

EFEITOS DE MODELOS DE SISTEMAS DE ATERRAMENTOS NOS ESTUDOS DE RESSARCIMENTO DE CONSUMIDORES POR DANOS

Afonso B. Almeida Jr.¹, Paulo H. O. Resende¹, Marcus V. B. Mendonça², José C. Oliveira¹, Isaque N. Gondim¹, Luciano M. Neto¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia – MG

²Univerdade Federal do Triângulo Mineiro, Faculdade de Engenharia Elétrica – Uberaba - MG

email: afonsobe@gmail.com, paulohenrique16@gmail.com, borgesmarcus@yahoo.com.br, jcoliveira@ufu.br, gondim.isaque@gmail.com, lmn@ufu.br

Resumo - Este artigo visa apresentar resultados de estudos computacionais associados com a influência da representação de sistemas de aterramento utilizados nas redes de distribuição de energia elétrica durante a ocorrência de distúrbios. O trabalho sintetiza os principais modelos propostos na literatura para a representação de sistemas de aterramentos, considerando a linearidade e a não linearidade destes, e propõe uma estratégia alternativa para a incorporação dos aterramentos visando estudos donexo causal entre distúrbios manifestados nas redes elétricas e danos em equipamentos das instalações consumidoras. Análises computacionais comparativas, utilizando por base informações derivadas de ensaios experimentais, são realizadas objetivando a avaliação da correlação entre as respostas dos modelos existentes e da estratégia modificada estabelecida neste trabalho, evidenciando, assim, a melhoria da qualidade dos resultados obtidos. Ao final, é feita uma aplicação típica mostrando a utilização da metodologia computacional ora referida e os desempenhos comparativos entre os modelos de aterramento, existentes e modificado, para o caso da incidência de uma descarga atmosférica e seus impactos sobre um microcomputador, supostamente danificado pelo fenômeno aqui referido. Os resultados obtidos evidenciam, com clareza, a relevância da utilização de modelos adequados não apenas para os componentes de rede, mas também, para os sistemas de aterramento.

Palavras-Chave - Modelagem Computacional, Qualidade da Energia Elétrica, Resposta de Sistemas de Aterramentos submetidos à Descargas Atmosféricas, Pedidos de Ressarcimento de Danos Elétricos.

GROUND SYSTEM MODELS EFFECTS AT REIMBURSEMENT REQUEST ANALYSIS DUE TO ELECTRICAL DAMAGES

Abstract - This paper presents results of computational studies associated with the influence of grounding systems representation used in distribution networks during the occurrence of disturbances. The paper summarizes the

main models proposed in the literature for the representation of grounding systems considering the linearity and nonlinearity of these, and proposes an alternative strategy for the incorporation of grounding studies targeting the causal nexus between the system occurrence in the distribution electrical networks and consumer's equipment damage. Comparative computational analysis between the given and proposed models are made using base information derived from experimental testes carried out in field. This supports the evaluation of the improvement in quality of the results between the responses of existing models and the modified strategy established in this work. To highlight the overall methodology, a typical application showing the use of computational approach herein referred is then performed to illustrate the effect of the grounding models, either the existing ones and the modified representation given. The practical situation is related to the incidence of a lightning stroke and its impact on a microcomputer, allegedly damaged by the phenomenon referred to herein. The results show, clearly, the importance of using appropriate models not only for network components, but also for the grounding systems.

Keywords - Equipment Withstand Limits, Dielectric and Thermal Supportability, Procedures for Evaluating Claims.

I. INTRODUÇÃO

A ocorrência de fenômenos advindos da natureza e outros, somados a ação de dispositivos de proteção e/ou manobra, podem ocasionar impactos na operação dos mais diversos equipamentos que compõem os seguimentos industriais, comerciais e residenciais de consumidores [1], [2]. Sob a ação destes fenômenos, os aparelhos elétricos podem vir a operar de maneira inadequada ou, em casos extremos, até mesmo sofrer danos físicos a ponto de exigir uma pronta manutenção ou reposição [3], [4].

Diante deste quadro podem surgir grandes contendas entre as partes envolvidas no processo. De um lado, as concessionárias de serviços públicos de distribuição, as quais



XII CEEL – ISSN 2178-8308
13 a 17 de Outubro de 2014
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

recebem estes pedidos e têm por incumbência a análise e emissão de um parecer sobre a correlação entre causas e efeitos, e de outro, os consumidores interessados numa rápida resposta dos supridores.

Neste sentido, e ainda, face ao crescente número dos pedidos de indenização e consequentes montantes financeiros envolvidos nos processos de ressarcimento [5], a busca por mecanismos fundamentados na ciência e tecnologia, que permitam conduzir, de forma isenta aos interesses individuais, respostas consistentes e, dentro do possível, que satisfaça às partes, constitui-se, sem dúvidas, em grandes metas a serem alcançadas.

Diante deste contexto, uma estratégia baseada na simulação em ambiente computacional para avaliar o desempenho das redes de alimentação, visando a reprodução das mais distintas ocorrências registradas, suas propagações e impactos nos equipamentos terminais, apresenta-se como uma ferramenta importante para o estabelecimento de um procedimento sistematizado, rápido, eficiente e consistente. Assim procedendo, o software em pauta deverá primar por reproduzir: a topologia da rede, os fenômenos ocorridos, a propagação destes até os consumidores finais e, por fim, ao estabelecimento da correlação causa e efeito, assunto este comumente designado por nexos causais [5], [6].

De fato, a literatura e a experiência evidenciam que um grande número de distúrbios, supostamente responsáveis por danos, estão associados com as sobretensões diretamente incidentes sobre os produtos reclamados, ou ainda, devido à circulação de correntes pelos pontos de aterramento através do aumento de potencial do terra (GPR – Ground Potential Rise) [7], [8]. Devido aos efeitos que tais modelagens exercem sobre os potenciais de neutro e terra, como ocorre quando da incidência de descargas atmosféricas e faltas assimétricas, isto pode ser decisivo no processo de análise [9].

Inserido pois no contexto da obtenção e implementação de uma estratégia para a representação dos sistemas de aterramentos em um programa computacional já desenvolvido pelos autores, denominado por APR [5], e assim, oferecer melhorias quanto a confiabilidade deste software, surge o presente artigo. Uma vez definido o modelo e sua respectiva inserção no programa de análise, os trabalhos prosseguem na direção da avaliação do desempenho da estratégia proposta através da utilização das ferramentas de estudo para a avaliação do nexos causais entre causas e efeitos, utilizando, para tanto, de uma situação real manifestada numa rede de distribuição, sobre a qual ocorre a incidência de uma descarga atmosférica e um suposto dano em um equipamento eletrodoméstico.

II. MODELOS DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO

Segundo [10], as representações dos sistemas de aterramento podem ainda 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 escoou pelo eletrodo. Muitas vezes se opta pela consideração de parâmetros não-lineares para os casos de estudo em que ocorre o 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. Isto posto, fica evidenciado que 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.

Desta maneira, diante dos problemas contemplados no contexto dos estudos aqui postos, o caminho via métodos numéricos, empregando a abordagem por circuitos concentrados e representativos de sistemas de aterramento, que levem em consideração parâmetros lineares e não-lineares, se se apresenta condizente. Estes são considerados em maiores detalhes na sequência.

A. Modelos com parâmetros lineares

Basicamente, os modelos de sistemas de aterramento que utilizam parâmetros lineares são caracterizados por uma ou mais resistências com valores constantes [10]. 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 [9]. À luz destes princípios, estudos abrangendo curtos-circuitos envolvendo o terra podem ser feitos por meio desta aproximação, sob condições tais que a corrente escoada pelo eletrodo de aterramento não seja muito elevada [11].

B. 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 o presente momento, no âmbito de parâmetros não-lineares visam, sobretudo, as análises de sistemas de aterramento percorridos por correntes impulsivas. Neste sentido, em [13] é proposto um modelo dinâmico capaz de descrever o comportamento não-linear entre a tensão e a corrente em eletrodos de aterramento concentrados.

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 Fig. 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; enquanto as regiões “b” e “c” representam as partes do solo onde a modificação da resistividade do solo foi percebida, sendo a região “b” uma zona de desionização. Ainda por meio da Fig. 1 pode-se observar o modelo adotado em [13] para as superfícies equipotenciais.

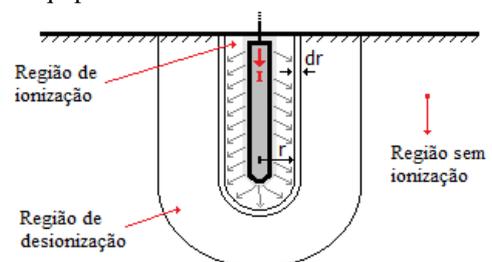


Fig. 1. Modelo proposto por [13]

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, conforme apresenta a expressão (1).

$$R = \int_{r_0}^{\infty} \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r+l} \right) \cdot dr = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \left(\ln \frac{r_0+l}{r_0} \right) \quad (1)$$

Em [14], 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, porém 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.

Como no modelo anterior, três regiões do solo foram consideradas: uma região de ionização, outra de desionização e uma terceira associada com a não-ionização. Na proposta contida em [14], 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 pode ser observada na Fig. 2.

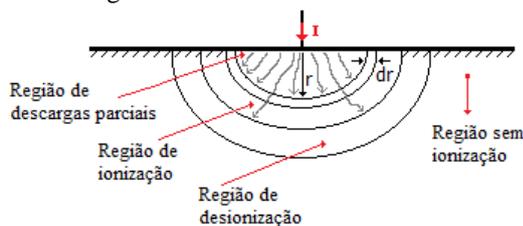


Fig. 2. Modelo proposto por [14]

Para este modelo, a resistência total pode ser obtida através de:

$$R = \int_{r_0}^{\infty} \frac{\rho_0 \cdot dr}{2\pi \cdot r^2} = \frac{\rho_0}{2\pi \cdot r_0} \quad (2)$$

Por fim, em [14] 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 resistência do solo antes da ocorrência do fenômeno da ionização.

Diante do exposto detectou-se que a mencionada restrição pode ser corrigida 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. Com isso, fica evidenciada uma melhoria na representação da geometria da haste de aterramento, como proposto em [13]. Isto feito, 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 Fig. 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.

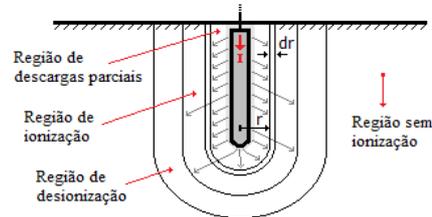


Fig. 3. Modelo Não-Linear Modificado.

III. ANÁLISE COMPUTACIONAL COMPARATIVA DOS MODELOS DE ATERRAMENTOS

Objetivando avaliar, comparativamente, o desempenho dos modelos para o sistema de aterramento contemplados anteriormente, fundamentado nos equacionamentos e conceitos apresentados, as quatro estratégias indicadas foram então implementadas no simulador ATP, utilizando-se para as representações não-lineares a linguagem *MODELS* de programação. Para o estabelecimento de uma base confiável para fins da avaliação da aderência das propostas foram empregados os resultados de estudos experimentais conduzidos em [14].

Através da imposição de um impulso de corrente obtido em laboratório obteve-se os resultados para a tensão e corrente mostrados na Fig. 4. A partir destas grandezas chega-se a variação da resistência do sistema de aterramento à medida que a corrente se altera, como ilustra a Fig. 5.

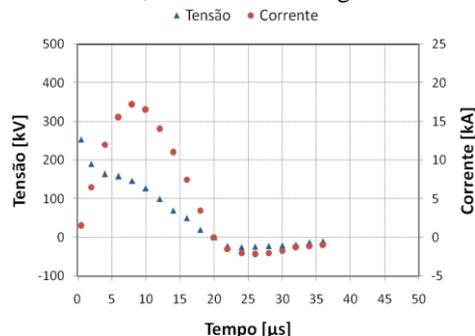


Fig. 4. Tensão e corrente no aterramento – valores experimentais de [14].

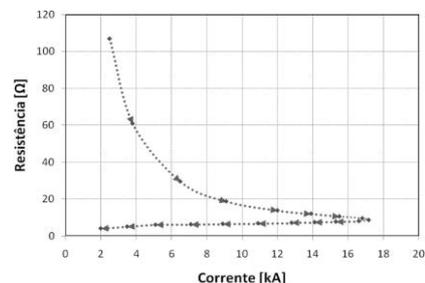


Fig. 5. Variação da resistência com a corrente – valores experimentais de [14].

Uma vez realizados os trabalhos de implementação

computacional das metodologias para modelagem do aterramento, foi feita, num primeiro momento, uma avaliação do desempenho da mesma à luz dos valores esperados e atrelados com os experimentos anteriormente. Neste sentido, os valores obtidos para as resistências, para pontos considerados mais relevantes dos resultados, encontram-se destacados na Tabela II. Nesta podem ser visualizadas as resistências obtidas através dos princípios associados com os modelos: linear, não-linear da referência [13], não-linear da referência [14] e o Não-Linear Modificado.

Tabela II - Quadro Comparativo dos Resultados Computacionais

	Modelo com parâmetros lineares	Modelos com parâmetros não-lineares		
		Modelo Referência [13]	Modelo Referência [14]	Modelo Modificado
Tensão máxima [kV]	5548,2	432,1	239,1	209,1
Corrente máxima [kA]	17,2	17,2	17,2	17,2
Tensão no instante do pico da corrente [kV]	5548,2	117,8	115,9	116,1
Resistência no instante do pico da corrente [Ω]	322,3	6,8	6,7	6,7
Resistência antes da ionização [Ω]	322,3	318,8	6352,9	318,8

Para maior clareza da consistência do modelo Não-Linear Modificado, a Fig. 6 e Fig. 7, associadas, respectivamente, com o desempenho da tensão e corrente ao longo do tempo e, com o comportamento da resistência, indicam em detalhes os desempenhos obtidos para a proposta aqui feita.

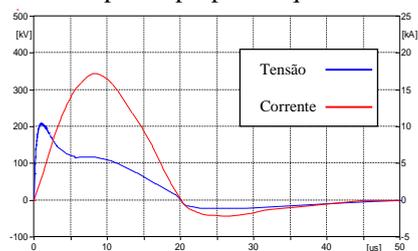


Fig. 6. Tensões e correntes computacionais para o modelo modificado.

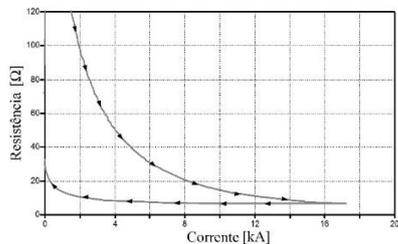


Fig. 7. Variações computacionais da resistência para o modelo modificado.

A Tabela III compara, numericamente, a qualidade dos resultados obtidos pelo modelo modificado com aqueles extraídos de [14].

Tabela III - Quadro Comparativo dos Resultados Computacionais e Experimentais

	Experimentais	
	Computacional	Experimental
Tensão máxima [kV]	209,1	253,3
Corrente máxima [kA]	17,2	17,2
Tensão no instante do pico da corrente [kV]	116,1	146,7
Resistência no instante do pico da corrente [Ω]	6,7	8,6

IV. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO MODELO PARA UM CASO REAL DE PEDIDO DE RESSARCIMENTO

Visando elucidar a relevância da representação do aterramento para os fins aqui postos, quais sejam, os estudos de verificação do nexo causal entre fenômenos anômalos e danos em equipamentos, optou-se pela adoção de um caso real de pedido de ressarcimento aplicável a um microcomputador, supostamente atribuído a incidência de uma descarga atmosférica na rede de distribuição. A configuração deste alimentador encontra-se sintetizado na Fig 8.

Todos os elementos constituintes do sistema de distribuição foram inseridos dentro dos moldes típicos da biblioteca disponibilizada pelo simulador. No que tange ao microcomputador, o circuito equivalente deste dispositivo, compreendendo uma tecnologia baseada em fonte chaveada, foi devidamente inserido com os detalhes que se fazem necessários aos estudos. Maiores detalhes sobre o modelo obtido e o processo de validação do mesmo são encontrados em [15] e [16]. Os parâmetros representativos da descarga atmosférica se apresentam na forma de uma onda típica de 8/20 μ s com valor de crista adotado igual a 10kA. O ponto de incidência encontra-se ilustrado no diagrama unifilar.

Os sistemas de aterramento da rede de distribuição estão localizados em dois pontos, um na subestação, e outro, na unidade consumidora. A malha de aterramento da subestação foi configurada através de uma resistência equivalente de 0,6 Ω . Para as hastes de aterramento empregadas na rede de distribuição, as quais são objetos de tratamento por meio dos modelos lineares e não-lineares, foram utilizados parâmetros típicos baseados em um eletrodo de 3 metros de comprimento e 5/8 polegadas de diâmetro. No que se refere à caracterização do solo ao redor das hastes, o mesmo foi parametrizado com uma resistividade de 100 Ω .m.

A. Situação 1 – Modelo Linear

A Fig. 9 mostra a forma de onda da tensão na unidade consumidora onde se encontra conectado o microcomputador. A tensão se apresenta com um valor de pico entre a fase e o potencial nulo, de aproximadamente 30 kV, o qual foi atingido dezenas de μ s após a incidência da descarga no ponto indicado, a qual aconteceu em 0,02s do tempo de simulação. O valor máximo apresentado para a corrente foi da ordem de 80 Ampères, muito embora a omissão desta figura neste artigo.

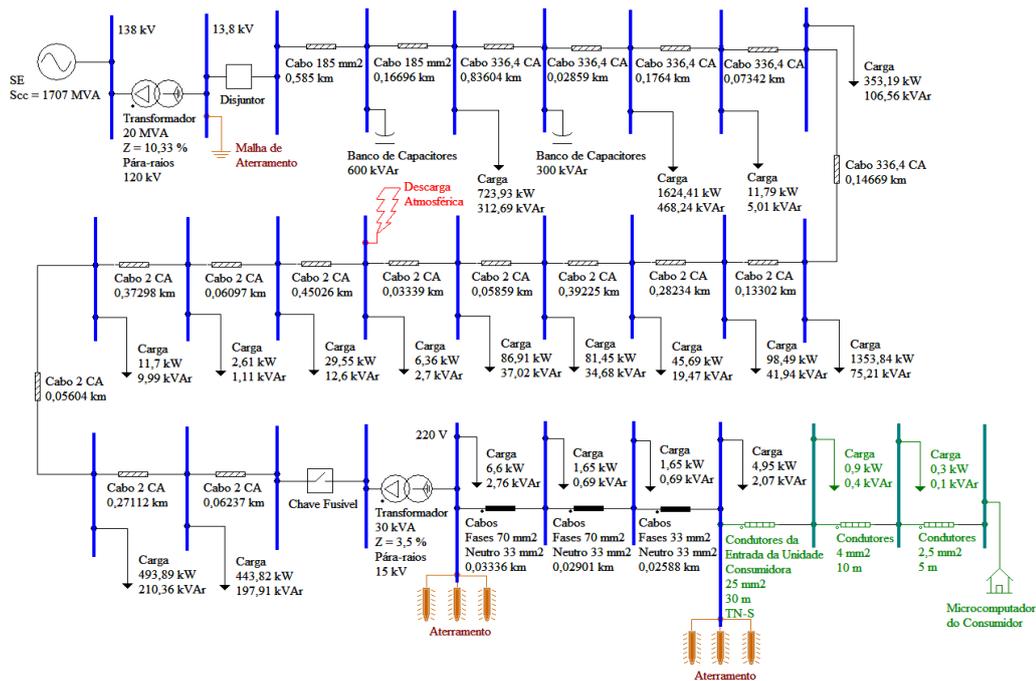


Fig. 8. Sistema elétrico utilizado para as investigações.

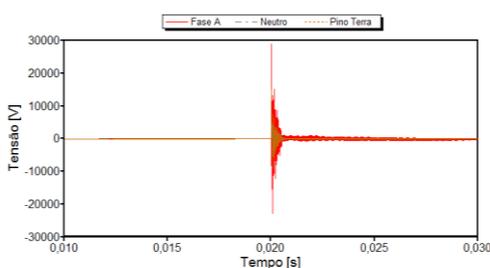


Fig. 9. Tensão no microcomputador - descarga atmosférica – Situação 1.

B. Situação 2 – Modelo Não-Linear

A Fig. 10 mostra a forma de onda da tensão vinculada com a mesma descarga atmosférica e levando em consideração o modelo Não-Linear Modificado para os mencionados aterramentos.

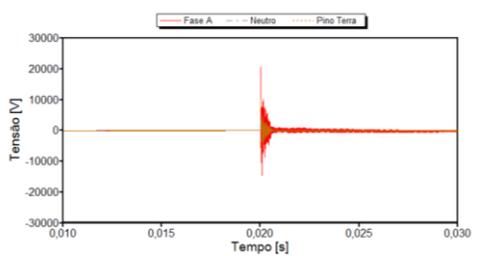


Fig. 10. Tensão no microcomputador - descarga atmosférica – Situação 2.

O pico da tensão fase-terra, também considerando o terra na referência de potencial zero, nesta situação, foi de cerca de 20 kV, portanto, significativamente inferior àquele determinado anteriormente. Isto se deve ao fato da ionização do solo ter contribuído para a redução da resistência do sistema de aterramento.

Em consonância com os procedimentos que nortearam o aplicativo APR [5], a Fig. 11 expressa o resultado final da correlação das solicitações dielétricas e térmicas impostas

pele o distúrbio ocorrido com os limites de suportabilidade do microcomputador. No que tange as curvas de suportabilidade utilizadas, estas são alusivas à três distintas referências, visto serem estas as únicas fontes disponibilizadas, até então, sobre o assunto [17], [4], [6].

Vale ressaltar que, caso o fenômeno ocorrido na rede conduza a uma solicitação abaixo da correspondente curva de suportabilidade, então uma condição operacional sem riscos probabilísticos de danos teria ocorrido e o contrário seria manifestado com a violação dos limites. Portanto, as informações oferecidas pela Fig. 11 são indicativas sobre a possibilidade do nexso causal do pedido de ressarcimento ora avaliado.

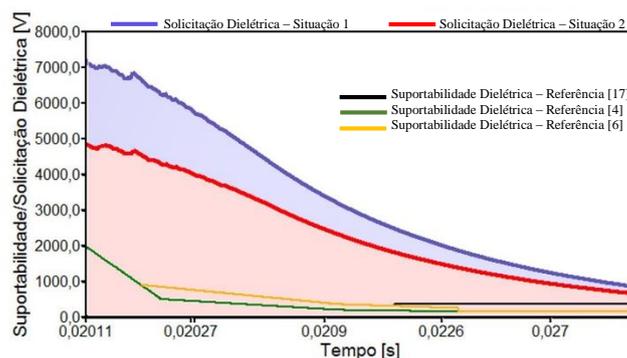


Fig. 11. Solicitações dielétricas diante dos níveis de suportabilidade do equipamento sob a ação de uma descarga atmosférica

V. CONCLUSÕES

O presente trabalho contemplou investigações associadas à modelagem dos sistemas de aterramento, visando, sobretudo, sua correlação com mecanismos computacionais para a análise e parecer de pedidos de indenização por danos elétricos.

Neste contexto, somado a esforços já conduzidos e descritos na literatura, dentre os quais ressalta-se um aplicativo computacional que correlaciona efeitos anômalos com impactos dielétricos e físicos sobre os equipamentos, o trabalho aqui realizado foi dedicado a melhorias do produto, na forma de representações mais fidedignas das malhas de terra, visando, sobretudo, uma maior identidade das ferramentas de estudos com as condições reais impostas pelas redes elétricas.

De fato, modelos de aterramento via modelos lineares, trazem em seu escopo vantagens como a simplicidade, todavia, 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. Por outro lado, modelos mais completos, envolvendo parâmetros não-lineares, exigem equacionamentos, informações e parâmetros mais complexos.

Diante desta realidade, foi proposta e implementada uma estratégia de modelagem modificada incorporando os atributos das duas representações clássicas ora tratadas. Estes procedimentos para representação foram então avaliados, computacionalmente, utilizando por base resultados experimentais extraídos de uma referência citada e, por fim, constatado bom desempenho do que se denominou por representação não-linear modificada.

Através de uma aplicação elucidativa foi então avaliado o comportamento do processo de incidência de uma descarga atmosférica e sua propagação até um consumidor, ao qual, supostamente, teria resultado em danos em um microcomputador. Os estudos feitos enfatizaram, com clareza, a importância exercida pelos aterramentos, visto que discrepâncias entre valores de pico de tensão de 50% e de corrente de 45% foram encontrados.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado técnica e financeiramente pela FAPEMIG, CAPES e FAPEMIG, através de bolsas e auxílios para os alunos de mestrado e doutorado.

REFERÊNCIAS

[1] R. C. Dugan, M. F. Mcgranaghan, S. Santoso, H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2ª ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

[2] M. H. J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. Piscataway: IEEE Press, 2000.

[3] K. Ermeler, W. Pfeiffer, D. Schoen, M. Schocke, "Surge Immunity of Electronic Equipment", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 14, 1998.

[4] M. D. Teixeira, R. L. Araújo, L. M. Ardjomand, A. R. Aoki, N. S. R. Quoirin, I. Wunderlich, "Acceptable Power Quality Limits to Avoid Damages in Appliances", *WSEAS Trans. on Circuits and Systems*, vol. 4, 2005.

[5] C. E. Tavares, M. V. B. Mendonça, J. C. d. Oliveira, D. A. d. Andrade, E. Flach, "A Computational Approach for Consumers Refunding Analysis Due to Equipment Damages", *IEEE PES Transmission & Distribution*

Latin America Conference and Exposition, Bogotá, Colômbia, 2008.

[6] I. N. Gondim, J. A. F. Barbosa, J. C. Oliveira, A. Oliveira, C. E. Tavares, "An Approach to Obtain System Disturbance Data to Consumer Reimbursement Analysis by Real Time Measurements", *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, vol. 11, pp. 719-725, 2013.

[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] 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.

[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] 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.

[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] 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.

[15] M. V. B. Mendonça, C. E. Tavares, J. C. Oliveira, K. D. Rodrigues, I. N. Gondim, R. M. T. Silva, "A Case Study of Electronic Device Modeling and Performance Analysis with Non Ideal Supply Conditions Using ATP Simulator", *T&D IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Chicago, USA, 2008.

[16] I. N. Gondim, J. A. Barbosa, J. C. Oliveira, C. E. Tavares, A. C. Delaiba, "Uma Estratégia para Obtenção dos Limites de Suportabilidade Dielétrica e Térmica de Equipamentos com Foco aos Pedidos de Indenização por Danos", *Eletrônica de Potência*, vol. 17, pp. 651-659, jun./ago. 2012.

[17] H. R. P. M. Oliveira, N. C. Jesus, M. L. B. Martinez, "Avaliação do Desempenho de Equipamentos Eletrodinâmicos Durante Ensaios de Sobretensões", *XVIII SNPTEE*, Curitiba/PR, 2005.