

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 passar do tempo as malhas de terra ficam sujeitas a vários fatores que modificam suas características originais (corrosão, solos ácidos, rompimento de conexões, aumento de potência de curto circuito no sistema elétrico, etc.) e necessitam ser medidas para verificar sua efetividade. Atualmente, só é possível efetuar medições nesses sistemas de aterramento, com as instalações desenergizadas, com desligamentos de linhas e subestações e desconexão de pontos de aterramento.

Esses preparativos e ensaios exigem desligamentos prolongados das instalações e introduzem sérias dificuldades para a realização das medições. Exigem ainda, colocação dos eletrodos de ensaio a grandes distâncias da malha a ser medida (10 a 12 vezes a maior diagonal da malha) para evitar interferência da mesma na medição.

Algumas concessionárias de energia elétrica têm buscado desenvolver técnicas que possibilitem medições com as instalações energizadas; porém, existem obstáculos que comprometem a qualidade dos resultados dos ensaios, tais como interferências eletromagnéticas nos instrumentos utilizados e nas leituras realizadas, exposição a riscos (segurança pessoal e aparelhos utilizados), bem como longo tempo de execução dos ensaios.

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

Durante o desenvolvimento do trabalho, procurou-se estabelecer ligação entre os resultados obtidos com utilização dos procedimentos atuais e resultados de experimentos realizados em instalações energizadas. Visando consolidar dados obtidos nos ensaios de campo o trabalho procurou considerar informações sobre experiências e medições realizadas em instalações energizadas por concessionárias de energia elétrica, 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 evitar-se a interferência de agentes comuns aos sistemas elétricos procurou-se desenvolver metodologia de medição utilizando-se 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.

Esse dispositivo protótipo deveria possibilitar as seguintes medições:

- Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo em que se encontra a malha de terra; (frequência de 270 ou 1470 Hz).
- Medição de resistência de aterramento da malha de subestação, pelo método da queda de tensão; (possível nas frequências de 25, 50, 100 e 200 KHz).
- Medição das tensões de passo, toque e transferidas, em qualquer ponto da subestação (possível nas frequências de 25, 50, 100 e 200 KHz).
- Medição de continuidade elétrica entre elementos vinculados à malha de terra da subestação (possível nas frequências de 25, 50, 100 e 200 KHz).

O dispositivo protótipo possui filtros para compensação de reativos, de forma a minimizar interferências nas medições.

O dispositivo dispõe 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.

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 avaliados terrômetros que operavam em faixas de frequência de 270 e 1470 Hz.

Já para 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.

A. Ensaios.

Após a avaliação dos resultados obtidos para a resistividade do solo utilizando-se aparelhos convencionais para medições próximas à malha terra e com a instalação energizada, foram iniciados os ensaios de medição da resistência da malha terra da subestação. Nessa medição utilizaram-se frequências mais elevadas para os ensaios (faixa de 20 a 450 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 para indicar a tendência mais conveniente 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.

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.

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 para a subestação Santa Maria.

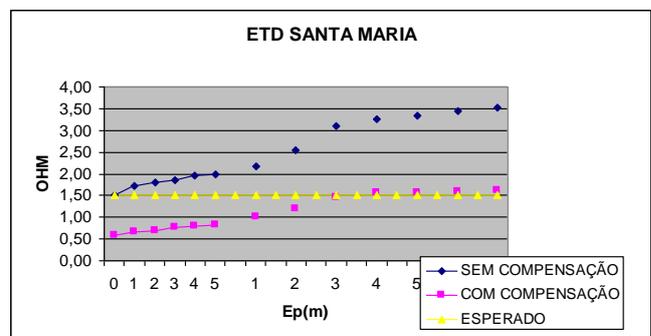


figura 1

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.

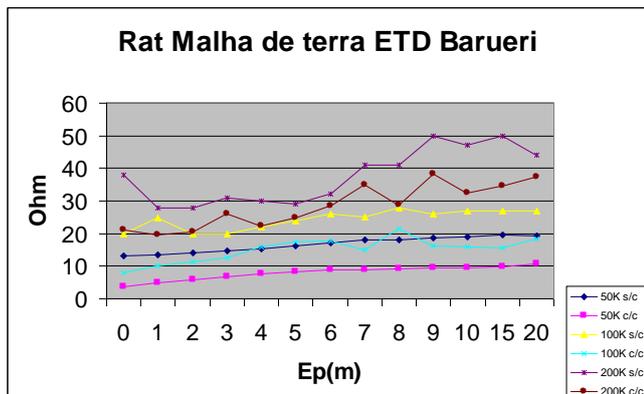


figura 2.

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, devido 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 3

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 correspondente ao terra remoto, é fixado a uma distância mínima de 1,5 vezes a maior distância da malha, e conectado a um dos bornes do aparelho de ensaio. A outra extremidade do fio terra conectada ao borne de saída do aparelho de ensaio, é utilizada para tocar os diversos pontos metálicos (estruturas, suportes, cercas, alambrados, etc.) da subestação, visando verificar as condições de suas conexões à malha terra.

Tocando diretamente o cabo da malha terra; utilizado como referência de injeção de corrente, verifica-se a tensão de referência inicial.

Tocando-se outros pontos metálicos da subestação verifica-se a tensão registrada no aparelho.

Se o resultado for igual ou próximo da tensão de referência inicial anotada o ponto estará rigidamente conectado à malha terra.

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

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

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 Societe Francaise 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. - "Analytical 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 nonuniform 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°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 Kingdom 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° 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° 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°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°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°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. - "Analytical 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°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°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°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°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 - 1º. 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,nº.5 pp 612-621 1999.
- [42] MOHAMAD NOR, N., HADDAD, A., GRIFFITHS, H. - “Factors affecting soil characteristics under fast transien”. 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.