

Medição em Malhas de Terra de Subestações Energizadas, com frequências diferentes de 60 Hz.

Ithamar Sene, AES - Eletropaulo - São Paulo - SP, André L. Lima Rodrigues e Carlos A. Sotille, CETEC - Unilins - Lins - SP, Flávio Faria, Quantum Tecnologia e Inovação - Rio Claro - SP e José Mak, B&M Pesquisa e Desenvolvimento - Campinas - SP.

Resumo - Com o correr do tempo malhas de terra ficam sujeitas a fatores que modificam suas características originais (corrosão, solos ácidos, rompimento de conexões, aumento de potência de curto circuito, etc.) e necessitam ter sua efetividade verificada.

Atualmente, só é possível medir esses sistemas de aterramento, com instalações desenergizadas, desligando-se linhas e subestações e desconectando-se pontos de aterramento.

Tais preparativos exigem desligamentos prolongados, com dificuldades para realização das medições e colocação de eletrodos a grandes distâncias da malha a medir (10 a 12 vezes a diagonal da malha) para evitar interferências na medição.

Este trabalho apresenta proposta de metodologia para rápida avaliação da malha, sem interrupção da continuidade do fornecimento e com segurança para equipamentos e pessoas envolvidas.

O trabalho estabelece ligação entre resultados obtidos em instalações desenergizadas e resultados de experimentos em instalações energizadas.

Visando consolidar dados obtidos, o trabalho considera informações sobre experiências e medições em instalações energizadas por concessionárias e pesquisadores que estudam o assunto.

Palavras-chave - Aterramentos, Malha de Terra, Medições, Segurança, Subestação, Tensões Permissíveis.

I. INTRODUÇÃO

As metodologias já estabelecidas para medições em subestações desenergizadas são impraticáveis para unidades em operação, tanto pelas dificuldades de se desligar a instalação, linhas de transmissão e alimentadores envolvidos, quanto pela complexidade dos serviços para desconexão de cabos pára-raios dessas linhas e também, pela inexistência nas proximidades dessas instalações, de áreas livres para colocação dos eletrodos de ensaios, nas distâncias previstas em Norma.

Além dessas dificuldades, a influência de agentes inerentes aos próprios sistemas elétricos energizados, (tais como indução eletromagnética; correntes parasitas, harmônicos, etc.) não podem ser isoladas e distorcem os resultados das medições obtidas.

Assim, se fazia premente desenvolver metodologia que possibilitasse a realização de medições com a instalação energizada, de forma rápida, segura e confiável.

Para se evitar a interferência de agentes comuns aos sistemas elétricos, procurou-se desenvolver metodologia de medição que utilizasse faixas de frequências diferentes de 60 Hz.

O projeto deveria ainda buscar formas de diminuir a distância necessária para a colocação dos eletrodos de ensaio, uma vez que as subestações da Eletropaulo se situam em áreas densamente povoadas e com pouca disponibilidade de espaços livres para colocação de eletrodos.

II. FORMA DE AVALIAÇÃO PROPOSTA.

O projeto tomou como referência instalações que possuíam todos os dados de projeto e de medições iniciais das malhas de terra instaladas e a partir desses dados, passou a efetuar medições nessas instalações (em frequências diferentes de 60 Hz), em condições de regime energizado, buscando estabelecer comparações com os resultados originais e efetuando eventuais ajustes necessários, para tornar os resultados obtidos confiáveis e compatíveis com os originais.

Por outro lado, buscou verificar o comportamento desses resultados com o aumento da frequência de medição e sua correlação com a medição em 60 Hz.

Para viabilizar as medições houve necessidade de se estudar, projetar e construir um dispositivo protótipo de medição, que possibilitasse medições em várias faixas de frequências.

As medições requeridas para esse dispositivo protótipo seriam as seguintes:

- Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo em que se encontra a malha de terra; (definir utilização da faixa de frequência mais conveniente para essa medição).

- Medição de resistência de aterramento da malha da subestação, pelo método da queda de tensão; (avaliar utilização de frequências na faixa de 20 a 500 KHz).

- Medição das tensões de passo, toque e transferidas, em qualquer ponto da subestação (avaliar utilização de frequências na faixa de 20 a 500 KHz).

- Medição de continuidade elétrica entre elementos vinculados à malha de terra da subestação (avaliar utilização de frequências na faixa de 20 a 500 KHz).

O dispositivo protótipo deveria ainda ser dotado de filtros para compensação de reativos, de forma a minimizar interferências nas medições.

Seria necessário também, que o dispositivo protótipo dispusesse de software interno para viabilizar as medições e de software auxiliar em computador, para efetuar a interface protótipo / computador e tratamento, análise e cálculos dos dados disponibilizados para emissão de relatórios.

III. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO.

O estudo foi desenvolvido por etapas no período de três anos.

- Resistividade do solo.

Inicialmente procurou-se verificar formas de medir a resistividade do solo em instalações energizadas, preferencialmente nas proximidades da malha terra, uma vez que as subestações da Eletropaulo apresentam poucas áreas livres para colocação de eletrodos de ensaios.

Os equipamentos utilizados na medição com subestações desenergizadas (terrômetros) existentes no mercado, efetuam medições com frequências em torno de 120 a 1.500 Hz, e magnitudes de 3,5 mA máximos, atendendo, a princípio, ao que se propõem medir. São próprios para instalações em tensões de até 1000 V e praticamente sem ruídos.

Esses instrumentos operando em baixas frequências (faixa de 100 a 1500 Hz), são atualmente utilizados para medições em instalações desenergizadas; porém, na pesquisa, esses aparelhos foram avaliados em testes preliminares ainda em sua forma convencional de medição, para levantamento de características de resistividade do solo, em áreas internas e externas próximas às subestações, porém, com as instalações energizadas.

Os resultados da resistividade do solo são importantes para o cálculo da malha e confirmação dos resultados esperados para o projeto da mesma.

Nos ensaios de campo foram utilizados e avaliados dois terrômetros, que operavam em faixas de frequência de 270 e 1470 Hz.

- Resistência da malha.

Para a medição da resistência da malha terra, o dispositivo protótipo inicial, dispunha apenas da frequência de 25 KHz.

Após os ensaios preliminares, esse dispositivo foi ampliado para operar com frequências de 25, 50, 100 e 200 KHz em um mesmo aparelho.

No dispositivo protótipo final desenvolvido, foram incorporados recursos para possibilitar medição da resistividade do solo e da resistência da malha, em um único aparelho.

A foto 1 a seguir mostra o dispositivo protótipo desenvolvido, em sua última versão.



foto 1 - Dispositivo protótipo desenvolvido.



foto 2 - Vista da área de controle e aplicação dos ensaios.

A. *Ensaaios.*

- Medição de Resistividade do solo.

Os ensaios de medição de resistividade do solo com a instalação energizada foram realizados com aparelhos convencionais para uso em instalações desenergizadas.

Tais ensaios foram realizados na área interna das subestações, fora do perímetro da malha de terra e a alguns metros da mesma.

Apesar de realizados com a instalação energizada, utilizando-se aparelhos convencionais e na área interna da instalação (a alguns metros fora do perímetro da malha), os resultados se mostraram coerentes e próximos dos valores esperados.

- Medição da Resistência da malha.

Após a avaliação dos resultados obtidos para a resistividade do solo foram iniciados os ensaios de medição da resistência da malha de terra da subestação.

Nessa medição utilizaram-se frequências mais elevadas para os ensaios (faixa de 20 a 500 KHz) e o protótipo foi construído inicialmente com frequência de 25 KHz (escolhida por ser a mais comum entre os geradores de frequência existentes no mercado).

Nos ensaios preliminares a frequência de 25 KHz foi exaustivamente utilizada e auxiliou bastante na definição das tendências mais convenientes para as demais faixas de frequência a inserir no dispositivo.

Após a conclusão do período de ensaios preliminares, foram iniciados os ensaios complementares, com o protótipo já dotado de todas as frequências escolhidas (25, 50, 100 e 200 KHz).

B. *Resultados.*

Para a medição da resistividade do solo internamente à área da subestação e com a mesma energizada, os resultados obtidos foram bastante aceitáveis e próximos dos registrados no memorial de ensaios da instalação.

O aparelho de medição em frequência de 270 Hz, apresentou melhor performance que o em frequência de 1470 Hz, sendo menos sensível a oscilações e interferências proporcionadas pela proximidade da área energizada.

Apesar dessa constatação, para o dispositivo protótipo desenvolvido, foi utilizada a frequência de 1.470 Hz para a medição de resistividade do solo, tomando-se os cuidados necessários para a melhoria do sistema de filtros, visando evitar tais interferências.

O dispositivo protótipo final foi desenvolvido para proporcionar no mesmo aparelho, medição de resistividade

do solo em 1470 Hz (com sistema de filtros melhorado) e medição de resistência da malha em 25, 50, 100 e 200 KHz.

Estudos mostram que em altas frequências (faixas de 20 a 500 KHz), cabos pára-raios das linhas de transmissão, neutros de alimentadores, blindagens e capas metálicas de cabos isolados que chegam à instalação, são vistos pelo sistema de medição, como componentes de impedâncias infinitas, ou seja, na medição esses componentes se comportam como se tivessem sido desacoplados do sistema.

As medições preliminares foram efetuadas com o protótipo inicial, na frequência de 25 KHz e confirmaram a possibilidade de redução dos valores de afastamento dos eletrodos de ensaio, conforme mencionado em trabalho de outra concessionária de energia elétrica que efetuou pesquisa com essa mesma faixa de frequência.

Na frequência de 25 KHz, com os eletrodos de ensaio colocados à distância de 1,25 vez a maior diagonal da malha, já é possível identificar na curva levantada o patamar de estabilização de tensão (resistência da malha).

Nos ensaios com outras faixas de frequência verificou-se que essa distância se reduz à medida que aumentamos a frequência da medição.

Nos ensaios foram levantadas duas curvas para os resultados obtidos, sendo uma sem correção de reativos e outra com correção de reativos através da aplicação de filtros (inserção de capacitores).

Em 25 KHz verifica-se que na curva sem correção; um ponto situado muito próximo da malha (0,5 a 1 metro) apresenta valores iguais ou muito próximos do obtido para o patamar de estabilização (resistência da malha) da curva com correção. Dessa forma, nessa frequência, esse ponto próximo da malha, na curva sem correção, representa a resistência da malha e pode ser obtido com uma única e rápida medição.

Da mesma forma, um ponto muito próximo da malha, na curva com correção, aparenta representar a impedância do sistema sob ensaio; porém como o escopo do projeto visava apenas avaliar a resistência da malha, essa possibilidade não foi avaliada com detalhes e necessitaria ser estudada com maior profundidade para confirmação.

A figura a seguir mostra as curvas obtidas em 25 KHz (utilização do protótipo inicial) para a subestação Santa Maria.

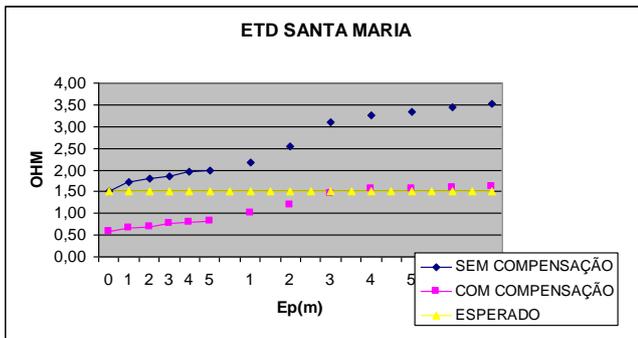


figura 1

Nos ensaios complementares com utilização das frequências disponíveis no aparelho verificou-se que quanto maior a frequência utilizada no ensaio, menor se torna a distância de afastamento necessária para colocação dos eletrodos de ensaio.

A tabela a seguir mostra as distâncias de afastamento necessárias para cada frequência de medição utilizada.

Frequência utilizada (kHz)	Distância necessária de afastamento do eletrodo de corrente
25	1,25 x a maior diagonal da malha
50	0,62 x a maior diagonal da malha
100	0,31 x a maior diagonal da malha
200	0,15 x a maior diagonal da malha

Tabela 1.

Tendo em vista que o procedimento aplicado para instalações desenergizadas exige afastamentos dos eletrodos de ensaio da ordem de 10 a 12 vezes a maior diagonal da malha, verifica-se que a redução dessa distância no caso de utilização de altas frequências é bastante significativa.

A figura a seguir mostra as curvas obtidas para a subestação Barueri, com as diversas frequências utilizadas.

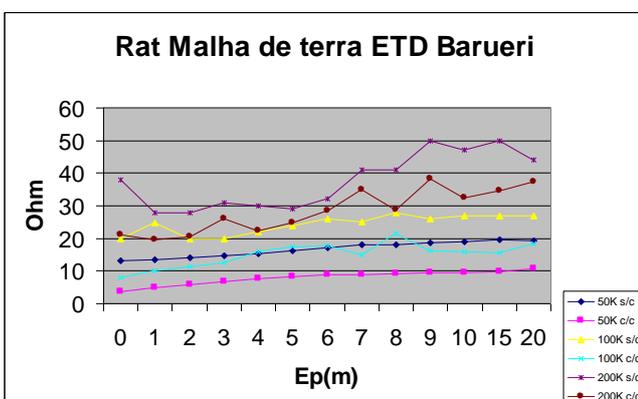


figura 2.

As frequências utilizadas no protótipo servem para efetuar medições em todas as situações, porém algumas delas possuem particularidades que as tornam mais adequadas para determinadas finalidades, a saber:

As frequências de 25 kHz e 50 kHz são mais utilizadas para determinação da resistência da malha, por serem bastante estáveis a quaisquer distâncias da quina da malha e sofrerem pouca interferência de cabos e tubulações enterrados próximos à superfície do solo. Apresentam o inconveniente de exigirem distâncias mais longas para a colocação do eletrodo de corrente.

A frequência de 100 kHz é bastante utilizada para separar (desacoplar) o aterramento de torres de transmissão localizadas próximas da subestação, da malha de terra da subestação, permitindo medir a resistência dessa malha sem a interferência do aterramento da torre.

A frequência de 200 kHz por sua vez, foi utilizada para se ter idéia do comportamento da malha da subestação em situações de transitórios de alta frequência (chaveamentos e descargas) e se aproximar o máximo possível da resposta da malha a descargas atmosféricas, já que essa frequência impõe a circulação de correntes mais superficiais.

Durante os ensaios com a frequência de medição de 25 kHz, foi constatado que para referir os valores de resistência obtidos nessa frequência, a uma frequência próxima de 60 Hz (na medição desenergizada utilizam-se desde 60 Hz com altas correntes a até múltiplos como 270 Hz, 500 Hz, etc. com baixas correntes) basta multiplicar os valores obtidos por um fator muito próximo de 1,0 (um), o que equivale a dizer que, a medição de 25 kHz, ou outra em torno dessa frequência, reproduz uma medição feita com frequência próxima de 60 Hz.

A comparação entre as curvas levantadas nas mesmas subestações para as frequências de 25 kHz e 50 kHz, mostrou que existe uma relação constante entre os valores obtidos para essas curvas, onde o valor em cada ponto para a frequência de 50 kHz, corresponde ao valor do mesmo ponto na frequência de 25 kHz, multiplicado pelo fator 1,53.

Da mesma forma, o valor em cada ponto para a frequência de 100 kHz, corresponde ao valor do mesmo ponto na frequência de 25 kHz, multiplicado pelo fator 2,25.

Para a frequência de 200 kHz, o valor correspondente é o valor obtido na frequência de 25 kHz, multiplicado pelo fator 6,50.

A tabela a seguir sintetiza essas informações.

Frequência de ensaio	Correspondência em 25 kHz	Correspondência em 60 Hz
25 kHz	Valor obtido / 1,0	Valor obtido / 1,0
50 kHz	Valor obtido / 1,53	Valor obtido / 1,53
100 kHz	Valor obtido / 2,25	Valor obtido / 2,25
200 kHz	Valor obtido / 6,50	Valor obtido / 6,50

Tabela 2

Os fatores de correção citados, ainda podem sofrer pequenas alterações de valores, visto que o universo da

pesquisa (quantidade de ensaios realizados) ainda é bastante restrito e com a continuidade de ensaios em outras instalações e mesmo em outras concessionárias, esse universo tende a expandir-se, trazendo possibilidades de avaliações mais precisas para esses fatores.

C. Equipotencialidade.

A verificação da equipotencialidade de pontos da malha possibilita identificar de forma rápida e simples, as condições de continuidade e das conexões da malha.

Para o ensaio de equipotencialidade, o eletrodo de corrente não necessariamente, precisa estar situado no ponto remoto, mas sim, a qualquer distância (mínimo de 0,5 vez a maior dimensão da malha) fora do perímetro da malha.

Por sua vez, o eletrodo de potencial deverá ser fixado entre a periferia da malha e o eletrodo de corrente, também em ponto aleatório.

O eletrodo de terra será utilizado para tocar os diversos pontos metálicos (estruturas, suportes, cercas, alambrados, etc.) da subestação, visando verificar as condições de suas conexões à malha terra, comparativamente a um valor de referência, tomado em ponto notável da malha (por exemplo o ponto de injeção de corrente na medição da resistência de aterramento).

Deslocando-se pelo interior da subestação com o dispositivo de medição e tocando-se outros pontos de aterramento, verifica-se a tensão registrada no aparelho.

Se o resultado for igual ou próximo da tensão de referência inicial anotada (são admissíveis variações até 20% maiores que o valor inicial verificado) o ponto estará rigidamente conectado à malha terra.

Exemplo: A tensão de referência encontrada no ponto de injeção de corrente na malha foi de 15 volts.

Os demais pontos verificados nas proximidades devem apresentar leituras de até 18 volts (20%) para serem considerados como firmemente ligados à malha (pequenas diferenças podem ser causadas pelo contato imperfeito durante o toque ou por leves variações de potenciais entre quadrículas da malha).

Um ponto próximo que apresente leitura de 20 volts já se torna suspeito e deve ter sua conexão abaixo do solo descoberta e inspecionada.

Se o valor encontrado for totalmente diferente (valor muito maior) da tensão de referência, o ponto possivelmente não estará conectado à malha, ou se estiver, sua conexão se encontra comprometida e necessita ser verificada.

Toda vez que não se consiga com a extremidade do conector de terra tocar um determinado ponto de terra que se deseje verificar (deslocamentos grandes do instrumento

dentro de malhas extensas), os eletrodos de corrente e potencial devem ser mudados de posição para local mais próximo da malha, porém ainda fora dos limites da mesma, devendo, nesse caso, ser medida novamente a tensão de referência no ponto de injeção de corrente, para possibilitar que o ensaio continue a ser aplicado corretamente para os demais pontos a serem testados.

Esse ensaio possibilita verificar as condições das conexões da malha terra da subestação, de forma rápida e segura, mesmo com a instalação energizada, não oferecendo riscos para sua execução.

Permite ainda verificar a continuidade dos aterramentos de cercas e alambrados, sua efetividade com relação a conexão à malha e possíveis riscos para usuários de áreas próximas, devido transferência de potenciais perigosos.

D. Tensão de toque e passo.

O aparelho de medição possibilita verificar as tensões de toque e passo em pontos da subestação, através dos seguintes procedimentos:

-Tensão de toque.

A verificação da tensão de toque em pontos da subestação deve ser feita da seguinte forma:

Conecta-se o terminal de terra, ao ponto terra do equipamento.

Posiciona-se o eletrodo de corrente em qualquer ponto fora dos limites da malha.

Posiciona-se o eletrodo de potencial a uma distância de 1m do equipamento / ponto de terra a ser avaliado.

O valor indicado pelo instrumento na frequência de 25 kHz, com compensação de reativos, é numericamente igual ao valor da tensão de toque em volt / ampère de corrente a ser injetada na malha no ponto referido.

-Tensão de passo.

A verificação da tensão de passo em 02 pontos quaisquer (P1 e P2) da subestação, afastados de 1m, deve ser feita da seguinte forma:

Conecta-se o terminal de terra a um ponto de terra mais próximo dos pontos a serem avaliados.

Posiciona-se o eletrodo de corrente em qualquer ponto fora dos limites da malha.

Posiciona-se o eletrodo de potencial em um dos pontos a ser avaliado (P1).

Efetua-se a medição, na frequência de 25 kHz, do valor visto pelo instrumento, com compensação de reativos.

Posiciona-se o eletrodo de potencial no ponto P2 a 1 m do ponto P1.

Efetua-se a medição, na frequência de 25 kHz, do valor visto pelo instrumento, com compensação de reativos.

A diferença entre os valores indicados pelo instrumento, nas duas medições, com compensação de reativos, é numericamente igual ao valor da tensão de passo em volt / ampère de corrente a ser injetada na malha.

E. Segurança nos ensaios.

Os ensaios propostos na nova metodologia para medição em malhas de terra de instalações energizadas podem ser realizados em condições de tempo bom ou mesmo sob chuva.

Em condição de tempo chuvoso, recomenda-se (apenas como precaução) suspender os ensaios se houver ocorrência de descargas atmosféricas.

Na aplicação da nova metodologia, é recomendada a utilização de EPIs convencionais (bota, capacete, óculos de segurança e luvas adequadas vaqueta / isolante) para os executantes dos ensaios.

Como a aplicação desses ensaios não exige desconexão de cabos de aterramento ou similares, os riscos para os executantes dos mesmos são praticamente inexistentes.

Por outro lado, as correntes utilizadas no protótipo são de magnitudes reduzidas (25 mA na injeção de corrente para medição da malha de terra e 5 mA na medição da resistividade do solo).

Dessa forma, os riscos na utilização do protótipo e na aplicação dos ensaios são mínimos.

As correntes utilizadas no caso dos ensaios realizados com a nova metodologia, são desprezíveis se comparadas às elevadas correntes (correntes de até 100 A) utilizadas nos ensaios com aparelhos convencionais para instalações desenergizadas.

Os cabos lançados externamente à área da subestação, para os eletrodos de corrente e potencial, apesar de não oferecerem risco eminente, devem por precaução, serem supervisionados durante os ensaios, para evitar proximidade de pessoas ou animais durante esse período.

Com a utilização da nova metodologia de medição, os eletrodos de ensaios são colocados a distâncias bastante reduzidas comparativamente às necessárias para as medições convencionais.

Essa característica possibilita que a totalidade dos circuitos utilizados no ensaio se concentrem em área próxima da subestação e possam ser controlados visualmente, evitando riscos de acidentes com terceiros.

Os ensaios em malhas de terra de subestações em regime energizado, da forma como foram propostos e estão sendo executados, não oferecem nenhum risco aos executantes das tarefas e a pessoas e animais porventura próximos aos locais de ensaios, não sendo necessárias quaisquer medidas adicionais de segurança como prevenção.

F. Software.

O software necessário para utilização tanto no protótipo quanto em computador, foi desenvolvido pelos parceiros no projeto Alstech, CETEC - FPTE - UNILINS.

Houve necessidade de desenvolvimento de software dedicado para o dispositivo protótipo, visando dotar o mesmo de condições para executar a seqüência de operações necessária aos ensaios, registrar e armazenar dados de medições, possibilitar operações de medição em regime automático ou manual, efetuar autodiagnóstico das funções internas, indicar situação de carga da bateria, identificar eventuais erros de procedimento alertando o usuário, etc.

Também foi desenvolvido software dedicado para utilização em computador, visando possibilitar retirada de dados registrados no protótipo, realização de cálculos, elaboração ou alteração de desenho da malha, mapeamento de potenciais, análise e avaliação de resultados, emissão de relatórios de ensaios, etc.

Os softwares desenvolvidos são de uso exclusivo para utilização com o equipamento adquirido.

IV. REFERÊNCIAS.

[01] WENNER, F. - "A method of measuring earth resistivity". Report no.258 Bulletin of the Bureau of Standards. Vol.12, n°.3, pp. 469-482, feb, 1916

[02] TORPOV, A.K. - "Measurement of the resistance of the ground connections of a 220-110 kV substation with actual short-circuit currents". CIGRE. Report n°. 332, 1937

[03] LAURENT, P. - "Les Bases Generales de la Technique des Mises a la Terre dans les Installations Electriques". Le Bulletin de la Societé Françoise des Electriciens. 1951

[04] LANGER, H. - "Measurement of ground potentials in a 220 kV substation". Elektrotechnische Zeitschrift. Vo.75, pp.97-105, 1954.

[05] SCHWARZ, S.J. - "Analitical Expression for the Resistance of Grounding Systems". AIEE Transactions. August,1954.

- [06] CURDTS, R.B. - "Some of the fundamental aspects of ground resistance measurement". AIEE Trans. on PAS. Vol.77 part I, pp.760-767, 1958.
- [07] DUKE, C.A. and SMITH, L.E. - "The technique and instrumentation of low-impedance ground measurement". AIEE Trans. on PAS. Vol.77 part I, pp.767-770, 1958.
- [08] KINYON, A.L. - "Correlation of measured and calculated substation ground grid resistance". AIEE Trans. On PAS. Vol.78, part I, pp.698-701, 1959.
- [09] ENDRENYI, J. - "Evaluation of resistivity tests for design of station grounds in non uniform soil". IEEE Trans on PAS. Vol.82, December 1963.
- [10] TAGG, G.F. - "Measurement of earth-electrode resistance with particular reference to earth-electrode systems covering a large area". Proc. IEE. Vol.111, n^o.12, december, 1964.
- [11] SUNDE, E.D. - "Earth conduction effects in transmission systems". Book - Dover. New York -1968-2^a.ed.
- [12] LAURENT, P.G. - "Guide sur le Calcul, l'Exécution et la Mesure des Prises de Terre". Revue Generale d'Electricité. Juilliet-Aout, 1972.
- [13] ATKINSON & DIXON - "Earthing Practice in United Kingdon and Overseas Compared". Electrical Times. March 23, 1972, pp. 53.
- [14] DALZIEL, C. - "Electric Shock Hazard". IEEE - Spectrum. pp. 41 - 50 February, 1972.
- [15] RÉMOND - "La Sécurité dans les Installations Electriques". Revue Générale de l'Électricité. Tome 82, n^o 5, Mai 1973.
- [16] IEC - 479 - "Effects of Current Passing Through the Human Body". IEC. 1974.
- [17] BOGUSHEVICH, V. , GURRICH, S. , SKOLOTNEX, T., SHISHKIN, Y. - "Primary Criteria of Electrical Safety for Momentary 50 c/s Currents". Elektrichestvo. N^o 5, pp. 65-68, 1975.
- [18] IEEE 80 - "Guide for safety in alternating-current substation grounding". IEEE. 1961, 1971, 1976, 1986.
- [19] DAWALIBI, F. and MUKHEDKAR, D. - "Ground electrode resistance measurement in nonuniform soils". IEEE Trans. Paper T-73-361-3.
- [20] DAWALIBI, F. and MUKHEDKAR, D. - "Transferred earth potentials in power systems". IEEE Trans. On PAS. Vol.97 no.1,pp.90-101, feb,1978.
- [21] HEPPE, R.J. - "Step potentials and body currents near ground in two layer earth". IEEE - Trans. On PAS. Vol.98 n^o.1 1979.
- [22] REYNOLDS, P.H., IRONSIDE, D.S., SILCOCKS, A.H., WILLIAMS, J.B. - "A new instrument for measuring ground impedance". IEEE PES Winter Meeting. Paper A79080-3 New York February 1979.
- [23] SVERAK, J.G. et al - "Safe substation grounding". IEEE - Trans. On PAS. Vol.100 n^o.9 1981.
- [24] LU, I.D., SHIER, R.M. - "Application of a digital signal analyser to the measurement of power system ground impedances". IEEE Trans. On PAS. Vol.100 n^o.4 - pp.1918 -1922 - april 1981.
- [25] IEEE - Std 81 - "IEEE Guide for measuring earth resistivity, ground impedance and earth surface potentials of a ground system". IEEE. New York -1983.
- [26] SALOMON, D. e NAHMAN, J. - "Analitical Expressions for the Resistance of Grounding Grid in Nonuniform Soil". IEEE Trans. on PAS. Vol.103, april,1984.
- [27] PORTELLA, C.J.M. - "Determinação das resistências de contato com o solo levando em conta camadas de brita". IX SNPTEE. Belo Horizonte - BR - 1987.
- [28] DICK, W.K. and WINTER, D.F. - "Computation, measurement and mitigation of neutral-to-earth potentials on electrical distribution systems". IEEE Trans. Power Delivery. N^o.2 - 1987
- [29] PAPALEXOPOULOS, A.D. and SAKIS MELIOPOULOS, A.P. - "Frequency dependent characteristics of ground systems". IEEE Trans. on power delivery. Vol.PWRD2 n^o.4 pp 1073 -1081 october 1987.
- [30] SOBRAL, S.T., SANTOS, J.J.H., MUKHEDKAR, D. - "A proposal for ground measurement techniques in substations fed exclusively by power cables". IEEE Trans. On power delivery. Vol.PWRD3 n^o.4 pp 1403-1409 october 1988.
- [31] SIQUEIRA, M.L.S., RIBEIRO, J., CAMARGO, C.C.B., FIGUEIREDO, D.D., SOBRAL, S.T., LEITE, D.M. - "Medição rápida de parâmetros elétricos do sistema de aterramento de subestações da Eletrosul pelo método de injeção de alta corrente". X SNPTEE. Curitiba - BR - 1989.
- [32] TAKAHASHI, T., KAWASE, T. - "Analysis of apparent resistivity in a multi-layer earth structure". IEEE Trans. On Power Delivery. Vol.5 n^o.2 april 1990.

- [33] GROVES, M.F. - "Ground mat resistance testing procedures". Western Area Power Administration. Maintenance Manual - Colorado 1990.
- [34] PILLAI, P.R., DICK, E.P. - "A review on testings and evaluating substation grounding systems". IEEE Trans. Vol.7 n°.1 January 1992.
- [35] ANSI/IEEE Std 81 - Part II - Measurement of impedance and safety characteristics of large, extended or interconnected grounding systems - "test current reversal method" - "safety practices". ANSI/IEEE. p.29 - 31 and p.11 - 12 June 1992.
- [36] ABNT-COBEI - 1°. Projeto de Norma - "Medição da resistência de aterramento e dos potenciais na superfície do solo". ABNT-COBEI Projeto 03:102.01-002 - São Paulo, 1993.
- [37] ABNT-COBEI - 1°. Projeto de Norma - "Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo". ABNT-COBEI Projeto 03:102.01-004 - São Paulo, 1993.
- [38] GALINDO, R.V., MOURA, A.E. - "A Experiência CELPE com os ensaios de corrente injetada em malhas de aterramento com subestações energizadas". I SEMASE. GSU 08 - Foz do Iguaçu - BR - 1995.
- [39] ROCHA, P.S.A. et al - "Teste de injeção de corrente em malhas de aterramento de subestações energizadas". XIV SNPTEE. GSU 1 - Belém - 1997.
- [40] GRCEV, L., ARNAUTOVSKI, V. - "Frequency dependent and transient impedance of grounding systems: comparison between simulation and measurement". Lightning and Mountains'97. pp 239-244 Chamonix 1997.
- [41] LEE, C.H., SAKIS MELIPOULOS, A.P. - "A comparison of IEC - 479 - 1 and IEEE - Std 80 on grounding safety criteria". Proceedings Natl.Sci.Council. Vol.23,n°.5 pp 612-621 1999.
- [42] MOHAMAD NOR, N., HADDAD, A., GRIFFITHS, H. - "Factors affecting soil characteristics under fast transient". International Conference on Power Systems Transients. IPST2003 - New Orleans - USA.
- [43] NAKAGAWA, F., e outros - "Procedimentos, Técnicas e Critérios para Recepção e Manutenção de Malhas de Aterramento de Subestações". SCM - 1/GCOI, 1.995.