



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GSE/29
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTO DE ALTA TENSÃO - GSE

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE MODELOS DE SISTEMAS DE ATERRAMENTOS SOB SOLICITAÇÕES IMPULSIVAS

A. B. Almeida Jr. (*)	P. H. O. Rezende	I. N. Gondim	M. V. B. Mendonça	J.C. Oliveira	L.M. Neto
IFTM/UFU	UFTM/UFU	UFU	UFTM	UFU	UFU

RESUMO

Este informativo visa apresentar uma síntese das principais propostas para representação de sistemas de aterramento utilizados nas redes de distribuição de energia elétrica, quando submetidos a distúrbios com características impulsivas. Adicionalmente ao presente estado da arte sobre o tema e respectivos modelos em prática, a contribuição técnica em foco ainda avança no sentido de propor uma estratégia alternativa para a melhoria do desempenho da representação dos mencionados sistemas. Para fins da avaliação do comportamento comparativo dos modelos existentes e do proposto, procede-se a estudos investigativos tomando por base informações derivadas de ensaios experimentais.

PALAVRAS-CHAVE

Modelagem computacional, Sistemas de aterramentos, Descargas atmosféricas, Qualidade da Energia.

1.0 - INTRODUÇÃO

O aterramento elétrico pode desempenhar diversas funções no sistema elétrico. Dentre essas funções pode-se destacar sua função voltada para a segurança de pessoas e equipamentos, além de sua atuação efetiva como referência de potencial elétrico (1) e (2).

Uma prática comum das concessionárias de energia consiste no emprego de aterramentos simples (de 1 a 3 hastes verticais de extensão relativamente pequenas) no neutro da entrada da unidade consumidora, fato este que conduz a valores da resistência de aterramento, geralmente, da ordem de dezenas até centenas de ohms. O emprego de meios simplificados para a realização dos aterramentos, como o aqui referido, pode, por conseguinte, resultar num efeito traduzido na forma da ionização do solo em torno dos condutores enterrados. Este fenômeno possui fortes implicações sobre a resistência de aterramento, na forma da redução de seu valor e, nestas condições, quando da manifestação de certos fenômenos anômalos, a impedância transitória pode ser compreendida como aquela definida pela relação entre os valores máximos de tensão e corrente no ponto de tomada de terra do aterramento (3) e (4). Observa-se portanto que, sob tais condições de operação, as impedâncias oferecidas pelos aterramentos não correspondem aquela tradicionalmente determinada sob condições de regime permanente à 60 Hz (5).

Segundo (6), (7) e (8), a não-linearidade da impedância de sistemas de aterramentos, por ocasião de uma descarga de surto para o solo, depende de vários aspectos, incluindo: dimensões e geometria do aterramento, os quais determinam parâmetros relacionados com a densidade de carga; parâmetros da corrente de descarga, tanto como valores de pico da corrente como o tempo da descarga; distribuição da corrente em um sistema de aterramento, o qual depende, do ponto onde a corrente entra no sistema; mudanças periódicas na resistividade do solo; alteração de grandezas físicas durante a descarga atmosférica, tais como a resistência e indutância. Estes

(*) Av. João Naves de Ávila, n°2121, UFU–Sta. Mônica, sala 114, Bloco 3N, CEP 38.400-902, Uberlândia, MG – Brasil
Tel: (+55 34) 3239-4763 – Fax: (+55 34) 3239-4704 – Email: afonso@iftm.edu.br

fatores de influência, de forma isolada ou coletiva, podem pois impactar decisivamente sobre os valores das impedâncias representativas dos sistemas de aterramento, fato este motivador do presente trabalho.

De forma pontual, o presente informe técnico encontra-se centrado na apresentação de uma síntese das propostas de modelagem existentes para os sistemas de aterramento e, a partir destes, propor e avaliar o desempenho de uma representação modificada, à luz de resultados derivados de ensaios experimentais (9). Utilizando destes modelos, devidamente implementados no simulador ATP, procede-se aos estudos computacionais de desempenho entre as estratégias teóricas, tomando por base grandezas de referência extraídas de estudos laboratoriais, fato este que oferece uma fundamentação sólida para a análise da consistência das investigações em pauta e a ratificação da eficácia da representação ora feita.

2.0 - MODELOS DE SISTEMAS DE ATERRAMENTOS

Segundo (10), as representações dos sistemas de aterramento podem ser divididas em modelos de eletrodos com parâmetros lineares ou não-lineares, assim como também, concentrados ou distribuídos. A adoção pela utilização de parâmetros lineares ou não-lineares está atrelada a magnitude da corrente que escoar pelo eletrodo, sendo esta última opção aquela recomendada quando da manifestação de situações e estudos que conduzem ao fenômeno da ionização do solo. Já a seleção por parâmetros concentrados ou distribuídos está vinculada com a relação entre a frequência da corrente escoada e o comprimento do eletrodo, fato este que determina que os modelos através de parâmetros concentrados são aceitáveis quando o comprimento de onda da corrente que o percorre é bem maior que o comprimento do eletrodo. Estas questões são consideradas em maiores detalhes nas discussões que seguem.

2.1 Modelos com parâmetros lineares

Os modelos de sistemas de aterramento que utilizam parâmetros lineares são caracterizados por uma ou mais resistências com valores constantes (10) e esta consideração aproxima-se da realidade quando não há o fenômeno da ionização do solo. Alguns autores complementam esta configuração com indutâncias, formando um conjunto de resistências e indutâncias representativas dos eletrodos, além das resistências de terra (10) e (11).

2.2 Modelos com parâmetros não-lineares

A adoção de parâmetros não-lineares para representar o comportamento de sistemas de aterramento está vinculada ao fato que, quando da ocorrência de fenômenos que provoquem a circulação de uma elevada corrente passando pelo eletrodo, o campo elétrico nas áreas próximas do mesmo pode atingir níveis críticos que podem resultar em descargas parciais (12).

Os modelos concebidos até então para a representação através de parâmetros não-lineares visam, sobretudo, as análises de sistemas de aterramento percorridos por correntes impulsivas. Neste sentido, em (13) é feita uma proposta de representação dinâmica capaz de descrever o comportamento não-linear entre a tensão e a corrente em eletrodos de aterramento concentrados. Assumindo um solo homogêneo e isotrópico, esta referência considera que, à medida que a corrente escoada pelo eletrodo se eleva, pode surgir uma região onde a densidade de corrente se torne maior ou igual a um valor crítico ($J \geq J_c$) e a resistividade “p” passe, então, a apresentar um valor inferior a p_0 , sendo p_0 a resistividade do solo sem ionização.

Após a redução da corrente de surto, de modo que J seja menor que J_c e a resistividade seja igual a um valor mínimo p_i , a resistividade retorna ao seu valor original p_0 , demonstrando assim a dependência deste parâmetro do solo com o tempo e a densidade de corrente.

Através desta proposta, os autores conceberam a ideia que o solo, ao redor do eletrodo de aterramento, se apresenta na forma de três regiões, conforme ilustra a Figura 1. A região “a” define o ambiente onde não ocorre o fenômeno da ionização do solo, ou seja, o valor original da resistividade é mantido. As regiões “b” e “c” representam as partes do solo onde a modificação da resistividade do solo foi percebida. Aquela identificada como região “b” corresponde a zona de desionização. Ainda, na Figura 1 pode-se observar o modelo adotado em (13) para as superfícies equipotenciais. A área dessas superfícies é definida pela soma da superfície cilíndrica e a hemisférica.

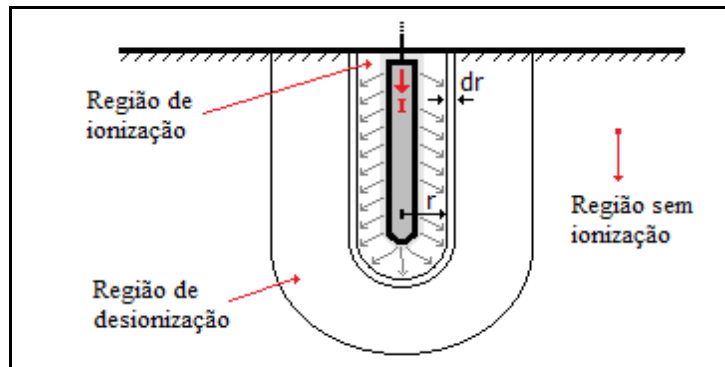


FIGURA 1 – Modelo proposto por (13).

Portanto, a resistência total de um aterramento é obtida por meio da soma de todos os elementos de superfície, partindo da superfície do eletrodo até o infinito. Em assim sendo, num determinado instante após a ionização, cada elemento de superfície terá um valor distinto de resistividade. Desta maneira, a resistência total, para um específico momento, pode ser calculada a partir da soma das resistências de cada elemento. Este processo de cálculo deve ser realizado para os diferentes instantes de ocorrência do surto, conforme salientado por (14).

Em (9), os autores apresentam outro modelo dinâmico para representar sistemas de aterramento através de elementos a parâmetros concentrados quando do estabelecimento de correntes impulsivas nos eletrodos. Esta proposta corresponde a uma extensão da representação anterior, a qual considera situações em que elevadas correntes resultam em caminhos discretos de ruptura no solo e na sua superfície. Esta observação não havia sido contemplada no trabalho precedente. Neste modelo observa-se que, à medida que o impulso de corrente penetra no solo, a decomposição química começa onde a densidade de corrente atinge o maior valor, e continua, até o ponto em que a densidade de corrente decai abaixo de um valor crítico (J_c). Ao mesmo tempo, arcos elétricos aparecem, os quais produzem a formação de caminhos irregulares de condução elétrica ao longo do solo, e ainda, as conduções aumentam conforme o incremento da densidade de corrente. Uma vez que a densidade de corrente supera um valor limite (J_s), intensas conduções elétricas e descargas parciais são geradas.

Como já esclarecido, três regiões do solo são consideradas para a estratégia supra posta: uma de ionização, outra de desionização e uma terceira associada com a não-ionização. Em (9), além destas três, uma nova região é assumida, para a qual ocorrem descargas elétricas com intensas conduções de corrente e, por tal motivo, a resistividade chega a valores próximos de zero. Esta nova subdivisão é indicada na Figura 2.

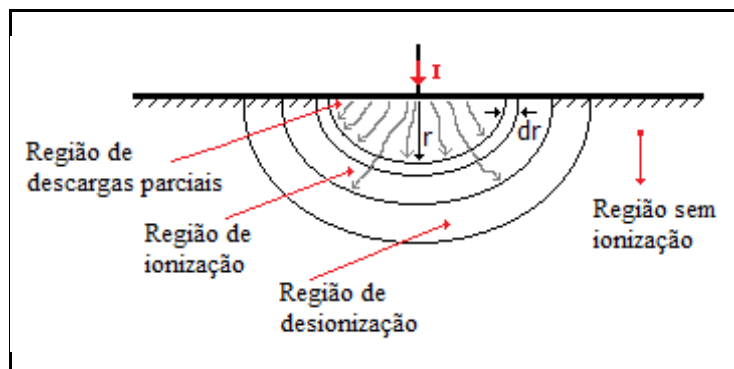


FIGURA 2 – Modelo proposto por (9).

Dentro dos critérios estabelecidos, nenhuma ruptura no solo acontece quando $J < J_c$. Por outro lado, há manifestação da ruptura dielétrica por ionização quando $J_c \leq J < J_s$, e ainda, pode-se detectar ruptura intensas se $J \geq J_s$.

Por fim, em (9) fica demonstrado que o modelo apresenta resultados satisfatórios da variação da resistividade em casos de incidências diretas de descargas atmosféricas no solo. Entretanto, o mesmo, na forma originalmente concebida, possui uma limitação no que tange a sua utilização em situações que impliquem na passagem da corrente de surto em eletrodos de aterramento. Isto está atrelado aos valores assumidos pela resistividade do solo antes da ocorrência do fenômeno da ionização.

2.3 Modelo modificado proposto

Visando contornar a mencionada restrição supra indicada, considerou-se que o modelo anterior pode ser adequado

a partir de uma alteração na área da superfície equipotencial. Isto conduz a adoção de uma área equivalente definida pela soma de duas superfícies: uma hemisférica e outra cilíndrica. Isto feito, fica evidenciada uma melhoria na representação da geometria da haste de aterramento, como proposto em (13) e, à luz do exposto, a geometria resultante das superfícies equipotenciais e as regiões do solo consideradas para a caracterização do modelo passam a se apresentar nos termos indicados na Figura 3. Esta variante da modelagem, constituída meramente pela composição de princípios atrelados com os dois métodos não-lineares aqui discutidos, passa a ser designada por Modelo Não-Linear Modificado, o qual se apresenta como um pequeno passo inovador ao processo.

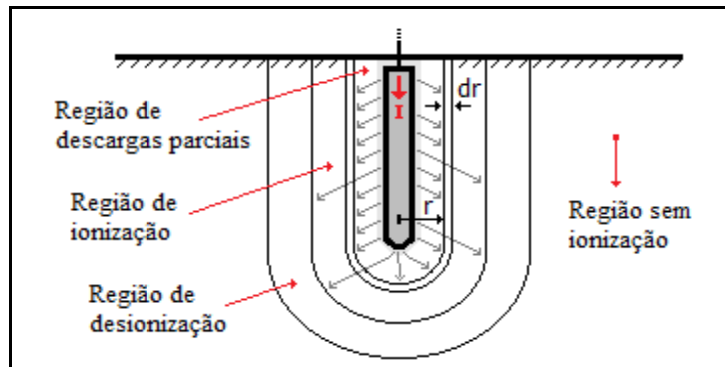


FIGURA 3 – Modelo não-linear modificado.

3.0 - ANÁLISE COMPUTACIONAL COMPARATIVA DOS MODELOS DE ATERRAMENTO

Objetivando avaliar, comparativamente, o desempenho dos modelos para o sistema de aterramento contemplados anteriormente, as quatro estratégias acima indicadas foram, então, implementadas no simulador ATP, utilizando-se, para tanto, dos recursos da linguagem MODELS de programação.

Para fins do estabelecimento das bases para o processo de análise comparativa, empregou-se dados experimentais extraídos de (9), os quais encontram-se atrelados com as respostas de uma estrutura física composta por uma haste de aterramento, com as características apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características do sistema de aterramento utilizado nos ensaios experimentais conduzidos em (9)

Resistividade do solo [Ωm]	Raio do eletrodo [mm]	Comprimento do eletrodo [m]
270	6,35	0,61

Através da imposição de um impulso de corrente, produzido em ambiente laboratorial, a referência supra identificada conduziu aos resultados para a tensão e corrente mostrados na Figura 4. Esta permite extrair as grandezas associadas com as variações das resistências do sistema de aterramento, em função da corrente, como ilustrado na Figura 5.

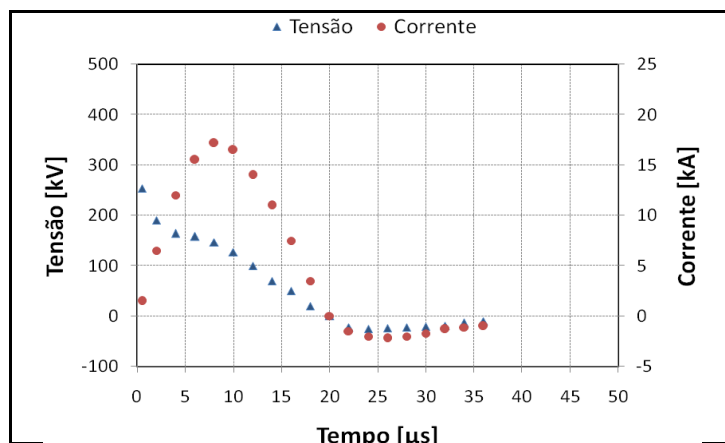


FIGURA 4 – Tensão e corrente no aterramento – valores experimentais obtidos em (9).

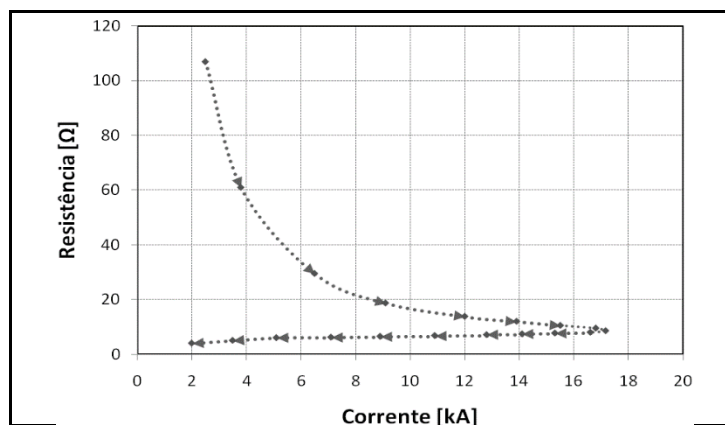


FIGURA 5 – Variação da resistência com a corrente – valores experimentais obtidos em (9).

Tomando por base algumas grandezas mais significativas do processo acima descrito, os resultados indicados na Tabela 2 permitem uma pronta comparação entre os desempenhos computacionais dos modelos em relação aos valores obtidos experimentalmente e utilizados como grandezas de referência.

Tabela 2 – Quadro comparativo dos resultados computacionais

	Resultados experimentais (9)	Modelo com parâmetros lineares	Modelos com parâmetros não-lineares		
			Modelo referência (13)	Modelo referência (9)	Modelo modificado
Tensão máxima [kV]	253,3	5548,2	432,1	239,1	209,1
Corrente máxima [kA]	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2
Tensão no instante do pico de corrente [kV]	146,7	5548,2	117,8	115,9	116,1
Resistência no instante do pico da corrente [Ω]	8,6	322,3	6,8	6,7	6,7
Resistência antes da ionização [Ω]	318	322,3	318,8	6352,9	318,8

Fundamentado nos resultados indicados fica evidente que o modelo Não-Linear Modificado se mostra com maior aderência aos propósitos aqui almejados. Para maior clareza da consistência do modelo Não-Linear Modificado, as Figuras 6 e 7, associadas, respectivamente, com o desempenho da tensão e corrente ao longo do tempo e, correspondentes resistências, indicam em detalhes os comportamentos associados com a proposta feita.

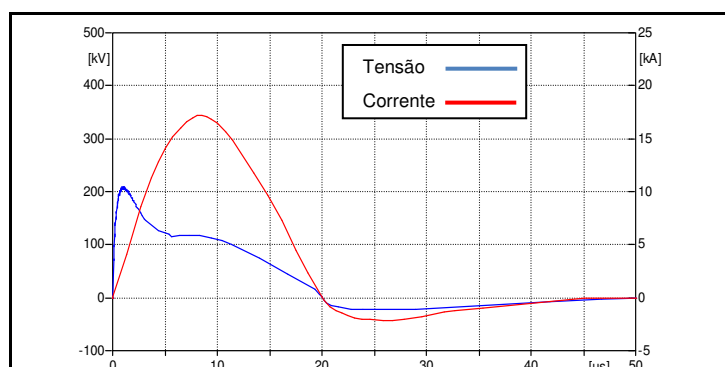


FIGURA 6 – Tensão e corrente computacionais para o modelo não-linear modificado.

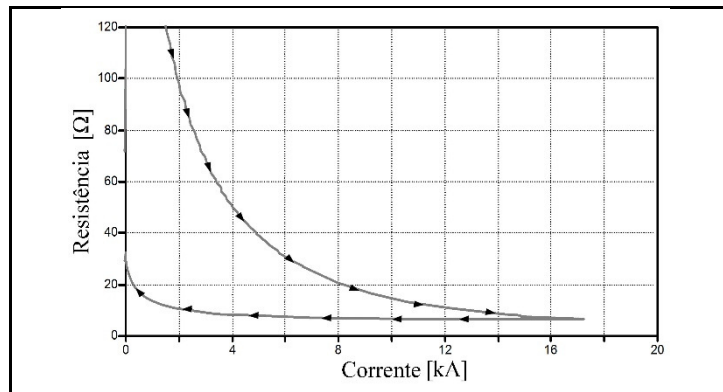


FIGURA 7 – Variações computacionais da resistência para o modelo não-linear modificado.

4.0 - CONCLUSÃO

O presente IT contemplou investigações associadas à modelagem de sistemas de aterramento, com destaque às estratégias que empregam representações via parâmetros lineares e não-lineares para os estudos computacionais dos fenômenos atrelados com distúrbios tipo descarga atmosférica ou outros com propriedades similares.

A utilização de modelos lineares, como esperado, traz consigo a vantagem intrínseca da simplicidade, todavia, é importante considerar que esta estratégia, bastante difundida entre as concessionárias de energia, possui como principal desvantagem o fato de não permitir a inclusão de fenômenos atrelados com a ionização do solo. Em outras palavras, a proposta baseia-se no fato que os eventos ocorridos na rede de distribuição levam a correntes que se estabelecem nos eletrodos e que não se apresentam com magnitudes capazes de ionizar o solo em torno do ponto de incidência.

Por outro lado, o modelo que contempla parâmetros não-lineares, permitindo, assim, a inserção dos fenômenos anteriormente ignorados, encontra-se vinculado com equacionamentos, informações e parâmetros mais complexos, fato este que restringe o seu uso para situações mais críticas e específicas. A utilização de um modelo com estas características pode impactar nos resultados através da obtenção de formas de ondas de tensão e corrente distintas, porém mais fidedignas que aquelas observadas com uma representação mais simplória. Isto, como seria natural, pode influenciar fortemente o comportamento do sistema e respectivos efeitos sobre equipamentos e a segurança operacional da rede.

Focando a melhoria da representação dos modelos de aterramentos, foi proposta e implementada uma estratégia de modelagem modificada incorporando os atributos das duas representações clássicas ora tratadas. Estes procedimentos e o processo alternativo foram então avaliados, computacionalmente, utilizando por base resultados experimentais extraídos de uma referência citada. Os desempenhos obtidos, como esclarecido no texto, foram suficientes para o reconhecimento do bom desempenho do que se denominou por representação Não-linear Modificada.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) S. Visacro, Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento: Artliber, 2005.
- (2) E. D. Sunde, Earth conduction effects in transmission systems: D. Van Nostrand Co., 1949.
- (3) Z. Stojković, M. S. Savić, J. M. Nahman, D. Salamon, B. Bukorović, "Experimental investigation of grounding grid impulse characteristics", European Transactions on Electrical Power, vol. 8, pp. 417-421, 1998.
- (4) R. L. Cohen, How to Protect Your House and Its Contents from Lightning: Surge Protection : IEEE Guide for Surge Protection of Equipment Connected to AC Power and Communication Circuits: IEEE Computer Society Press, 2005.
- (5) R. Alipio, S. Visacro, "Impulse Efficiency of Grounding Electrodes: Effect of Frequency-Dependent Soil Parameters", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, pp. 716-723, 2014.

- (6) H. Jinliang, W. Jinpeng, Z. Bo, Y. Shaofeng, "Field testing for observation of seasonal influence on grounding device at impulse condition", Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility - APEMC, 2012, pp. 445-448.
- (7) T. Miyazaki, T. Ishii, S. Okabe, "A Field Study of Lightning Surges Propagating Into Residences", Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on, vol. 52, pp. 921-928, 2010.
- (8) S. Sekioka, K. Aiba, T. Miyazaki, S. Okabe, "Lightning Overvoltages in Low-Voltage Circuit for Various Lightning Striking Points", Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 25, pp. 3095-3104, 2010.
- (9) J. Wang, A. C. Liew, M. Darveniza, "Extension of Dynamic Model of Impulse Behavior of Concentrated Grounds at High Currents", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, 2005.
- (10) F. J. T. Teixeira, M. R. Cordeiro, F. O. Resende, A. C. S. M. Moura, "Aplicação do EMTP-ATP ao Estudo Comportamental dos Eléctrodos de Terra em Sistemas Eléctricos de Energia – Utilização de Diversos Modelos Bibliográficos", Revista Iberoamericana del ATP, 2002.
- (11) D. Cavka, N. Mora, F. Rachidi, "A Comparison of Frequency-Dependent Soil Models: Application to the Analysis of Grounding Systems", Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on, vol. PP, pp. 1-11, 2013.
- (12) L. Lin, V. A. Rakov, "Distribution of Currents in the Lightning Protective System of a Residential Building - Part II: Numerical Modeling", Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 23, pp. 2447-2455, 2008.
- (13) A. C. Liew, M. Darveniza, "Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths", Proc. IEE, vol. 21, pp. 123-135, 1974.
- (14) M. Carrescia, G. Molina, "Analysis of conductive interference, on electronic equipment, due to low frequency currents flowing through the earthing installation", Energy Conversion Engineering Conference, 1996. IECEC 96., Proceedings of the 31st Intersociety, 1996, pp. 1823-1827 vol.3.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Afonso Bernardino de Almeida Junior nasceu em Monte Carmelo-MG, Brasil. Graduiu-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Uberlândia (UFU) onde obteve o título de Mestre em Ciências. Atualmente é docente e pesquisador na área de Engenharia Elétrica do Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM) e doutorando em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Uberlândia, na área da Qualidade da Energia Elétrica (NQEE/UFU).



Paulo Henrique Oliveira Rezende nasceu em Cachoeira Alta-GO, Brasil. Graduiu-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Uberlândia (UFU) onde obteve o título de Mestre em Ciências. Atualmente é doutorando no núcleo de Qualidade da Energia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (NQEE/UFU).



Isaque Nogueira Gondim nasceu em Araporã-MG, Brasil. Graduiu-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Uberlândia (UFU) onde obteve o título de Doutor em Ciências. Fez pós doutorado em 2013 na Engenharia Biomédica na Universidade Federal de Uberlândia. Atualmente trabalha como professor adjunto e pesquisador no Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica Universidade Federal de Uberlândia.



Marcus Vinícius Borges Mendonça nasceu em Ituiutaba-MG, Brasil. Graduiu-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Uberlândia (UFU) onde obteve o título de Doutor em Ciências. Foi professor do Departamento de Engenharia Elétrica (ENE) da Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade de Brasília (UnB) e, atualmente, atua como professor e pesquisador nas áreas de Sistemas Elétricos de Potência e Qualidade da Energia Elétrica na Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM).



José Carlos de Oliveira nasceu em Itajubá-MG, Brasil. Graduiu-se e obteve o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), e de PhD pelo Instituto de Ciências e Tecnologia da Universidade de Manchester, em Manchester - Reino Unido. Atualmente, trabalha como pesquisador e professor na Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Tem lecionado e publicado sobre vários assuntos relacionados com Sistemas Elétricos de Potência e Qualidade da Energia Elétrica.



Luciano Martins Neto nasceu em Botucatu-SP, Brasil. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia de Lins e obteve o título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo (USP). Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Tem lecionado e publicado sobre vários assuntos relacionados com Máquinas Elétricas e Aterramentos Elétricos.