19,0	20	157,06	59,44	894,90	160
16/07/96	125,0	16	174,43	225,88	1067,60	178
23/07/96	122,0	12	201,27	171,69	1334,50	80
30/07/96	122,0	14	191,80	197,13	1240,30	193
06/08/96	122,0	14	212,33	475,18	1444,40	197
13/08/96	115,0	14	420,76	529,15	3516,80	215
20/08/96	105,0	15	490,24	2188,06	4207,60	226
27/08/96	114,0	14	635,52	6519,41	5652,00	217
03/09/96	66,0	18	480,77	1541,48	4113,40	100
10/09/96	613,0	10	140,95	13,03	734,76	100
18/09/96	1450,0	16	146,01	8,46	785,00	113
24/09/96	217,0	12	180,75	87,76	1130,40	112
01/10/96	3200,0	20	146,01	58,62	785,00	90
08/10/96	595,0	14	123,27	25,11	558,92	89
14/10/96	1425,0	18	141,27	17,77	737,90	80
22/10/96	943,0	14	120,74	11,29	533,80	
29/10/96	1350,0	13	120,11	7,58	527,52	84
05/11/96	1205,0	8	120,74	6,64	533,80	77
12/11/96	507,0	14	112,85	11,07	455,30	94
19/11/96	859,0	13	122,95	20,55	555,78	104
26/11/96	348,0	28	137,79	36,13	703,36	103
10/12/96	2340,0	16	135,90	7,40	684,52	121
17/12/96	115,0	15	155,48	86,04	879,20	96
24/12/96	331,0	14	110,32	49,96	430,18	108
31/12/96	1571,0	17	122,32	9,85	549,50	127

QUADRO 20 – Parâmetros elétricos medidos e calculados, para análise da tensão de toque, do lado do posto de transformação, com os sistemas de aterramento AT e BT interligados. (1997)

Data (d/m/a)	V_T (med) (mV)	I_{carga} (Amp.)	V_T (calc) (Volts)	$I_{cc(min)}$ (kA)	$\varphi_{Sup.}$ (Ohm.m)	R_{At} (Ohm)
07/01/97	97	14	129,27	45,39	618,58	90
14/01/97	147	15	113,79	25,81	464,72	79
21/01/97	506	16	106,84	8,03	395,64	66
28/01/97	225	21	109,69	22,08	423,90	74
04/02/97	533	11	108,11	4,75	408,20	62
11/02/97	563	18	109,06	7,48	417,62	64
18/02/97	293	14	110,32	13,13	430,18	65
25/02/97	233	16	110,32	16,42	430,18	61
04/03/97	830	20	122,64	6,94	552,64	64
11/03/97	139	16	106,84	25,93	395,64	76
18/03/97	452	22	111,90	11,94	445,88	67
25/03/97	238	17	123,90	20,94	565,20	74
01/04/97	1365	14	127,06	3,51	596,60	83
08/04/97	58	14	121,37	68,32	540,08	77
15/04/97	745	19	131,16	8,21	637,42	84
22/04/97	578	16	116,63	7,95	492,98	67
29/04/97	269	18	121,06	18,86	536,94	74
06/05/97	229	18	128,64	24,52	612,30	90
13/05/97	98	18	161,80	81,53	942,00	96
20/05/97	307	18	121,37	16,60	540,08	93
27/05/97	259	18	117,90	18,71	505,54	76
03/06/97	216	18	116,63	22,02	492,98	84
10/06/97	27	18	118,85	182,01	514,96	65
17/06/97	629	18	113,16	7,17	458,44	65
24/06/97	69	18	104,95	56,80	376,80	95
01/07/97	194	14	113,16	18,07	458,44	95
08/07/97	268	14	117,90	14,06	505,54	115
15/07/97	370	14	145,06	14,28	775,58	134
22/07/97	367	14	146,01	14,54	785,00	145
29/07/97	62	14	146,01	86,04	785,00	167
05/08/97	697	14	120,74	5,64	533,80	110
12/08/97	258	14	134,95	18,29	675,10	134
19/08/97	45	14	209,17	196,72	1413,00	162
26/08/97	45	15	237,59	248,46	1695,60	180
02/09/97	26	15	164,95	263,33	973,40	200
09/09/97	19	15	172,85	385,14	1051,90	230
16/09/97	15	14	288,12	883,31	2198,00	245
23/09/97	58	15	152,32	105,05	847,80	175
30/09/97	186	15	125,79	24,25	584,04	135
07/10/97	815	15	139,69	6,55	722,20	165
14/10/97	64	15	177,59	118,75	1099,00	210
21/10/97	765	15	136,53	6,73	690,80	127
28/10/97	92	15	122,32	46,77	549,50	112
04/11/97	571	15	119,48	7,24	521,24	121
11/11/97	161	14	126,43	26,36	590,32	125
18/11/97	735	15	113,95	5,17	466,29	100
25/11/97	656	15	123,58	6,67	562,06	110
02/12/97	540	14	102,74	5,42	354,82	86
09/12/97	290	16	103,69	11,74	364,24	80
16/12/97	515	15	92,32	4,88	251,20	80
23/12/97	87	16	122,32	52,75	549,50	109
30/12/97	65	15	144,11	86,20	766,16	123

QUADRO 21 – Parâmetros elétricos medidos e calculados, para análise da tensão de toque, do lado do posto de transformação, com os sistemas de aterramento AT e BT desconectados. (1998)

Data (d/m/a)	V_T (med) (mV)	I_{carga} (Amp.)	V_T (calc) (Volts)	$I_{cc(min)}$ (kA)	$\varphi_{Sup.}$ (Ohm.m)	R_{At} (Ohm)
06/01/98	235	15	131,48	56,38	640,56	104
13/01/98	730	14	121,69	11,54	543,22	100
20/01/98	1160	15	126,74	11,14	593,46	100
27/01/98	1268	15	118,85	43,11	514,96	135
03/02/98	925	15	122,32	10,29	549,50	100
10/02/98	516	15	116,00	26,70	486,70	107
17/02/98	1540	15	109,37	4,79	420,76	82
23/02/98	1272	16	103,37	5,70	361,10	62
03/03/98	1043	15	112,21	11,21	449,02	83
10/03/98	303	15	104,95	18,66	376,80	107
17/03/98	387	15	113,16	23,33	458,44	82
24/03/98	1428	16	113,16	9,08	458,44	85
31/03/98	1010	16	112,53	10,93	452,16	82
07/04/98	268	16	118,53	44,37	511,82	94
14/04/98	286	16	122,32	40,26	549,50	99
21/04/98	303	16	114,11	39,10	467,86	87
28/04/98	860	16	116,63	12,66	492,98	95
05/05/98	1130	15	116,63	7,33	492,98	90
13/05/98	252	15	125,79	67,31	584,04	106
19/05/98	1051	14	126,11	7,83	587,18	107
26/05/98	224	15	138,74	76,56	712,78	115
02/06/98	330	14	125,48	46,06	580,90	90
09/06/98	193	16	131,79	52,45	643,70	104
16/06/98	184	15	128,32	53,57	609,16	108
23/06/98	503	15	120,74	23,25	533,80	98
30/06/98	230	15	118,85	35,61	514,96	105
07/07/98	212	15	127,69	84,05	602,88	118
15/07/98	239	15	128,32	62,14	609,16	105
21/07/98	144	16	128,32	57,14	609,16	115
28/07/98	693	16	142,85	18,25	753,60	131
04/08/98	118	16	152,32	122,62	847,80	145
12/08/98	2040	18	119,79	9,58	524,38	86
18/08/98	476	32	106,53	30,37	392,50	86
25/08/98	75	18	117,90	67,31	505,54	109
01/09/98	182	15	139,69	82,14	722,20	127
09/09/98	2420	16	119,48	8,80	521,24	90
15/09/98	1640	16	114,74	12,15	474,14	100
22/09/98	559	18	168,11	70,94	1004,80	94
29/09/98	1091	15	119,79	7,34	524,38	92
06/10/98	548	15	121,37	18,14	540,08	85
13/10/98	2280	15	118,21	7,13	508,68	91
20/10/98	788	17	108,11	34,65	408,20	96
27/10/98	2810	15	103,05	4,54	357,96	98
03/11/98	1305	16	116,63	22,02	492,98	95
10/11/98	2670	15	123,58	6,99	562,06	112
18/11/98	1800	15	123,27	13,01	558,92	113
01/12/98	2340	15	119,48	7,87	521,24	97
08/12/98	2580	15	106,53	7,30	392,50	112
15/12/98	2560	15	104,95	7,31	376,80	96
22/12/98	1320	15	122,32	20,20	549,50	125
29/12/98	1442	16	114,11	15,29	467,86	115

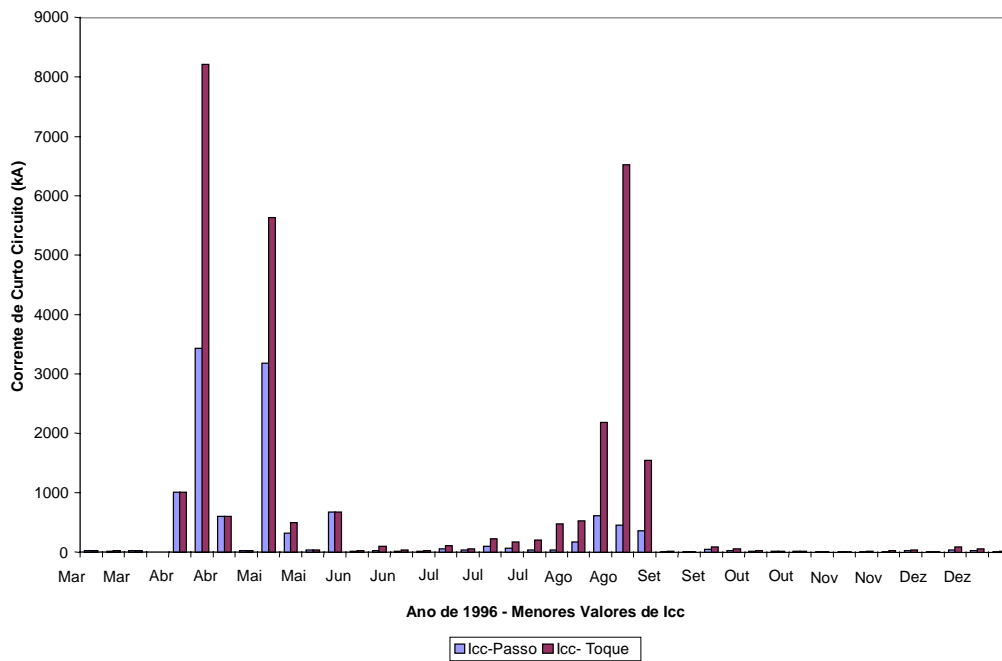


Figura 42 – Mínimos valores da corrente de curto-circuito calculados para a tensão de passo e tensão de toque durante o ano de 1996.

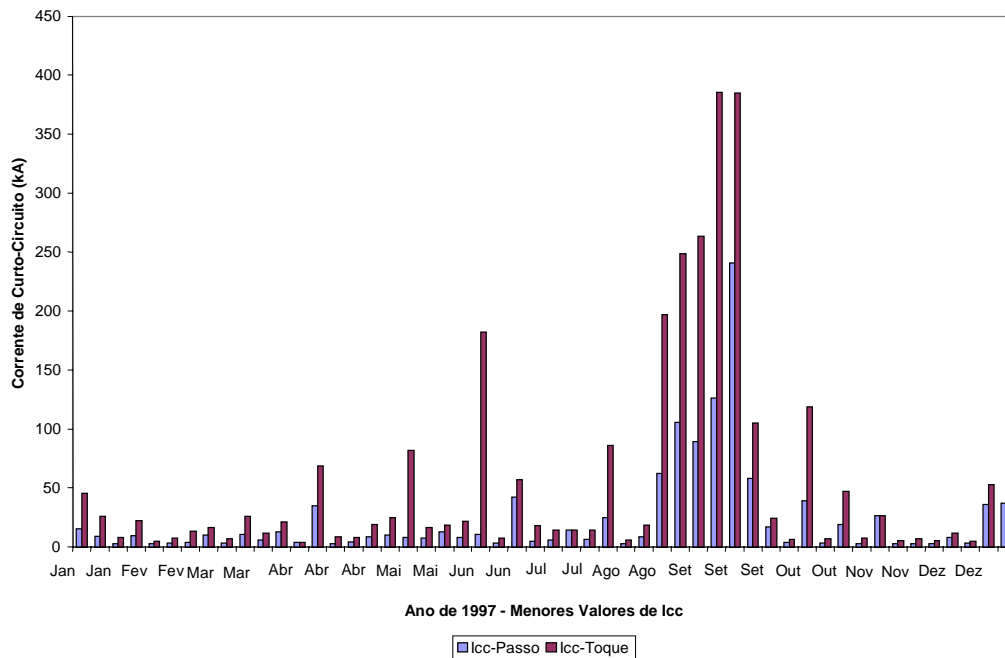


Figura 43 – Mínimos valores da corrente de curto-circuito calculados para a tensão de passo e tensão de toque durante o ano de 1997.

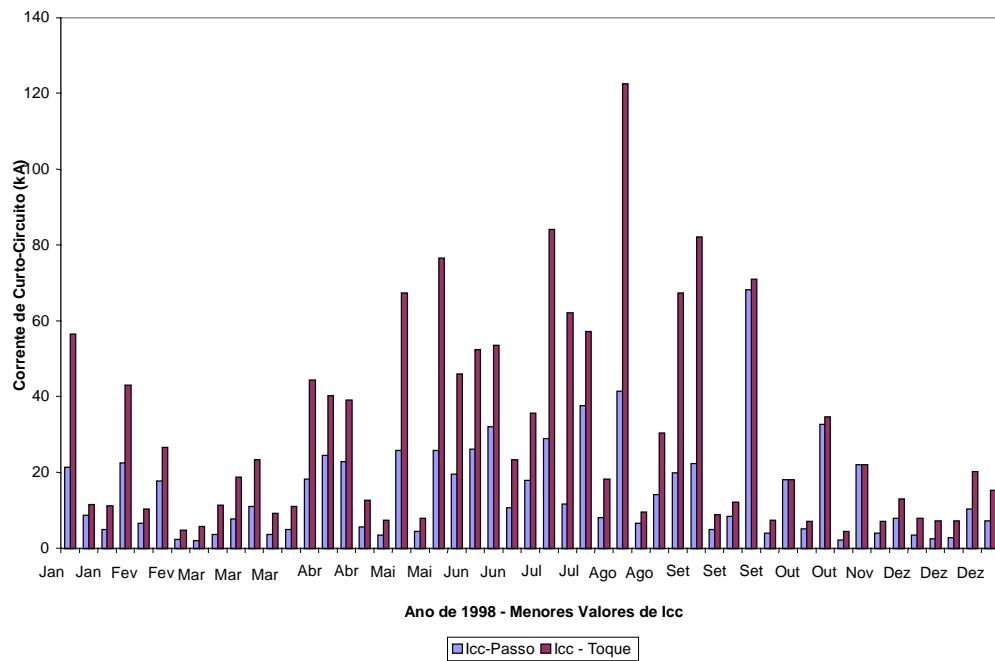


Figura 44 – Mínimos valores da corrente de curto-circuito calculados para a tensão de passo e tensão de toque durante o ano de 1998.

6 CONCLUSÕES

Os menores valores da corrente de curto-circuito, que provocariam fibrilação ventricular, estão diretamente relacionadas com os maiores valores da resistividade superficial e com os menores índices pluviométricos, indicando uma forte relação entre estes fatores.

Os valores mínimos de corrente de curto-circuito que poderão gerar potenciais de superfície, tanto a tensão de passo, como a tensão de toque, para provocar fibrilação ventricular, podem ser da ordem de 1 kA, dependendo da resistividade superficial do solo.

As análises dos três anos, principalmente do ano de 1998, pôde-se confirmar a teoria de que os maiores valores de resistividade superficial, juntamente com a condição dos sistemas de aterramento AT e BT interligados, oferecem um maior nível de segurança para as pessoas que circulam próximo a um ramal MRT.

Algumas concessionárias utilizam a brita, em volta do poste do transformador, de formas a aumentar a resistência de contato solo-corpo, aumentando desta forma a suportabilidade deste último às correntes de curto circuito.

Tal constatação vem justificar as grandes variações nos valores das resistividades superficiais encontradas neste estudo.

Existe uma predominância significativa dos menores valores de corrente de curto-circuito ocorrerem no sentido Sul, coincidindo com a direção em que se encontra a Subestação de origem do alimentador do qual deriva a rede do sistema MRT em estudo.

Os valores de corrente de curto circuito mínimos calculados neste trabalho, não são facilmente encontrados nos alimentadores rurais, porém a aplicação deste Sistema MRT deve ser antecedido de um estudo de estratificação do solo e cálculo dos potenciais de superfície no local.

Apesar das divergências entre as concessionárias de energia quanto a um aterramento único, no transformador, esta pesquisa demonstrou ser possível a construção de um sistema MRT com apenas este aterramento.

Como os menores valores da resistência de aterramento estão diretamente ligados à resistividade superficial, não há uma ligação direta entre os maiores valores da corrente de curto-circuito com os menores valores da resistência de aterramento, seja com os sistemas de aterramento interligados ou desconectados, mostrando que não se deve levar só em consideração o valor da resistência de terra e, sim, os gradientes de potenciais na superfície, potenciais estes que devem limitar a instalação de um sistema MRT.

Os valores elevados da resistência de aterramento, apesar de estarem bem acima dos recomendados pela maioria das concessionárias, não devem limitar a instalação de um sistema MRT.

O comportamento entre os valores das corrente de curto-circuito calculadas pela tensão de passo e pela tensão de toque, obedecem uma homogeneidade bastante clara, podendo portanto estabelecer as mesmas considerações feitas na análise da tensão de passo, para a tensão de toque, quanto ao comportamento da resistividade superficial e o índice pluviométrico.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, A. *Medida de terras*. Engenharia da Mackenzie, , p.23-25, 1961.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7117: medição da resistividade do solo. São Paulo, 1981. p.

CALDECOTT, R. et. al. *Investigation of soil resistivity measuring techniques using an electronic tank*. IEEE (Inst. Elect. Electron. Eng.) Trans. Power Appar. Syst., v.PAS103, n.10, p.2983-8, 1984.

CAMINHA, Jr, I.C. *Efeito da Disposição de Efluente Agro-Industrial em Áreas Agrícolas sobre a Resistividade do Solo*. 1998. 87p. (Dissertação de Mestrado – Faculdade de Ciências Agrônomicas – FCA UNESP.

CARDOSO, J. R. ; RIBEIRO, F. S. ; GAMBIRASIO, G. *O método dos elementos finitos no modelamento de sistemas de aterramento em solos de múltiplas camadas*. Anais do IX SNPTEE, Belo Horizonte, 1987.

- CARVALHO, H.L. et. al. *Experiências com sistema MRT no Brasil*. In: CONFERÊNCIA LATINO AMERICANA DE ELETRIFICAÇÃO RURAL, 1986, Curitiba. *Trabalhos Apresentados...* Curitiba: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1987. p.335-44
- COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO - CODI - *Recomendações para aterramento de equipamentos de redes e linhas de distribuição* - Rio de Janeiro: Projeto SCEI.12 - *Aterramento de redes de distribuição* - ELETROBRÁS, 1982. 241p.
- COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO. Departamento de Engenharia de Distribuição. *Cálculo de aterramentos elétricos para redes de distribuição por computador*. São Paulo, 1986. 39p.
- COMPANHIA ENERGÉTICA DE SÃO PAULO. *Instrução técnica unificada para projetos de redes aéreas de distribuição de energia elétrica rural*. São Paulo: CESP, CPFL, ELETROPAULO, 1997. 180p.
- COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ. *Aterramentos na distribuição*. Campinas, 1982. 10p. (Orientação técnica de distribuição OTD 604)
- DAWALLIBI, F., BLATTNER, C.J. Earth resistivity measurement interpretation techniques. IEEE (Inst. Elect. Electron. Eng.) Trans. Power Appar. Syst., v.PAS103, n.2, p.374-82, 1984.
- ENERSUL S.A – Empresa Energética de Mato Grosso do Sul – *Fornecimento de Energia Elétrica. Sistema Monofásico com Retorno por Terra “MRT” Entrada de Serviço*. Orientação Técnica OT-11. Campo Grande-MS. 1987.

- GHOSH, D.P. *The Application of Linear Filter Theory to the Direct Interpretation of Geoelectrical Resistivity. Sounding Measurements*”, Geophysical Prospecting, Vol. 19, 192-217p, 1971.
- GOMES, C.M. *Implantação de Um Sistema de Eletrificação Rural, Monofilar com Retorno por Terra, na Fazenda Experimental Lageado*. 1998,.98p (Dissertação de Mestrado) - Faculdade de Ciências Agronômicas – FCA-UNESP.
- GOMES, D.S.F., MACEDO, F.F., GUILLIOD, S.M. *Aterramento e proteção contra sobre tensões em sistemas aéreos de distribuição*. Rio de Janeiro. Editora da Universidade Federal Fluminense, 1990. 358p.
- GRANDE, L., CORVACAN, J.V. *Sistema monofásico com retorno por terra utilizado pela COPEL*. In: CONFERÊNCIA LATINO AMERICANA DE ELETRIFICACAO RURAL, 1979, Lima.
- HARRISON, L.H. *The effect of reactive components in the measurement of grounding circuits*. IEEE Trans. v.72, part 2, p. 340-45, 1953.
- HARVEY, J.L.W. et. al. *“Single wire earth return high voltage distribution for victorian rural areas”*. Elect & Mech. Eng. Trans., v., n., p.1-11, 1959.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *Guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of ground system*. New York, 1983. 42p.
- KINDERMANN, G & CAMPAGNOLO, S.M. *Aterramento Elétrico*. Sagra, Ed. Porto Alegre, RS, 1995, 214 p.
- KINDERMANN, G. - *Choque Elétrico*. Sagra Ed. Porto Alegre-RS. 1995, 203 p.

- KITAGAWA, N. *A segurança de pessoas face às descargas atmosféricas*. Revista Eletricidade. Moderna, v.11, p.22-6, 1990.
- LEITE, C.M., PEREIRA FILHO, M. L. *Técnicas de aterramentos elétricos*. 5.ed. São Paulo: Officina de Mydia, 1995. 125p.
- LEON, J. A. M. *Sistemas de aterramento, medições, dimensionamento e segurança*. 4.ed. São Paulo: Érico do Brasil Comércio e Indústria, 1982. 206p.
- MACIEL, N.F. *Análise do aterramento da subestação de distribuição num protótipo de sistema monofilar com retorno por terra*. Viçosa, 1982. 24p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
- ORELLANA, E. *Prospeccion geoelectrica en corriente continua*. 2.ed. Madrid: Paraninfo, 1972. 578p.
- PARASNIS, D. S. *Geofísica Minera*, Madrid, Paraninfo, 376 p, 1971. Apud ORELLANA, E. *Prospeccion Geoeléctrica en Corrente Contínua*, 2 ed, Madrid. Editorial Paraninfo S.A.. 1982. 650p.
- PAULA FILHO,W. *Estudo comparativo de vários tipos de eletrodos de aterramento, quanto a capacidade de transporte de carga e resistência elétrica, aplicados ao retorno de corrente pela terra*. São Carlos, 1976. 277p. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Potência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- PEDERSEN, A. *Proteção de equipamentos e sistemas de baixa tensão*. Rev. Eletricidade Moderna v.11, p.28-43, 1990.
- PEREIRA FILHO, M.L. *Aplicação do método de imagens complexas ao cálculo de malhas de aterramento em solos com estratificação horizontal*. São Paulo, 1999. 102p.

- Dissertação (Mestrado em Sistemas de Potência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- PEREIRA Filho, M.L. & CARDOSO, J.R. *Estratificação de Solos Multi-Camadas Usando Filtros Digitais*. In: GROUND`98 International Conference on Grounding and Earthing, Belo Horizonte, 1998.
- RIBEIRO, F.S. - "*O atendimento de produtores de baixa renda - um dilema institucional*". XIV Conferencia Latinoamericana de Eletrificação Rural - XIV CLER. Punta del Este, Uruguay, outubro de 1993.
- RIBEIRO, F.S. *Eletrificação rural de baixo custo*. São Paulo, 1993. 222p. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- RIBEIRO, F.S.; "*Eletrificação Rural ao Alcance de Todos*"; XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - Tecnologia e Aplicação Racional de Energia Elétrica e de Fontes Renováveis na Agricultura; Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Paraíba, Brasil, julho de 1997.
- RODRIGUES, C.G. *A estratificação do solo por método numérico*. *Rev. Eletric. Moderna*, v., p.54-8. 1986.
- RUPPEL. *Elektrotechinche Zeitschrift*, t. XXXIV, p. 645-953, Juin, 1913. Et t. XXXIV, p. 1221, Octobre, 1913. Apud PAULA FILHO, W. *Estudo Comparativo de Vários Tipos de Eletrodo de Aterramento, Quanto a Capacidade de Transporte de Carga e a Resistência Elétrica, Aplicados ao Retorno de Corrente pela Terra*. São Carlos – SP, 1976, 277p. (Dissertação de Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos – USP).

- SANTOS, J.F.M.; "*Política de Eletrificação Rural*"; Tese apresentada à Coordenação dos Programas de Pós-graduação em Engenharia - COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1996.
- SCHIESSER, M. *Bulletin de l'association misse des electicien*. Berna: s.c.p., 1923. 45p.
- SERAPHIM, O.J. *Resistividade e resistência de aterramento em solos da Fazenda Experimental Lageado, Município de Botucatu*. Botucatu, 1992. 112p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.
- SERAPHIM, O.J., PIEDADE JÚNIOR., C. *Influência das características químicas do solo nos valores de resistividade*. Energia Agrícola., v.7, n.3, p.21-32, 1992.
- SHIESSER, M. *Bulletim de L'Association Suisse des Electicien*, Suisse. 1923. 45 p.
- SILVA Jr, A.R., LOPES, D. S., SERAPHIM, O. J. *Valores de resistência de aterramento projetados e medidos*. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE PESQUISAS, 44, 1992, São Paulo. Trabalhos Apresentados... Bauru. Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1993. P. 521-7
- SIMON, W. *El sistema SWER - um interesante método para la electrificación rural*. In: SIMPÓSIO SOBRE ELECTRIFICACIÓN RURAL, 1971, Buenos Aires. Asociación Argentina de Electrotécnica.
- SOTILLE, C.A. *Sistemas monofilares com retorno por terra – Uma proposta de cálculo de aterramento*. In: CONFERÊNCIA LATINO AMERICANA DE ELETRIFICAÇÃO RURAL, 11, Curitiba. 1986, p 347-366.
- TAGG, G.F. *Earth resistances*. London: George Newnes, 1964. 255p.

TENDRIH, L.; "*Experiências com Sistemas de Eletrificação Rural de Baixo Custo: Uma Análise dos Impactos Sócio-Econômicos*"; Tese apresentada a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro para obtenção do grau de mestre em Desenvolvimento Agrícola; Itaguaí, Rio de Janeiro, junho de 1990.

THAPAR, B., GROSS, E.T.B. *Grounding grids for high voltage stations, part IV, Resistance of grounding grids in non uniform soil. IEEE (Inst. Elect. Electron. Eng.) Trans. Power Appar. Syst., v.PAS 82, p.782-8, 1963.*

ZOPPETTI, G. *Tomas de terra. In: -.\ Estaciones transformadoras y de distribuicion. 4.ed. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1972. p.262-76.*