

Desenvolvimento de um Gerador de Impulsos de Tensão que utiliza Chaves Semicondutoras para Avaliação de Sistemas de Aterramento

Kristian P. dos Santos, Tobias R. Fernandes Neto, Ednardo M. Rodrigues, Cicero M. T. Cruz, Felipe B. da Silva

Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal do Ceará, UFC
Fortaleza, Brasil

kristianpessoa@hotmail.com

Resumo - Este trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um gerador de impulsos portátil que utiliza chaves semicondutoras no lugar das tradicionais chaves *spark gap*. O gerador de impulsos produz uma tensão do tipo dupla exponencial que é aplicada a um sistema de aterramento geralmente usado nos sistemas de distribuição de energia. A tensão aplicada e a corrente serão medidas pelo sistema de aquisição de dados e, posteriormente, analisadas pelo software em desenvolvimento para que a topologia do sistema de aterramento possa ser identificada evitando, assim, a necessidade de trabalhos mecânicos para encontrar a topologia enterrada. Essa metodologia poderá ser aproveitada no comissionamento de obras de sistemas de distribuição de energia elétrica para avaliar se os sistemas de aterramento instalados estão condizentes com os padronizados.

Palavras-Chaves—Aterramento, Descargas Atmosféricas, Dupla exponencial, Gerador de impulsos.

I. INTRODUÇÃO

Um das causas mais comuns de transientes nos sistemas elétricos de potência são as descargas atmosféricas que causam prejuízos materiais e humanos. Devido as suas extensões territoriais, o Brasil é um dos mais atingidos no mundo por este fenômeno natural com uma média de 60 milhões de descargas atmosféricas por ano. As sobretensões originadas das descargas atmosféricas atingem, além dos sistemas de energia, os sistemas de comunicação e telecomunicação. As descargas atmosféricas podem ser aproximadas por uma onda do tipo dupla-exponencial que podem ser obtidas experimentalmente para o estudo e desenvolvimento de equipamentos utilizados na prevenção de distúrbios [1]. Com o crescimento da demanda por qualidade, continuidade e confiabilidade dos sistemas de energia elétrica, é fundamental que os sistemas de aterramento sejam projetados com bastante atenção e devidamente testados para garantir sua eficiência e confiabilidade. Para que seja possível o estudo dos sistemas de aterramento em operação, é necessário conhecer, além da resistência de malha, a

topologia utilizada. Entretanto, como o sistema de aterramento está enterrado e nem sempre há confiabilidade nas plantas elétricas existentes, torna-se necessário, quando possível, um árduo trabalho mecânico de escavação para identificação desta topologia.

Nesse cenário, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um gerador de impulsos portátil que tem como objetivo principal a aplicação de uma tensão com forma de onda dupla-exponencial em diferentes topologias de aterramentos, que geralmente são usadas nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Além disso, serão realizadas medições das formas de onda de tensão e corrente referentes a cada topologia através de um sistema de aquisição de dados. As formas de onda obtidas serão analisadas por um software (ainda em desenvolvimento) que utiliza redes neurais artificiais. Este software será capaz de avaliar e identificar a topologia do sistema de aterramento, evitando assim a necessidade de trabalhos mecânicos para identificar a topologia enterrada.

O gerador de impulsos possui um princípio de funcionamento muito simples. Inicialmente um banco de capacitores em série é carregado através da comutação de chaves semicondutoras e, em seguida, o mesmo é descarregado no sistema de aterramento em ensaio. O gerador de impulsos mais usados pelos pesquisadores para se obter uma onda dupla exponencial são os geradores *Marx*. Estes geradores utilizam como dispositivo de chaveamento as *spark gaps* que geralmente operam em baixa frequência, devido ao tempo de espera necessário entre cada chaveamento para desionizar o seu dielétrico. Além disso, estas chaves possuem uma baixa vida útil, pois os seus eletrodos sofrem erosões a cada descarga, acarretando em alterações na sua geometria e no dielétrico entre os eletrodos [2]. Para contornar essa dificuldade, o presente trabalho utilizará um gerador de impulsos que possui chaves semicondutoras na sua construção e apresenta as seguintes características: baixa queda de tensão, longa vida útil, alta frequência de operação (trem de pulsos) e

utiliza baixa tensão no controle das chaves semicondutoras [3], [4].

II. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DO TIPO DUPLA EXPONENCIAL

A forma de onda de uma descarga atmosférica é a dupla exponencial que pode ser matematicamente definida de acordo com o tempo de subida (t_f), largura do pulso (t_p) e o valor de pico (V_o) [5], [6].

$$v(t) = V_o \cdot (e^{-\alpha \cdot t} - e^{-\beta \cdot t}) \quad (1)$$

Segundo [5], as seguintes aproximações são frequentemente usadas na literatura:

$$t_f \approx \frac{1}{\beta} \quad (2)$$

$$t_p \approx \frac{1}{\alpha} \quad (3)$$

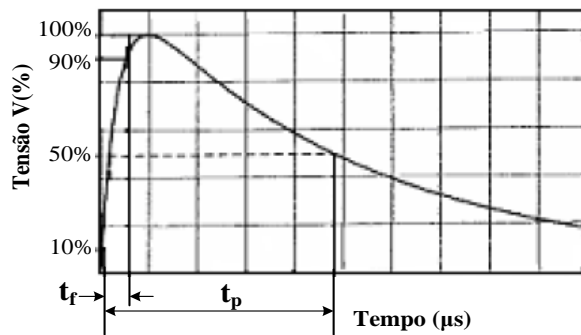


Figura 1. Forma de onda da tensão e parâmetros [5].

O transiente de sobretensão devido às descargas atmosféricas possui um tempo de subida que varia de 0,5 a 10 μs e tempo de decaimento para 50% do valor de pico que varia de 30 a 200 μs [6].

III. GERADOR DE IMPULSOS

O princípio de funcionamento do gerador de impulsos possui três etapas de operação. A primeira etapa é representada pela Figura 2, onde os transformadores em paralelo T_{R1} e T_{R2} elevam a tensão de 220 V_{RMS} para aproximadamente 640 V_{RMS} . Em seguida, a tensão é retificada pelos diodos D_{R1} a D_{R4} e pelo filtro capacitivo C_{RET} para que o banco de capacitores em série C_1 , C_2 e C_3 , seja carregado. O resistor R_1 tem a função de limitar a corrente evitando que o banco se danifique. A carga do gerador de impulsos é o próprio sistema de aterramento. Nesta etapa, a chave S_1 é fechada enquanto a chave S_2 permanece aberta mantendo o circuito de entrada isolado do sistema de aterramento. As chaves semicondutoras S_1 e S_2 adotadas para o gerador foram os MOSFET's (1,5 kV-32 A) devido à sua rápida velocidade de chaveamento. Visando a proteção das mesmas, foram inseridos circuitos snubber.

Na segunda etapa de operação, as chaves S_1 e S_2 permanecem abertas isolando o banco de capacitores em série C_1 , C_2 e C_3 do circuito de entrada e do sistema de aterramento.

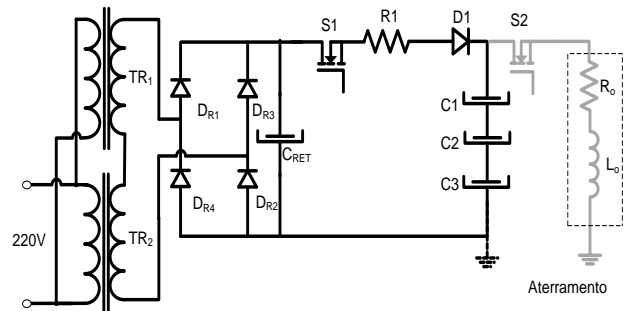


Figura 2. Primeira etapa de operação: carregamento do banco de capacitores.

A terceira etapa é representada pela Figura 3, onde a chave S_1 permanece aberta e o banco de capacitores, que fora previamente carregado, irá gerar um impulso de tensão no sistema de aterramento através da chave S_2 que está fechada. Considerando um modelo ideal onde as indutâncias do sistema de aterramento e dos cabos são desprezadas ($L_o = 0$ H), esse impulso de tensão tem as características de uma onda dupla exponencial.

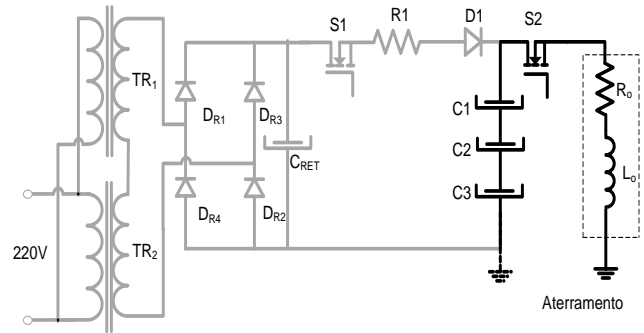


Figura 3. Impulso na Carga.

O circuito de controle analógico é responsável pela lógica do acionamento das chaves semicondutoras S_1 e S_2 através da operação do circuito integrado (CI) gerador de PWM adotado, o KA3525. As chaves semicondutoras S_1 e S_2 podem operar em um intervalo mínimo de tempo de 90 ms, este tempo foi adotado para que o sistema de aquisição de dados possa captar com maior precisão as formas de ondas aplicadas no sistema de aterramento. Como ambas as chaves não estão com a mesma referência entre os terminais *gate* e *source*, então, foram usados dois CIs opto-acoplados HCPL3120 para manter a isolamento entre o circuito de controle e as chaves semicondutoras.

Todos os solos analisados no decorrer do projeto possuíam características essencialmente resistivas, cujo valor dependia da característica do solo e da topologia do aterramento empregada. O gerador de impulsos deste trabalho é um gerador de tensão e não foi pretendida a fiel caracterização de um modelo para descargas atmosféricas, pois t_f e t_p não estão de acordo com a IEC 60060-1[7]. A tensão aplicada ao sistema de aterramento é uma onda dupla-exponencial e as suas características de tempo dependem diretamente das características do solo e do sistema de aterramento. Esta tensão aplicada ao sistema de aterramento será medida pelo sistema de aquisição de dados e, posteriormente, analisada

pelo software em desenvolvimento para que a topologia do sistema de aterramento possa ser identificada.

Para a medição das formas de onda da tensão e corrente no sistema de aterramento foi utilizado um sistema de aquisição de dados modelo *U2531A* do fabricante *Agilent* que possui uma taxa máxima de amostragem de 2 MS/s. De acordo com a teoria da amostragem, esta taxa de amostragem é eficiente para captar pulsos na ordem de micro segundos (μs). Além disso, foram utilizados sensores de tensão e corrente do fabricante *LEM* com resposta de frequência de CC – até 500 kHz (± 1 dB).

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Foram usados 03 capacitores eletrolíticos de $3,3 \mu F/400 V$ em série totalizando uma capacitância equivalente de $1,1 \mu F$. Os MOSFET's e os diodos suportam uma tensão reversa de até 1,5 kV. A Figura 4 mostra o acionamento de S_1 e S_2 que são responsáveis pelo controle da aplicação dos pulsos na carga. Para o acionamento das chaves é aplicada uma tensão $V_{GS} = 15 V$ entre os terminais *gate* e o *source* de S_1 e S_2 . O trem de pulsos para acionamento de S_1 e S_2 é necessário para que sejam aplicados vários impulsos de tensão no sistema de aterramento a fim de se obter uma grande quantidade de dados para o treinamento da rede neural do software em desenvolvimento. Em média, são aplicados trinta impulsos de tensão durante cada ensaio.

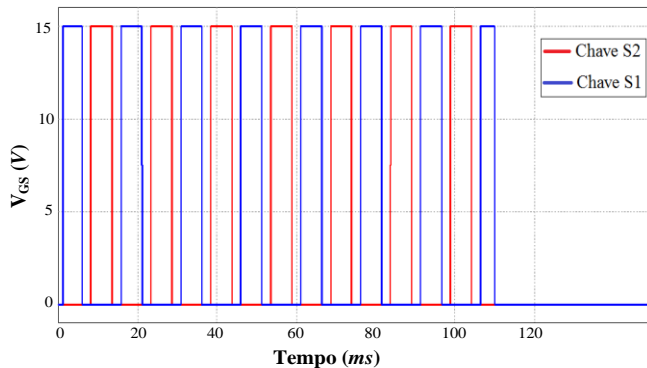


Figura 4 – Abertura e fechamento de S_1 e S_2 .

A Figura 5 mostra o comportamento da tensão no banco de capacitores. O banco é carregado pelo circuito de alimentação e, em seguida, é descarregado no sistema de aterramento.

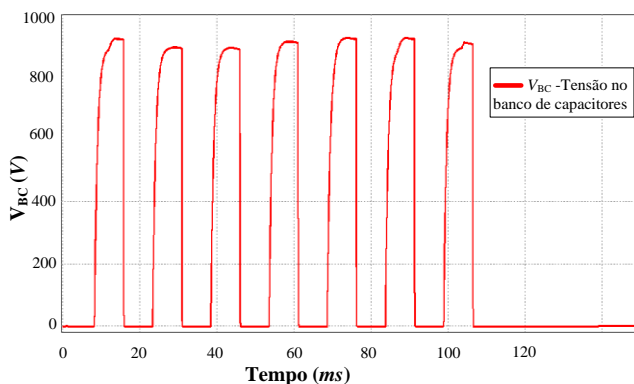


Figura 5 – Tensão nos terminais do banco de capacitores.

A Figura 6 apresenta o trem de impulsos de tensão e corrente em uma carga de 100Ω que representa a medida da resistência de aterramento de um sistema de aterramento qualquer. A área selecionada apresentada com maior clareza a forma de onda dupla-exponencial onde $t_f = 1 \mu s$ e $t_p = 77,5 \mu s$, pico de tensão de 916 V e pico de corrente de 9,16 A.

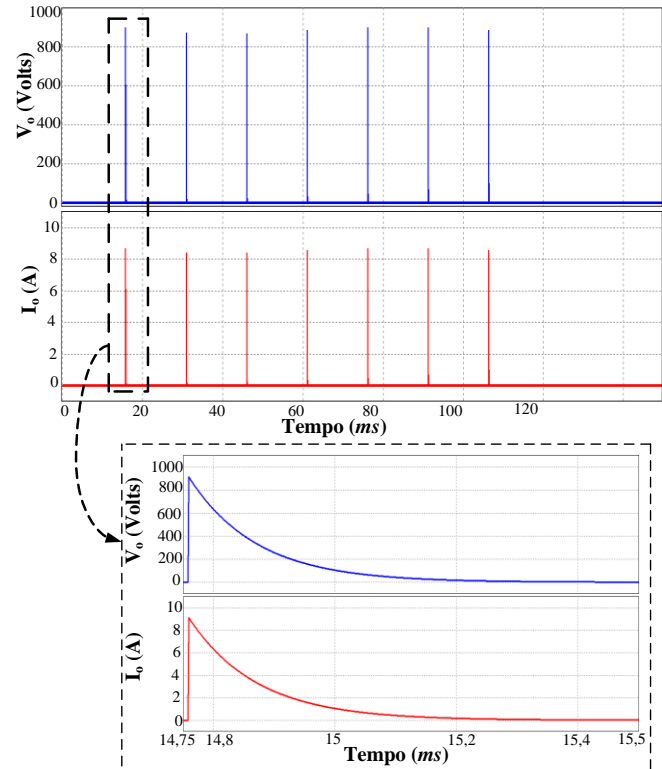


Figura 6 – Corrente e tensão nos terminais de uma carga de 100Ω .

Em quase todos os casos, é desejável que o aterramento de um sistema tenha um valor mínimo de resistência. Os sistemas de aterramentos usados na distribuição de energia encontram diversos tipos de solo no seu trajeto, logo, os valores da resistência do aterramento apresentam valores na faixa de 40 a 400Ω [8]. Em subestações ou em grandes instalações elétricas é comum encontrar valores de resistência de aterramento menores que 5Ω [8].

V. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os testes com o gerador de impulsos foram realizados na Universidade Federal do Ceará - UFC durante a estação seca utilizando 04 topologias de sistemas de aterramento que são muito utilizadas pelas concessionárias de energia elétrica:

- Haste vertical única.
- 02 hastes verticais paralelas.
- 03 hastes verticais paralelas
- Hastes em triângulo equilátero.

Na Figura 7 é representada a metodologia dos ensaios de campo. O gerador de impulsos aplica uma tensão entre a haste A, que representa a topologia do sistema de aterramento instalado no sistema de distribuição, e a haste auxiliar B. O potencial V_1 é medido entre as hastes A e a haste de sonda P

que distam 12,5 m. A haste *B* (auxiliar) possibilita o retorno da corrente no aterramento.

Foram adotadas hastes de 3 m de comprimento para as topologias de aterramento e a distância entre as hastes *A* e *B* é de 20 m. O sistema de aquisição de dados capta as formas de onda através dos sensores de corrente e de tensão e as envia ao software desenvolvido na plataforma LABVIEW, que exibe e salva em um banco de dados todas as formas de onda medidas durante o ensaio.

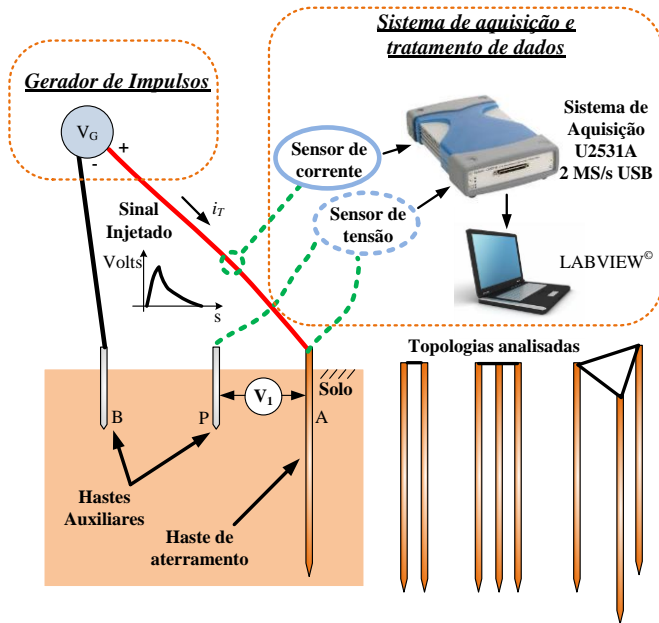


Figura 7 – Sistemas utilizados para um ensaio experimental de um sistema de aterramento.

Na Figura 8 são representadas as formas de onda da corrente em resistências de prova de 40, 60 e 120Ω.

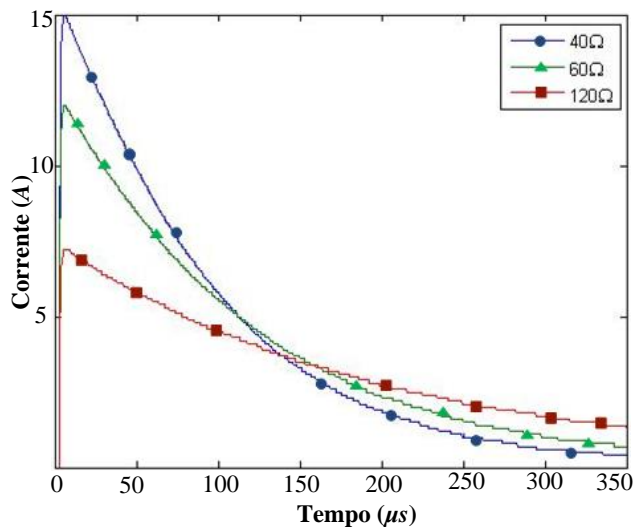


Figura 8 – Formas de onda da corrente injetada em cargas de prova.

As Figuras 9, 10, 11 e 12 apresentam os resultados experimentais da aplicação de impulsos de tensão nas topologias de aterramento previamente mencionadas.

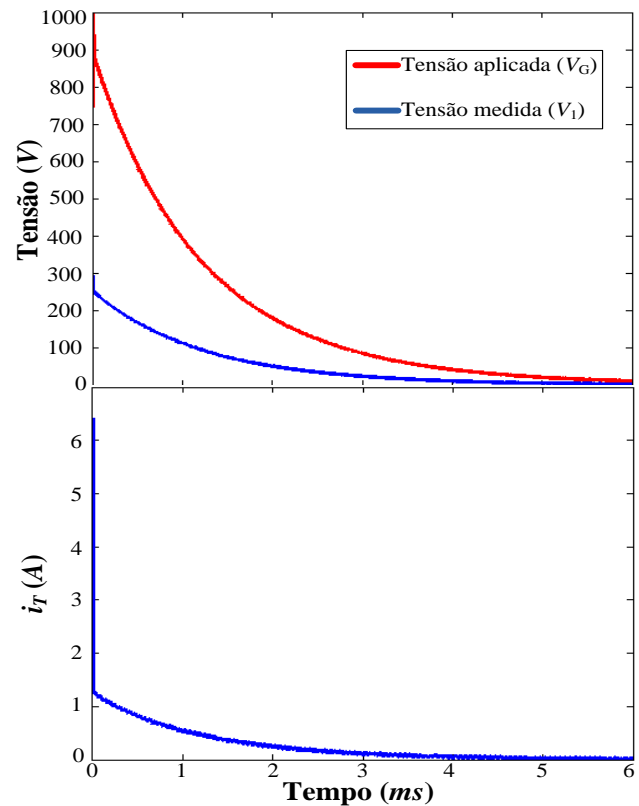


Figura 9 – Formas de onda da tensão e corrente para a topologia com uma haste vertical.

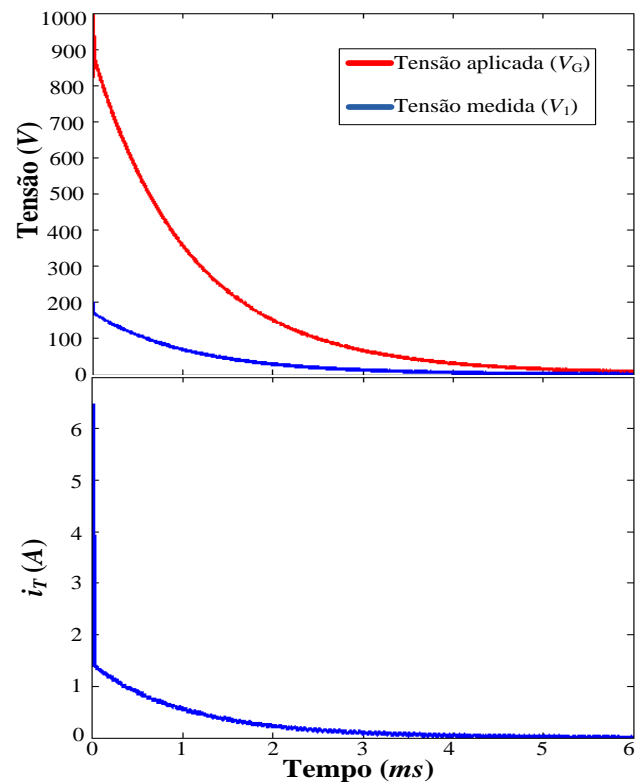


Figura 10 – Formas de onda da tensão e corrente para a topologia de duas hastes em paralelo.

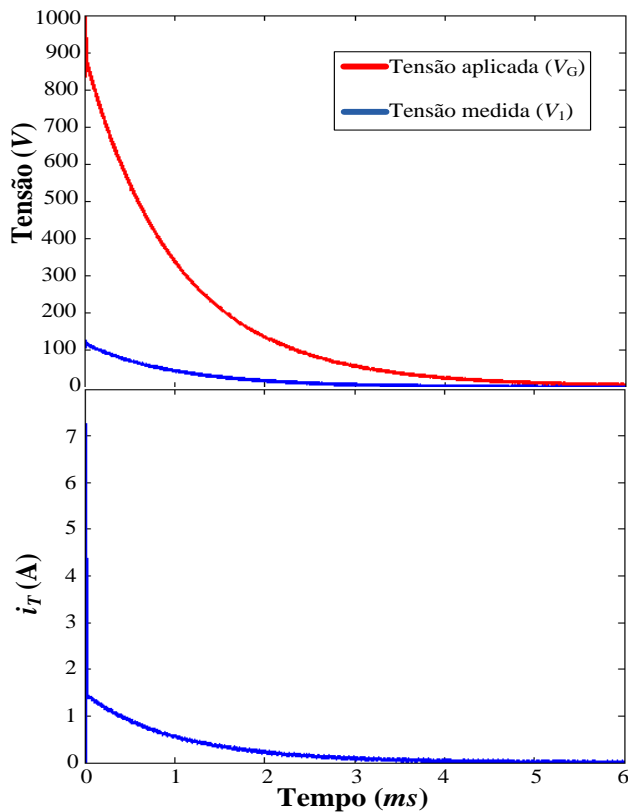


Figura 11 – Formas de onda da tensão e corrente para a topologia de três hastes em paralelo.

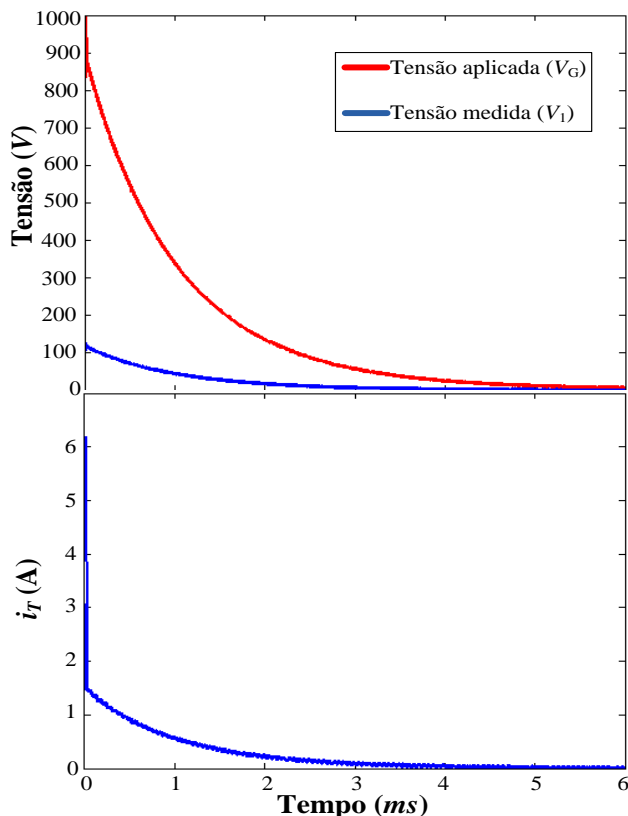


Figura 12 – Formas de onda da tensão e corrente para a topologia triangular.

A Tabela I apresenta alguns resultados das formas de onda da tensão V_1 e corrente i_T aplicadas nos quatro sistemas de aterramento analisados.

TABELA I PARÂMETROS DAS FORMAS DE ONDA DA TENSÃO (V_1) E CORRENTE (i_T)

Topologia	Pico de Tensão	Pico de Corrente	Tempo de meia onda (t_p)
Uma haste vertical	250 V	1,2 A	0,88 ms
Duas hastes em paralelo	175 V	1,3 A	0,82 ms
Três hastes em paralelo	120 V	1,4 A	0,78 ms
Hastes em triângulo equilátero	115 V	1,4 A	0,76 ms

A tensão aplicada na haste A cai devido à resistência do aterramento. Esta tensão é captada e medida pela haste auxiliar de sonda P e apresenta o valor de tensão V_1 . Como o circuito de medição tem uma impedância muito alta, a influência da resistência da haste auxiliar de sonda P pode ser desprezada dentro de certos limites. Ao redor da haste A (sistema de aterramento) é formada uma zona de gradiente de potencial durante a passagem da corrente elétrica. Assim, o valor da tensão medida aumenta conforme a distância entre as hastes A e P aumentam. Sempre se busca medir a tensão V_1 no ponto que a haste auxiliar de sonda se encontra dentro da zona de patamar de potencial. Em todas as topologias analisadas a corrente i_T apresenta uma forma de onda semelhante à da tensão e apresenta um decaimento da onda muito lento, logo, o solo se comporta essencialmente como uma grande resistência. À proporção que o número de hastes aumenta, ocorre uma diminuição na resistência de aterramento total e isso pode ser observado através das variações nos valores de pico de tensão e corrente. Além disso, a diminuição de resistência acarreta em uma sensível diminuição no tempo de meia onda (t_p).

O gerador de impulsos é capaz de aplicar um impulso de tensão na forma dupla exponencial em um sistema de aterramento. Para que, através das análises dos padrões das formas de onda das Figuras 9, 10, 11 e 12 captadas pelo sistema de aquisição, o software em desenvolvimento possa reconhecer a topologia do sistema de aterramento.

VI. CONCLUSÕES

O gerador de impulsos desenvolvido possui a vantagem em relação aos tradicionais geradores Marx de utilizar chaves semicondutoras que proporcionam uma baixa queda de tensão, longa vida útil, alta frequência de operação (trem de pulsos) e utiliza baixa tensão no seu controle. O proposto gerador de impulsos produz uma onda do tipo dupla exponencial que foi aplicada a diversas topologias de sistemas de aterramento com a finalidade de analisar o comportamento das formas de onda da tensão e corrente. Estas formas de ondas são captadas através de um sistema de aquisição de dados e de um software supervisor, que está em fase de desenvolvimento. Dessa

forma, se busca a possível a identificação da topologia de um sistema de aterramento já instalado, sem a necessidade de trabalhos mecânicos. Portanto, o sistema desenvolvido poderá ser usado no comissionamento de obras de sistemas de distribuição de energia elétrica para avaliar se os sistemas de aterramento instalados estão condizentes com os padronizados pela concessionária local.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos pesquisadores do LABTERRA da Universidade Federal do Ceará, à COELCE – Companhia Energética do Ceará e à CONCEMA – Consultoria em Ciências, Engenharia, Gestão de Sistemas e Meio Ambiente.

REFERÊNCIAS

- [1] M. S. Muhammad, E. Sulaiman, M. Z. Ahmad, S. A. Zulkifli and A. F. Othman, "Impulse Generator and Lightning Characteristics Simulation using Orcad PSpice Software," in *Proc. 2008EnCon.2nd Engineering Conference on Sustainable Engineering Infrastructures Development & Management*, pp. 1032-1037.
- [2] G. N. Glasoe, J. V. Lebacqz, *Pulse Generator*, New York: Mac-Graw Hill, 1948, pp.273-275.
- [3] L. M. Redondo, E. Margato, J. F. Silva, "Geradores Pulsados de Alta Tensão Baseados em Semicondutores" in *Proc. 2002 Conferência Científica e Tecnológica em Engenharia*, pp. 01-08.
- [4] J.W.Baek, M. H. Ryu, D. W. Yoo, H. G. Kim, "High Voltage Pulse Generator Using Boost Converter Array" *IEEE Transactions, IECON*, vol.01, pp. 395-399, 2002.
- [5] W. Jia, Z. Xiaoqing, "Double-Exponential Expression of lightning Current Waveforms," in *Proc. 2006 Conference on Environmental Electromagnetics*, pp.320-323.
- [6] M. S. Naidu, V. Kamaraju, *High Voltage Engineering*, 4thed. New Delhi: McGraw-Hill, 2009, pp. 173-210.
- [7] *IEC High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements*, IEC Std. 60060-1, 2010.
- [8] S. V. Filho, *Aterramentos Elétricos*, São Paulo: Artliber, 2012, pp 39-60.