



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ – UFOPA
INSTITUTO DE ENGENHARIA E GEOCIÊNCIAS – IEG
BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

NICHOLAS GUSTAVO DUARTE FURTADO

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO GERADOR DE MARX E ESTUDO DOS
EFEITOS INDUTIVOS SOBRE OS IMPULSOS DE TENSÃO**

SANTARÉM

2017

NICHOLAS GUSTAVO DUARTE FURTADO

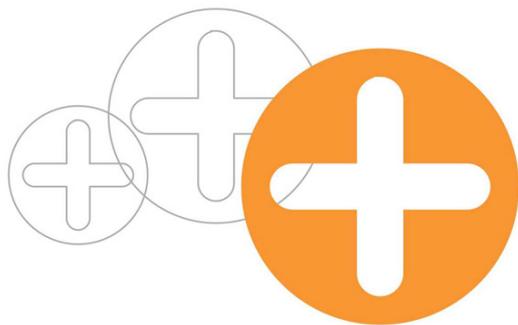
**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO GERADOR DE MARX E ESTUDO DOS
EFEITOS INDUTIVOS SOBRE OS IMPULSOS DE TENSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia para obtenção do grau de Bacharel em Ciência e Tecnologia na Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Engenharia e Geociências.

Orientador: Marcel Antonionni de Andrade Romano

SANTARÉM

2017



XX ENMC
ENCONTRO NACIONAL DE
MODELAGEM COMPUTACIONAL

VIII ECTM
ENCONTRO DE CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS



16 a 19 de Outubro de 2017
Instituto Politécnico - Universidade do Estado de Rio de Janeiro
Nova Friburgo - RJ

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO GERADOR DE MARX E ESTUDO DOS EFEITOS INDUTIVOS SOBRE OS IMPULSOS DE TENSÃO

Nicholas Gustavo Duarte Furtado¹ - nfgustavo@gmail.com

Marcel Romano Antonionni¹ - marcel.romano@ufopa.edu.br

¹Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Engenharia e Geociências - Santarém, PA, Brasil

Resumo. *Os sistemas de transmissão e distribuição de energia são, por diversos motivos, de fundamental importância para o desenvolvimento da sociedade. A fim de contribuir com a qualidade e confiabilidade destes sistemas, muitos estudos são direcionados para o campo das altas tensões, inclusive para uma importante ferramenta conhecida como gerador de Marx, capaz de reproduzir tensões impulsivas que se assemelham, entre outras sobretensões, a descargas atmosféricas. Pela dificuldade de ter acesso aos poucos geradores distribuídos pelo país, este trabalho se propôs a fazer um estudo geral da produção de impulsos de tensão, revisando equações e características dos circuitos geradores, além de procurar informações acerca de fenômenos de origem indutiva presentes nos impulsos de tensão reais. Para um maior aprofundamento no conhecimento do Gerador de Marx, foram realizadas simulações computacionais utilizando o software ATPdraw, que confirmaram a eficácia dos circuitos vistos em livros e também permitiram a visualização dos efeitos causados por indutâncias nos impulsos produzidos pelo gerador em questão.*

Palavras-chave: *Gerador de Marx, Impulsos de tensão, Simulação, Efeitos indutivos*

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos sistemas de transmissão e distribuição de energia contribui fundamentalmente com o avanço tecnológico, econômico, com a melhoria da qualidade de vida, entre outros aspectos positivos de uma região ou país. Sendo assim, faz-se necessário que estes sistemas sejam confiáveis, estáveis e seguros. Entretanto, sistemas elétricos não são isentos de falhas, e estão sujeitos a intempéries como descargas atmosféricas, surtos de manobras, harmônicos, sobretensões temporárias, etc.

A invenção dos transformadores e o conseqüente crescimento dos níveis de tensão na transmissão de energia foram marcos no setor energético. Porém, pelo fato de não haverem estudos aprofundados na área de alta tensão, os equipamentos dos sistemas de potência costumavam falhar por motivos completamente desconhecidos, ou ainda, eram superdimensionados para resistir às intempéries. Os fenômenos causadores destas falhas, em geral sobretensões, passaram a ser estudados, a fim de embasar projetos de mitigação dos seus impactos. As sobretensões

são classificadas em: sobretensões temporárias, decorrentes de falhas no aterramento, rejeição de carga, ressonância e ferrossonância (Ryan, 1994); sobretensões de manobra, causadas por energização ou interrupção das linhas de transmissão e sobretensões atmosféricas, que têm origem nas descargas atmosféricas sobre transformadores, cabos condutores ou em terra, que injetam corrente na rede elétrica.

O formato de onda impulsivo das sobretensões de manobra e atmosféricas são reproduzidos pelo Gerador de Marx, um equipamento de alta tensão constituído basicamente de capacitores que carregam em paralelo e descarregam em série através de resistências. Este equipamento é responsável por aplicar sobre uma carga, um impulso de tensão com os tempos de subida e descida desejados. O procedimento de aplicação de tensões impulsivas sobre uma carga idealizada como capacitiva é chamado de ensaio de tensão e obedece à norma ABNT IEC 60060-1 (2013).

O Gerador de Marx apresenta custo elevado e grandes dimensões, tornando-se de difícil aquisição para as instituições acadêmicas brasileiras, de forma que seu uso e aplicações ficam restritos a um pequeno número de laboratórios no país. Com o intuito de popularizar o conhecimento acerca do funcionamento do Gerador de Marx, assim como entender melhor a interação da carga com as tensões impulsivas, este trabalho realizará a simulação computacional do circuito gerador de Marx através do software livre ATPdraw. Também serão observados os efeitos de caráter indutivo no formato do impulso de tensão.

2. O IMPULSO DE TENSÃO

As sobretensões impulsivas podem ser criadas em laboratório através do uso de circuitos que, em geral, contém duas capacitâncias, e duas resistências conectadas conforme os arranjos da Figura 1. Nota-se que os circuitos são semelhantes, porém, estes diferem quanto à influência das resistências sobre os tempos de frente e cauda do impulso de tensão e também quanto à eficiência.

O funcionamento destes geradores de impulsos, que contém um único estágio, começa com o capacitor C_1 sendo carregado até a tensão V_0 . O centelhador de esferas G funciona como uma chave controlada por tensão, inicialmente aberta. Entretanto, quando a tensão sobre este chegar a V_0 , o mesmo irá se fechar e permitir que a carga de C_1 flua através de R_1 para o capacitor C_2 . Este capacitor, por sua vez, se carrega rapidamente, pois a razão C_1/C_2 deve ser sempre maior que 1. Vale ressaltar que a tensão sobre C_2 é a mesma entregue à carga, e que esta, ao chegar em sua amplitude máxima, começa a decair pois o circuito descarrega lentamente através de R_2 . Outro detalhe importante é que a capacitância do objeto de teste (C_T) é somada à C_2 , pois estas estão conectadas em paralelo.

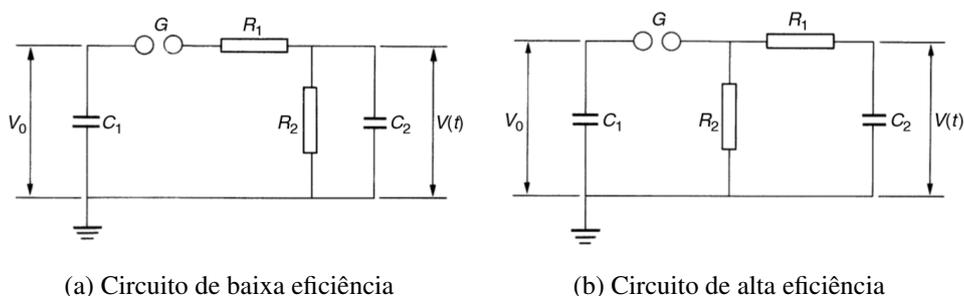


Figura 1- Geradores de impulsos de tensão. Fonte: Kuffel et al. (2000).

O equacionamento dos circuitos da Figura 1 podem ser encontrados em Kuffel et al. (2000) e Cagido (2014). Ambos os autores chegam à mesma expressão matemática (Eq. 1) para o impulso de tensão.

$$V(t) = \frac{V_0}{k(\beta - \alpha)} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

Onde

$$\alpha, \beta = \frac{a}{2} \mp \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - b} \quad (2)$$

As constantes b e k são as mesmas para ambos os circuitos, e como é mostrado nas Eq. 3 e 4, são calculados através das resistências e capacitâncias.

$$b = \left(\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right) \quad (3)$$

$$k = R_1 C_2 \quad (4)$$

Todavia, o valor de a , para o circuito de baixa eficiência (Fig. 1(a)), é dado pela Eq. 5

$$a = \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_2} \right) \quad (5)$$

Enquanto para o circuito de alta eficiência (Fig. 1(b)), a é dado pela Eq. 6.

$$a = \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_1} \right) \quad (6)$$

A curva de tensão resultante da Eq. 1 é apresentada na Figura 2. Nesta, estão destacadas a exponencial negativa (em azul), onde percebe-se a relação de α com o tempo de frente, e a exponencial positiva (em vermelho), que mostra a influência de β sobre o tempo de cauda.

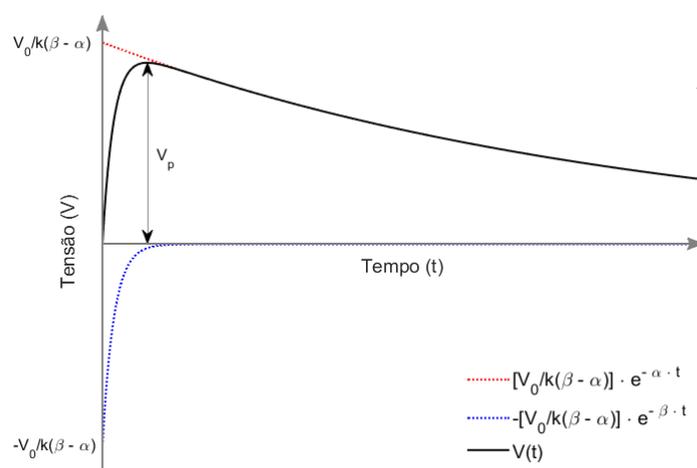


Figura 2- Impulso de tensão com forma característica de dupla exponencial. Fonte: o autor

A norma ABNT IEC 60060-1 (2013) padroniza os impulsos de tensão aplicados em ensaios de dielétricos. A Figura 3 apresenta graficamente como são calculados T_1 e T_2 . Por definição, o tempo de frente (T_1) é 1,67 vezes o intervalo temporal (T) entre os pontos A e B , onde A é o ponto em que o impulso alcança 30% da tensão de pico e B é o ponto onde o impulso alcança 90% da tensão de pico. A reta formada pelos pontos A e B corta o eixo das abscissas no ponto definido como origem virtual (O_1). O intervalo entre a origem virtual até o ponto em que a tensão decai para 50% da tensão de pico é o tempo de cauda (T_2).

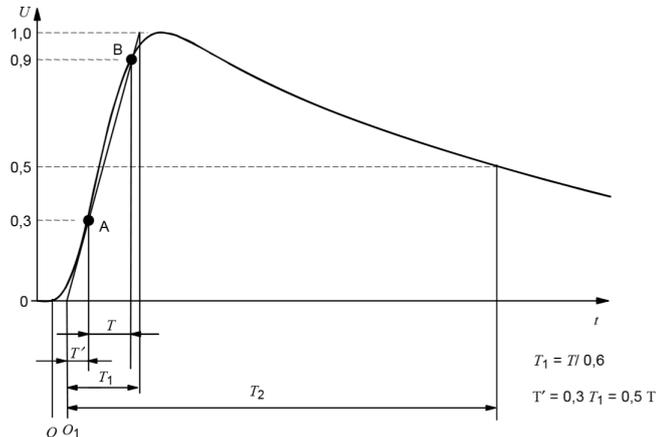


Figura 3- Parâmetros de tempo do impulso de tensão. Fonte: ABNT IEC 60060-1 (2013)

Colocando isto em equações, obtém-se:

$$T_1 = \frac{T_{90\%} - T_{30\%}}{0,9 - 0,3} \cong 1,67(T_{90\%} - T_{30\%}); \quad (7)$$

$$O_1 = T_{30\%} - 0,3T_1 \quad (8)$$

e

$$T_2 = T_{50\%} - O_1. \quad (9)$$

O formato de onda estabelecido pela norma, para ensaios com dielétricos e isolamento de transformadores, possui $1,2\mu s$ de tempo de frente e $50\mu s$ de cauda. Há uma tolerâncias de 5% para a tensão de pico a ser estabelecida, 30% para T_1 e 20% para T_2 .

3. O GERADOR DE MARX

Um gerador de impulsos contendo um único estágio deixa de ser viável ao se elevar o carregamento de C_1 para o nível de alta tensão. Segundo Naidu & Kamajaru (1995), o uso de um único capacitor para tensões acima de $200kV$ aumentaria significativamente seu custo e tamanho. Como forma de contornar este problema, o alemão Erwin O. Marx propôs um circuito que carregasse um conjunto de capacitores conectados em paralelo, e que estes fossem descarregados em série. Assim, uma fonte DC de baixa tensão seria capaz de gerar impulsos de centenas de Volts.

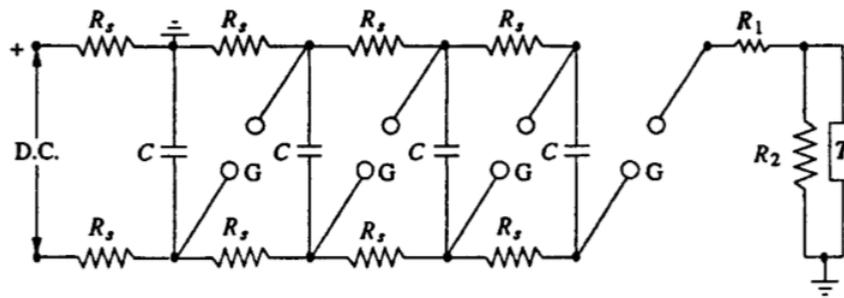


Figura 4- Gerador de Marx de múltiplos estágios. Fonte: Naidu & Kamajaru (1995)

Na Figura 4, está representado o esquemático do circuito idealmente concebido por Marx. Neste circuito, a fonte de tensão contínua carrega cada um dos capacitores C através dos resistores R_s . Naidu & Kamajaru (1995) ressaltam que o valor de R_s deve estar dimensionado para que a corrente de carregamento esteja entre 50 a 100mA e o tempo de carga varia entre 10 segundos a 1 minuto. A vantagem dessa escolha é a obtenção de cargas muito aproximadas em todos os estágios, e assim, a tensão resultante sobre o objeto testado é a tensão da fonte multiplicada pelo número de estágios.

Em termos teóricos e com fins de simulação, os centelhadores G são acionados ao mesmo tempo, alternando instantaneamente o tipo de conexão entre os capacitores. Mas na prática, é importante que o centelhador do primeiro estágio seja acionado, por meio de algum mecanismo, anteriormente aos demais. Com a elevação de tensão no segundo estágio, o gap de esferas correspondente também centelha em uma reação em cadeia. Por fim, a carga do gerador passa pelos resistores R_1 e R_2 responsáveis por moldar o impulso de tensão e interage com o objeto de teste T , que em geral é um elemento capacitivo.

Segundo Romano (2014), é importante que o gerador tenha uma construção especial, minimizando a indutância e impedindo a formação de um circuito ressonante capaz de produzir sobretensões (*overshoots*) e oscilações próximas à região de crista.

4. EFEITOS INDUTIVOS NO GERADOR DE IMPULSOS

A indutância é uma característica inerente aos circuitos elétricos práticos e mais perceptível na presença de variações bruscas de corrente. Os resistores e capacitores, por mais que sejam projetados para evitar traços indutivos, não são capazes de serem dispositivos considerados ideais. Além do mais, objetos de testes como transformadores de potência e reatores possuem uma indutância considerável.

Conforme observado por Naidu & Kamajaru (1995), quando são ensaiados objetos com grande capacitância ($C_T > 5nF$), é difícil controlar o impulso de tensão para que este atenda às tolerâncias de 30% para o tempo de frente (T_1) e 5% para a tensão de pico (V_p). Isso se deve ao conseqüente aumento dos efeitos indutivos. O autor define que a condição $R/(\sqrt{L}/C) \geq 1,38$ deve ser satisfeita para que V_p esteja dentro do limite especificado. Neste caso, $C = C_1 \cdot C_2/(C_1 + C_2)$.

Uma carga com características indutivas facilita a obtenção do tempo de frente apropriado e também uma boa eficiência, o mesmo não é válido para o tempo de cauda, cujo controle se torna mais difícil. À medida que $R/(\sqrt{L}/C)$ decresce, torna-se inevitável a ocorrência das oscilações e do *overshoot*. Algumas medidas para atenuar este problema são: conectar

uma grande resistência R_2 , ou aterrar o enrolamento não testado do gerador por meio de uma resistência adequada.

5. SIMULAÇÃO DO GERADOR DE MARX

Em uma breve introdução à ferramenta utilizada, pode-se dizer que o ATPdraw é uma ferramenta consolidada no ramo da engenharia elétrica. Com mais de 20 anos de existência, foi criada por H. K. Hoidalén. Este software é um pre-processador gráfico, que permite desenhar e simular circuitos elétricos com soluções baseadas no método de Bergeron e Integração Trapezoidal.

Como complemento ao que foi apresentado na teoria do gerador de Marx, foram implementados no software ATPdraw dois modelos alternativos deste gerador multiestágio. O primeiro modelo (Figura 5), inicialmente apresentado por Naidu & Kamajuru (1995), teve suas resistências e capacitâncias configuradas para se aproximar ao máximo do padrão $1, 2/50\mu s$.

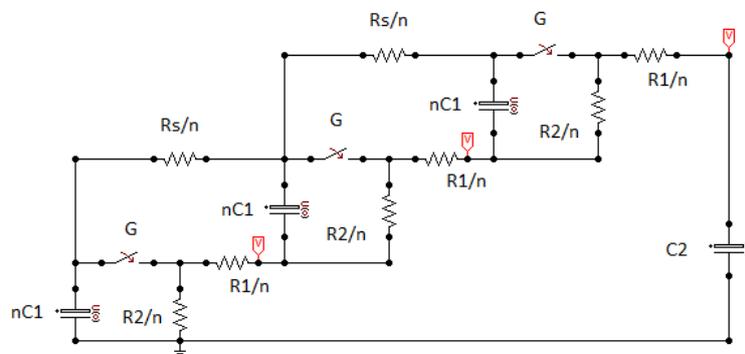


Figura 5- Circuito Gerador de Marx com resistências incorporadas. Fonte: o autor, via ATPdraw.

Este gerador conta com 3 estágios, e cada um destes contém resistores responsáveis por dar forma ao impulso de tensão. O valor das resistências R_1 e R_2 , correspondentes ao circuito gerador mais simples, é dividido pelo número n de estágios. E o módulo da capacitância C_1 , calculado com base na associação em série durante o impulso, deve ser multiplicado pelo fator n para cada estágio. As resistências R_s são grandes o suficiente para serem consideradas como circuito aberto durante a descarga do gerador.

O valor atribuído a R_1/n , R_2/n , R_s/n , nC_1 e nC_2 são respectivamente: 1Ω , 40Ω , 30Ω , $1.8\mu F$ e $2.0nF$. Os capacitores C_1 , internos ao gerador, estavam inicialmente carregados com uma tensão inicial de $30V$, de forma que se espera obter sobre C_2 uma tensão de pico V_p de $90V$. As chaves, simulando os centelhadores, foram programadas para fechar após $1ms$ a partir do início da simulação. As curvas de tensão resultantes estão dispostas na Figura 6.

Cada uma das formas de onda é correspondente à tensão em um estágio. Idealmente, o primeiro estágio deveria alcançar uma tensão de pico de $30V$, o segundo, por sua vez, $60V$ e o terceiro, $90V$. Mas a eficiência do circuito é sempre menor que 1, sendo que o aumento dos tempos de frente e cauda diminuem ainda mais a tensão V_p . Também deve-se considerar que R_s tem uma pequena influência sobre essas perdas. Os critérios de tempo do impulso de tensão estão aparentemente próximos ao que a norma estabelece. Nota-se que $V(t)$ está em aproximadamente $45V$ no instante $T_2 = 50\mu s$.

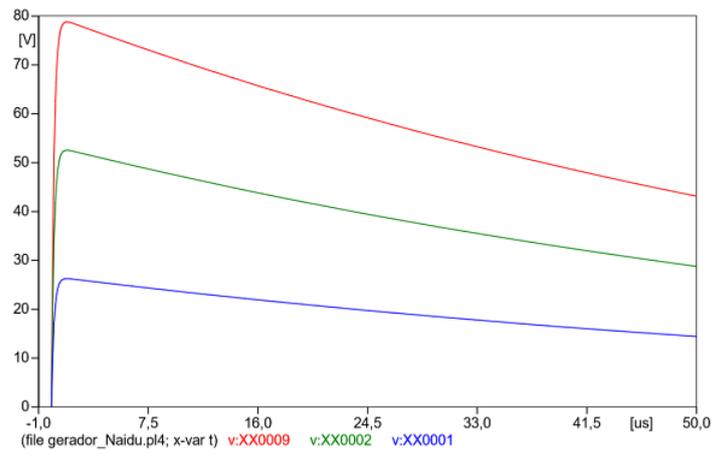


Figura 6- Tensão resultante do gerador de impulsos, por estágio. Fonte: o autor, via ATPdraw.

Outro arranjo possível para o gerador de Marx é mostrado na Figura 7. Este também possui os resistores responsáveis por modelar o impulso de tensão, incorporados ao gerador. Os efeitos indutivos e resistivos dos condutores e dispositivos também foram modelados e estão presentes no circuito na forma de elementos com baixa magnitude.

Em cada um dos 3 estágios há 2 capacitores, de $75nF$ cada, que na prática são conectados paralelamente sem o intermédio de resistores. Na simulação, porém, o condutor que conecta estes é modelado como uma resistência de $1m\Omega$. A indutância intrínseca do gerador é de $5\mu H$. O componente C_2 , devido as suas condições não ideais, aparece como uma associação em série de uma capacitância de $1,2nF$ com uma indutância de $10\mu H$. A capacitância da carga está considerada como inclusa em C_2 .

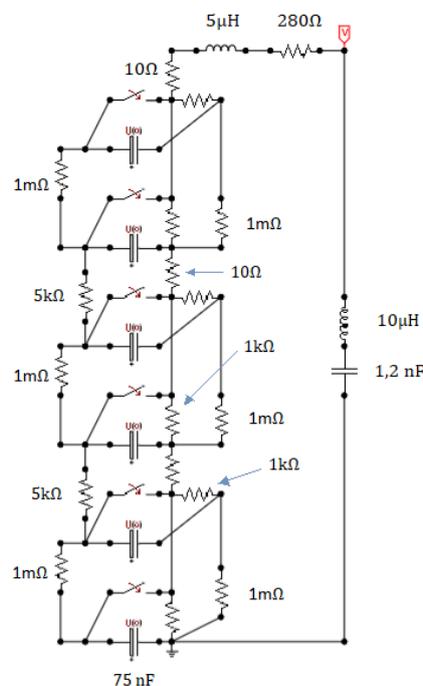


Figura 7- Gerador de Marx com arranjo alternativo. Fonte: o autor, via ATPdraw.

Pela disposição dos capacitores por estágio, esta estrutura é uma das mais comuns em laboratórios de alta tensão. Mas a indutância intrínseca do gerador chega a ser várias vezes maior que $5\mu H$. Cagido (2014), resalta que os próprios divisores de tensão resistivos, usados para permitir medições e normalmente conectados em paralelo com a carga, tem seu caráter indutivo evidenciado quando é constituído de resistências pequenas. Naidu & Kamajaru (1995), estima que os geradores de impulso tenham uma indutância de $3\mu H$ a $5\mu H$, e que os resistores de frente possuem cerca de $2\mu H$ por unidade.

O circuito da figura 7 foi usado para simular o que ocorre com as curvas de tensão ao considerar a indutância equivalente do gerador de Marx sendo igual a $5\mu H$, $50\mu H$, $100\mu H$ e $200\mu H$, respectivamente. O resultado é apresentado na Figura 8(a).

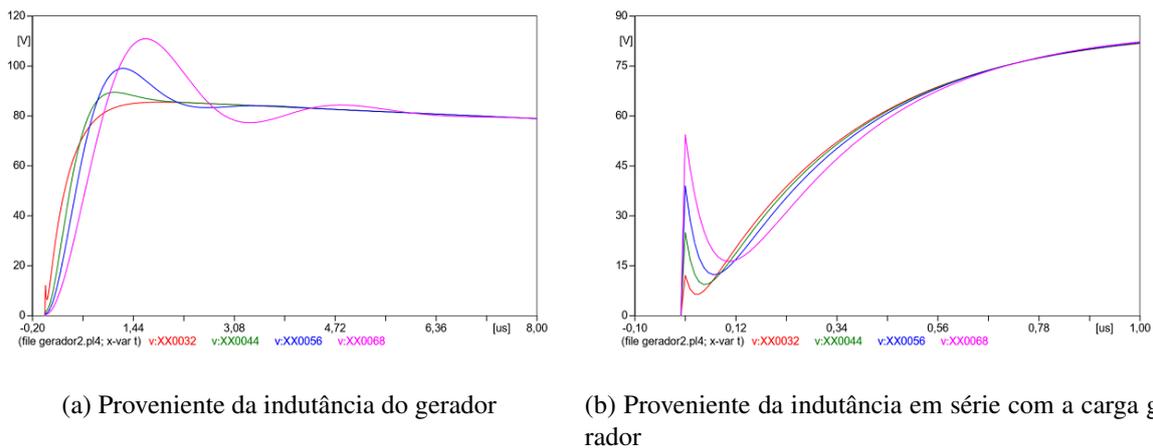


Figura 8- Oscilações de tensão causadas por indutâncias no circuito. Fonte: o autor, via ATPdraw.

A curva em vermelho é correspondente ao uso da indutância de $5\mu H$ e a rosa corresponde a $200\mu H$. A sobre-elevação de tensão, juntamente com a oscilação, é a característica mais indesejada decorrente do crescimento da indutância. Mas também é gerado um aumento discreto do tempo de frente do impulso.

Próximo à origem da curva em vermelho (menor indutância), percebe-se uma pequena oscilação, cuja amplitude é atenuada à medida em que o tempo de frente do impulso de tensão aumenta. A causa desta anomalia é a indutância L_{C_2} conectada em série com C_2 , e o resultado da sua variação é abordado na Figura 8(b). Nesta simulação, a indutância do gerador foi mantida no valor de $5\mu H$ enquanto o valor de L_{C_2} foi alternada entre $1\mu H$ (curva em vermelho), $5\mu H$ (verde), $10\mu H$ (azul) e $25\mu H$. Apesar da distorção causada por esta indutância ter uma duração muito pequena comparada ao impulso, sua amplitude é bastante elevada, de forma que alguns μH , podem provocar picos com até metade da amplitude V_p .

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho sintetiza informações importantes do campo de estudo de altas tensões, tratando de conceitos como parâmetros de tempo dos impulsos de tensão, especificações de norma, teoria acerca do gerador de Marx em sua concepção ideal e também o que é encontrado na prática, como os indesejados comportamentos indutivos tão comuns neste nível de tensão.

Por meio da modelagem e simulação, foi possível aprender, de maneira mais prática, os princípios de funcionamento dos circuitos geradores. Observou-se a capacidade que o gerador de Marx tem de multiplicar a tensão baixa de uma fonte D.C. pelo número de estágios utilizados, permitindo a produção de impulsos elétricos com energia suficiente para realizar ensaios em equipamentos como transformadores, reatores e isolantes.

Com base nos estudos de alguns autores, foi possível simular um modelo do gerador de Marx bem próximo ao circuitos reais utilizados em laboratórios. Analizou-se a capacidade que indutâncias presentes no circuito gerador de impulsos tem de aumentar o tempo de frente de onda, aumentar a amplitude máxima desta e provocar oscilações indesejadas.

Referências

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013), *NBR IEC 60060-1: Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão - Parte 1: Definições gerais e requisitos de ensaio*. 149 p.
- Cagido, M. C. (2014), “Impulsos Atmosféricos em Laboratório - Aplicação, Medição e Interpretação”, Monografia de Graduação, UFRJ/Escola Politécnica/Curso de Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro.
- Kuffel, E.; Zaengl, W. S.; Kuffel, J. (2000), “*High Voltage Engineering: Fundamentals*”, 2^a. ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann.
- Naidu, M. S.; Kamajaru, V. (1995), “*High Voltage Engineering*”, 2^a ed., McGraw-Hill Publishing Co. Lmtd. Bangalore.
- Romano, M. A. A. (2014), “*Software e Hardware para Análise de Ensaios de Impulsos Atmosféricos em Equipamentos para Média Tensão*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- Ryan, H. M. (1994), “*High Voltage Engineering and Testing*”, 2^a ed., The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom.

COMPUTER SIMULATION OF THE MARX GENERATOR AND STUDY OF INDUCTIVE EFFECTS ON VOLTAGE IMPULSES

Abstract. *The transmission and distribution systems of energy are, for various reasons, of fundamental importance for the development of society. In order to contribute to the quality and reliability of these systems, many studies are directed to the field of high voltages, including an important tool known as Marx generator, capable of playing impulsive voltages that resemble, among other overvoltage, lightning. The difficulty of having access to a few generators throughout the country, this paper is proposed to make a general study of the tension pulse production, reviewing equations and characteristics of generators circuits, as well as find information about phenomena of inductive origin present in the actual voltage pulses. For a deeper knowledge of the Marx generator, computer simulations were carried out using the ATPdraw software, which confirmed the effectiveness of the circuits seen in books and also allowed the visualization of the effects caused by impulse inductances produced by the generator in question.*

Keywords: *Marx Generator, Voltage Impulses, Simulation, Inductive Effects*