

Simulação e Análise de Transientes Atmosféricos em Sistemas de Carregamento de Veículos Elétricos

Igor Rodrigues De Nardi*, Adonis Ferreira Raiol Leal**,
Anderson Ricardo Justo de Araújo ***, José Pissolato Filho****.

* *Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, PA, Brasil*
(e-mail: igor.nardi@itec.ufpa.br).

** *Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, PA, Brasil*
(e-mail: adonisleal@ufpa.br)

*** *Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas, São Paulo, Brasil*
(e-mail: ajaraujo@unicamp.br)

**** *Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas, São Paulo, Brasil*
(e-mail: pisso@unicamp.br)

Abstract: As electric vehicles and renewable energy expand, there is also a need to investigate new methods of lightning protection for these new technologies. This paper aims to evaluate the performance of electric vehicle charging systems against lightning during their transitory regime. Models of two charging stations, one connected to the AC power network and the other disconnected, were used for the simulations. Additionally, a lightning transient model were used too. The results of this paper showed the changes in the waveforms at the input and output of the circuits, making it possible to assess which points are more vulnerable, requiring a better protection.

Resumo: À medida que os veículos elétricos e as energias renováveis se expandem, surge também a necessidade de investigar novos métodos de proteção contra raios para essas novas tecnologias. Este artigo tem como objetivo avaliar a performance de sistemas de carregamento de veículos elétricos frente às descargas atmosféricas durante seu regime transitório. Modelos de duas estações de carregamento, uma conectada à rede de energia CA e a outra desconectada, foram utilizados para as simulações. Além disso, um modelo transiente de descargas atmosféricas também foi usado. Os resultados deste trabalho demonstraram as alterações nas formas de onda na entrada e na saída dos circuitos, sendo possível avaliar quais pontos são mais vulneráveis, necessitando de maior proteção.

Keywords: Lightning Protection; Vehicle Charging; Transient Analysis; Charging Station; Lightning Overvoltage.

Palavras-chaves: Proteção Contra Descargas Atmosféricas; Carregamento de Veículos; Análise de Transiente; Estações de Carregamento; Sobretenção Atmosférica.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas de carregamento de baterias, geralmente, estão muito vulneráveis a induções eletromagnéticas provenientes de descargas atmosféricas. No geral, esse tipo de sistema se encontra muito exposto, por vezes havendo longos trechos de cabeamento entre a fonte principal (módulos fotovoltaicos, rede elétrica, etc) e o sistema de carregamento (conversores, controlador de carga, bateria, etc). Em muitos casos estão localizados em espaços sem cobertura, tornando-se um alvo fácil para incidência direta e indireta de raios. Isso se torna preocupante, uma vez que esses sistemas possuem muitos componentes sensíveis, como microprocessadores e circuitos integrados de alta precisão que podem ser facilmente danificados (Zhao et al. 2016).

Outra preocupação é a rápida expansão do mercado de carros elétricos no Brasil e no mundo, demandando assim mais

estações de carregamento. Em 2020, havia cerca de 5 milhões de veículos elétricos nas ruas, e esse número tende a crescer ano após ano. Essa demanda precisa ser protegida contra sobretenções e transientes provenientes de descargas atmosféricas (Raycap. 2020).

As descargas atmosféricas podem ocorrer diretamente sobre a fonte principal ou linhas de transmissão, o que resulta na propagação de surtos no sistema. Porém, segundo Raycap (2020), os maiores problemas para dispositivos eletrônicos vêm do surto elétrico resultante. Curtos circuitos e falhas no aterramento também podem ser contadas como possíveis fontes de danos. Ademais, qualquer outra falha no sistema de proteção pode acarretar na indução de grandes correntes nos circuitos de carregamento. Isso motiva os pesquisadores a buscar entendimento acerca dos impactos, propondo sempre novos métodos e simulações para análise (Mariut et al. 2014).

Khurshid e Gomes (2021) realizaram um estudo no qual investigaram um sistema fotovoltaico de 400 kW conectado à rede, simulando descargas atmosféricas tanto do lado AC quanto do lado DC do inversor, variando os valores de resistência de aterramento. Os resultados mostraram que quando os lados AC e DC são aterrados separadamente para valores de resistência diferentes de zero, os potenciais de linha chegam a valores muito altos, que representam um risco grave para a ocorrência de arcos. A situação é pior quando o raio atinge o lado DC e quando a resistência de aterramento do lado DC tem valores altos. A situação melhora significativamente quando os sistemas de aterramento são equipotencializados. Eles aconselharam atingir uma resistência à terra abaixo de 5 Ω para o sistema de aterramento integrado. Os pontos do circuito onde os autores aplicaram as descargas atmosféricas serviram de referência para o presente artigo.

O objetivo desse artigo, por sua vez, é investigar o efeito de descargas atmosféricas próximas à sistemas de carregamento de baterias. Para isso, foi modelado um sistema de carregamento off-grid de veículos elétricos e uma estação de carregamento de veículos elétricos ligada à rede. Sob esses sistemas, aplicou-se tensões impulsivas – (que representam as sobretensões causadas pela corrente impulsiva de um raio) - em pontos específicos dos circuitos, avaliando-se as formas de onda em diferentes pontos dos sistemas. Assim, pode-se definir métodos de proteção adequados e a instalação de dispositivos de proteção contra surto (DPS) em pontos estratégicos.

2. MODELAGEM

2.1 Modelagem da fonte de sobretensão impulsiva

Para avaliar os efeitos do impacto de um raio, pode-se utilizar modelos de fontes de sobretensão impulsiva, de modo a representar o efeito de uma descarga atmosférica padronizada quando esta atinge um ponto próximo aonde o sistema está localizado. Assim, avalia-se o efeito de tensões induzidas no sistema por campos magnéticos externos (Tan et al. 2015).

Foi utilizado o circuito proposto por Tan et al. (2015). Esse circuito reproduz uma sobretensão padrão de 1.2/50 μs, como recomendação do IEEE 1159.1 2009 e IEEE C62-41.2.2002. Isso significa que o impulso atinge o pico em 1,2 μs, decaindo em 50% em 50 μs após o início. Em (1) é descrito o comportamento do impulso produzido.

$$V(t) = Ae^{-\alpha(t-t_1)}.u(t - t_1) \quad (1)$$

Onde ‘A’ é a amplitude da tensão impulsiva, ‘α’ é o fator de amortecimento, ‘t1’ é o tempo que o impulso inicia, ‘u’ é a função degrau. Essa função foi implementada no software Simulink, conforme mostra o circuito mostrado na Fig. 1. Sua forma de onda é mostrada na Fig. 2, A igual a 10000, α igual a 14000 e t1 igual a 0,012;

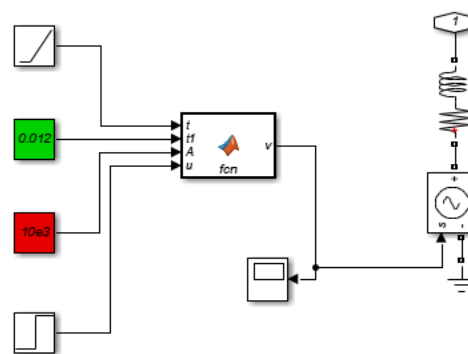


Fig. 1 Implementação da fonte de sobretensão impulsiva. Adaptado de Tan et al. (2015).

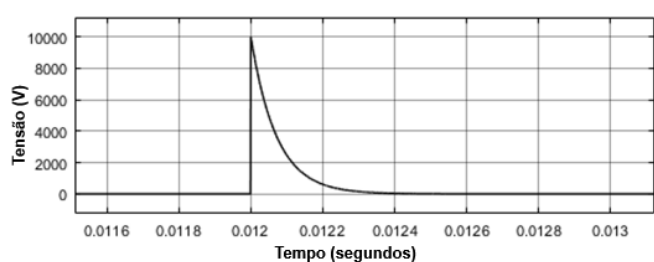


Fig. 2 Sobretensão impulsiva de amplitude 10 kV.

A impedância de acoplamento na saída do modelo, por sua vez, está relacionada com a distância a qual o impacto ocorreu, uma vez que determina a magnitude da forma de onda impulsiva. Quanto menor for essa impedância, mais próxima é a ocorrência do impacto em relação ao objeto (Tan et al. 2015).

A Fig. 3 mostra a aplicação do impulso atmosférico de 1 kV em uma fase de um circuito trifásico 220 V com carga puramente resistiva de 11.5 Ω. Para essa simulação, foi usada resistência de acoplamento igual a 10 Ω e indutância de acoplamento igual a 1 μH. A sobretensão é recebida pelo circuito em ‘t’ igual a 0,012s. Na Fig. 4 pode-se observar a forma de onda de tensão obtida com a perturbação.

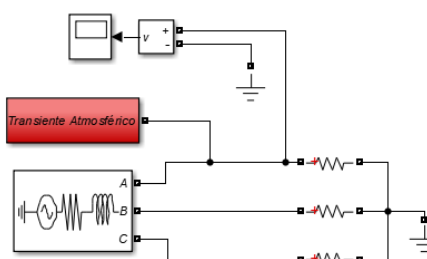


Fig 3 Aplicação de sobretensão impulsiva induzida em circuito com carga R.

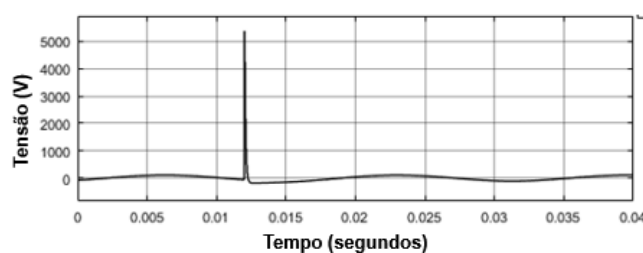


Fig. 4 Forma de onda do impulso no circuito com carga R.

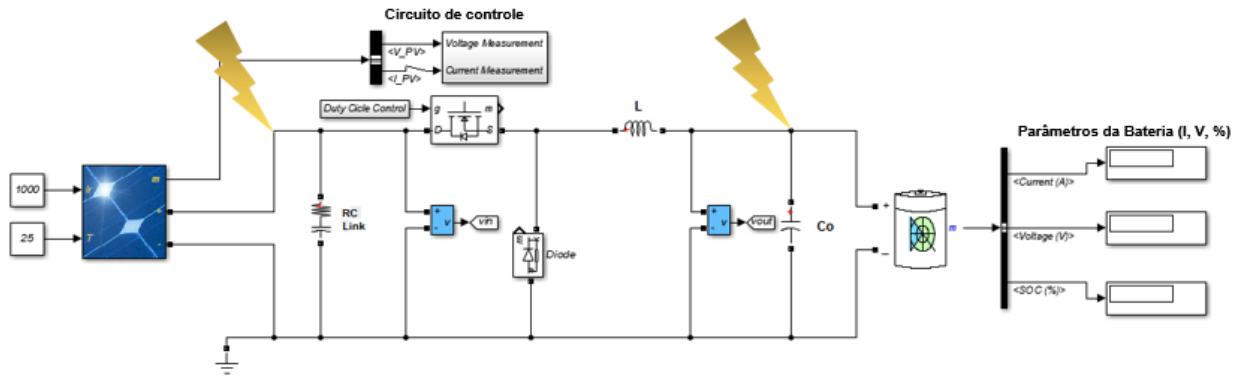


Fig. 5 Circuito de carregamento de baterias off-grid. Os raios amarelos indicam o ponto do circuito no qual o impulso atmosférico foi aplicado.

2.2 Modelos de sistemas de carregamento de baterias

A fim de avaliar o impacto de sobretensões induzidas em sistemas de carregamento de baterias, foi desenvolvido um sistema de carregamento de baterias off-grid baseado em no modelo proposto por Durgaprasad (2021) e um modelo de carregamento de baterias ligado à rede baseado em no modelo proposto por Lee et al. (2011). O primeiro modelo consiste em um arranjo fotovoltaico, Link DC, um conversor Buck e bateria.

O circuito implementado está mostrado na Fig. 5, bem como os pontos onde serão aplicados os transientes de sobretensão. O diagrama mostrado na Fig. 6 ilustra as etapas do sistema de carregamento off-grid. Os valores para os componentes do circuito estão descritos na Tabela 1.

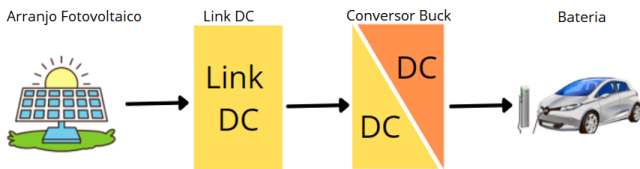


Fig. 6 Diagrama de carregamento de veículos elétricos usando painéis fotovoltaicos. Sistema desconectado da rede.

Para a estação de carregamento de veículos elétricos ligada à rede, foi utilizado o modelo proposto por Lee et al (2011). Este circuito consiste em uma rede trifásica 220V, com filtro LC na entrada do retificador AC-DC, um link DC e um conversor DC-DC conectado à carga, conforme indicado no diagrama da

Fig. 7. O circuito do sistema de carregamento de veículos elétricos conectado à rede está mostrado na Fig. 8.

A Tabela 2 mostra os valores utilizados para simulação no modelo de Lee et al (2011). O objetivo deste modelo é investigar qual seria a interferência de transientes atmosféricos na entrada do filtro LC, nas fases e na saída do retificador AC-DC. Na Fig. 8 é também indicado onde será aplicado o transiente de sobretensão para realização das simulações.

Tabela 1. Valores para os componentes do circuito de carregamento de veículos elétricos off-grid.

L	Co	Rlink	Clink	Painel FV	Bateria
0.8653 mH	369.79 μ F	1 m Ω	1000 μ F	212 W_p	12V _{CC} // 100 Ah

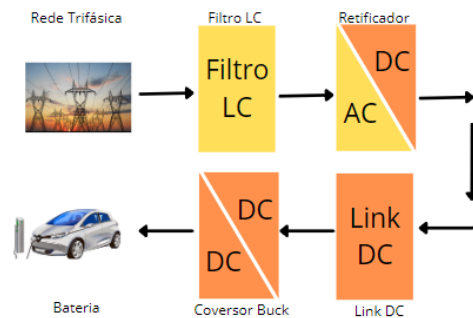


Fig. 7 Diagrama do modelo de carregamento de veículos elétricos ligado à rede

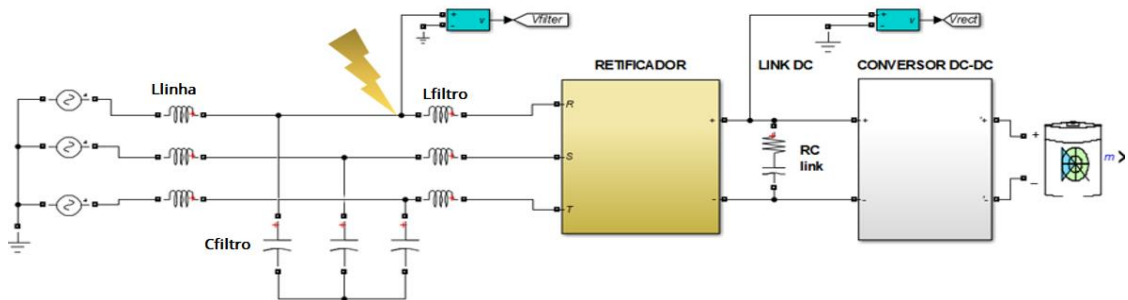


Fig. 8 Carregamento de veículos elétricos conectado à rede. O raio amarelo indica o ponto do circuito no qual o impulso atmosférico foi aplicado.

Tabela 2. Valores para os componentes do circuito de carregamento de veículos elétricos conectado à rede.

Llinha	Lfiltro	Cfiltro	Rlink	Clink
281 μ H	2.7 μ H	10 μ F	1 $m\Omega$	1000 μ F

Quanto ao tipo de bateria, foi utilizado o modelo de bateria de Íon de Lítio. Esse tipo de bateria é mais comumente utilizado em veículos elétricos, devido à fatores como tamanho, capacidade de recarga e ciclos de vida (Antunes. 2018).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Aplicação do transiente no sistema de carregamento de veículos elétricos off-grid

Para o circuito do sistema de carregamento off-grid, primeiramente foi aplicado um transiente na entrada do sistema, conforme indicado na Fig. 5. Essa simulação, na prática, representa um campo eletromagnético externo induzindo uma sobretensão impulsiva na entrada do circuito de conversão Buck. Para isso, foi utilizada uma impedância de acoplamento com R igual a 3 Ω e L igual a 1 μ H.

O tempo de impacto está em 0,012 segundo. Dessa forma, o sistema de carregamento ainda estará passando pelo regime transitório enquanto recebe impacto impulsivo. Primeiramente foi utilizada uma amplitude de sobretensão 1 kV. O resultado da leitura de tensão na entrada do conversor é mostrado na Fig. 9. A Fig. 10 mostra a leitura de tensão na saída do conversor.

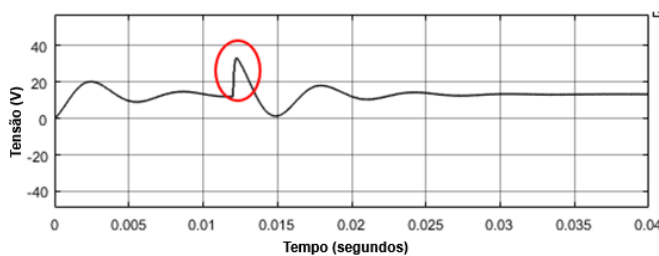


Fig. 9 Forma de onda da tensão na entrada do conversor com sobretensão impulsiva de 1 kV

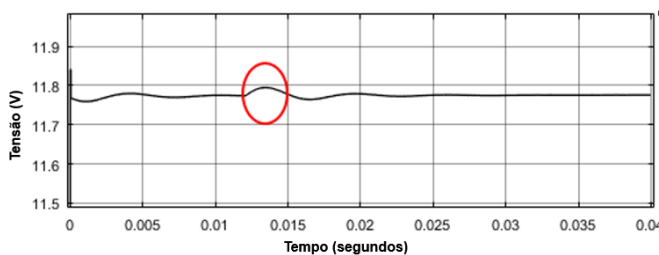


Fig. 10 Forma de onda da tensão na saída (bateria) com sobretensão impulsiva de 1 kV.

Pela Fig. 9 e Fig. 10, percebe-se que a sobretensão de amplitude 1 kV teve um pequeno impacto na entrada do circuito, com uma pequena oscilação na saída. Isso se deve à presença dos elementos indutivos e capacitivos no conversor Buck, que nesse caso também estão atuando como filtros

passivos, fazendo com que essa variação seja bastante atenuada na saída do circuito. Repetiu-se então a simulação para uma amplitude de 10 kV, mantendo-se os demais parâmetros do transiente. Os resultados estão mostrados na Fig. 11 e Fig. 12.

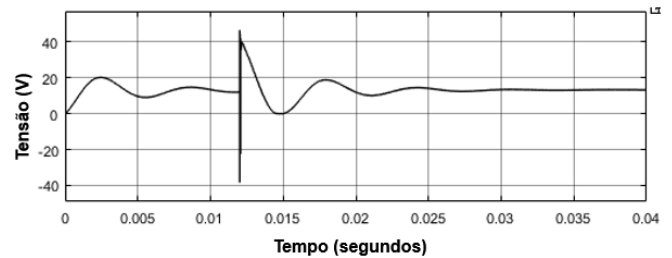


Fig. 11 Forma de onda da tensão na entrada do conversor com sobretensão de 10 kV

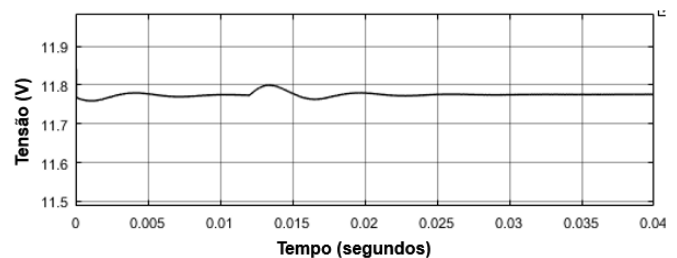


Fig. 12 Forma de onda da tensão na saída (bateria) com sobretensão de 10 kV.

Com o aumento da amplitude da sobretensão, é possível observar uma maior oscilação na tensão de entrada, porém, assim como na simulação com transiente de 1 kV, as oscilações na tensão de saída não foram tão significativas. Nesse caso, constatou-se uma vulnerabilidade maior a elementos ligados diretamente à entrada do conversor do que nas baterias. Como por exemplo, pode-se citar controladores de carga, circuitos de rastreamento, entre outros. Esse ponto do circuito se mostrou mais vulnerável e com maior possibilidade de causar danos a diversos elementos, sendo então justificada a instalação de dispositivo de proteção contra surto – DPS. Aplicou-se também o transiente atmosférico de 10 kV na saída do circuito, após o indutor L, conforme indicado na Fig. 5. Os resultados estão mostrados na Fig. 13, Fig. 14 e Fig. 15.

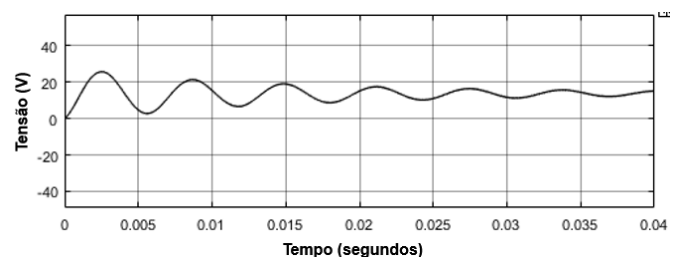


Fig. 13 Forma de onda da tensão na entrada do conversor, com sobretensão de 10 kV aplicada na saída

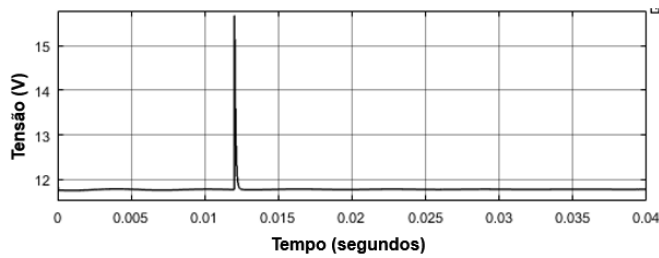


Fig. 14 Forma de onda da tensão na saída (bateria) com transiente aplicado na saída.

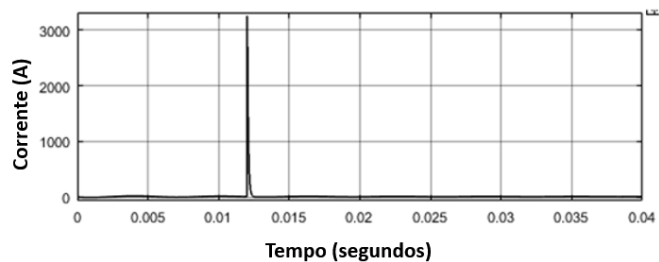


Fig. 15 Forma de onda da corrente na saída (bateria) com transiente aplicado na saída.

Nota-se que a entrada do circuito realiza o regime transitório normalmente, ao passo que a saída do circuito apresenta um pico de tensão e um grande pico de corrente. Uma vez que o sinal de sobretensão foi aplicada na saída do conversor, a ação de filtro não pode ser percebida pela bateria, que por sua vez absorve o impacto. Esse cenário é possível de ocorrer na prática, devido aos trechos de cabeamento existentes entre o controlador de carga e a bateria.

Caso não haja o isolamento adequado, estes condutores podem sofrer induções de corrente devido ao campo magnético externo, acarretando em sobretensões e sobrecorrentes na carga. Todavia, o cenário mais provável é a ocorrência de transientes no trecho de entrada do conversor, uma vez que pode receber os impactos provenientes da fonte ou de condutores associados a ela. Dessa forma, se justifica a instalação de DPS's justamente no trecho de saída da fonte de tensão, afim de proteger os componentes eletrônicos que estejam ali conectados.

Conforme mostrado na Fig. 5, foi considerado um aterramento ideal de impedância nula nas simulações. Esse aterramento não estava incluído no modelo inicial proposto por Durgaprasad (2021). Foi necessário o incluir, uma vez que sem a presença dele no modelo proposto por Durgaprasad (2021), e também, devido às características construtivas do modelo proposto por Tan (2015), o circuito transiente se mostraria como um circuito aberto em relação ao circuito de carregamento, não apresentando efeito algum na simulação.

3.2 Aplicação do transiente no sistema de carregamento de veículos elétricos conectado à rede

Foram realizadas simulações sobre o modelo proposto por Lee et al (2011). Aplicou-se transientes atmosféricos na entrada do filtro LC do retificador, observando a ação das tensões na entrada e na saída do retificador, uma vez que são considerados

vulneráveis do circuito. Transientes atmosféricos podem se propagar a partir linha de transmissão, atingindo o circuito do retificador e causando variações de tensão e corrente tanto na entrada como na saída do circuito. Assim, componentes eletrônicos sensíveis conectados podem ser danificados.

Nas simulações, foi utilizada resistência de acoplamento igual a 3Ω e indutância de acoplamento igual a $1 \mu\text{H}$. A amplitude do surto é de 10 kV e o tempo de início está em 0,012 segundo.

Nessa simulação, a sobretensão está sendo aplicada na fase R, conforme a Fig. 8. Na Fig. 16, Fig. 17 e Fig. 18 são mostradas as formas de onda nas três fases do circuito de entrada, respectivamente R, S e T.

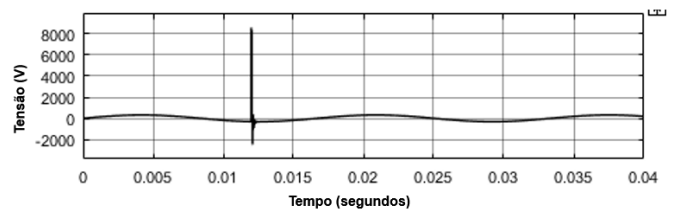


Fig. 16 Transiente atmosférico na fase R.

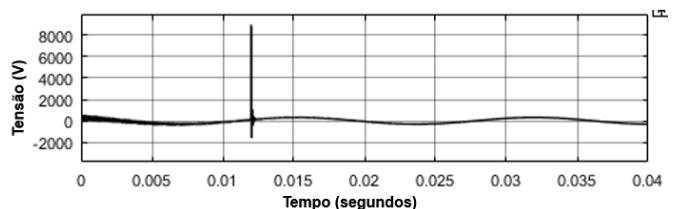


Fig. 17 Transiente atmosférico na fase S.

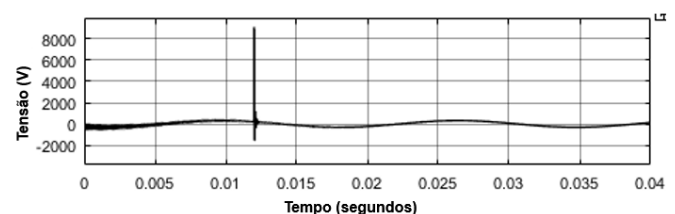


Fig. 18 Transiente atmosférico na fase T.

Observa-se que as demais fases (S e T) sofrem ação da tensão induzida na fase R. Esse comportamento se justifica pela presença dos capacitores de filtro, que interligam as fases. A Fig. 19 mostra o comportamento da forma de onda de tensão na saída do retificador.

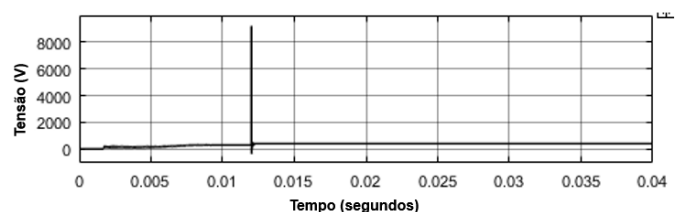


Fig. 19 Forma de onda da tensão na saída do retificador devido ao transiente atmosférico na fase R.

É possível observar um pico de tensão na saída do retificador. Essa oscilação pode ser bastante nociva para os elementos eletrônicos. Dessa forma, recomenda-se que esse seja um dos

pontos que devam ser protegidos com DPS's, assim como a entrada.

É importante levar em conta que o modelo proposto por Lee et al. (2011) originalmente não considera a presença de qualquer aterramento antes ou depois do retificador. Sendo assim, com intuito de avaliar a ação do aterramento nessa parte do circuito, foi incluído um aterramento ideal, conforme mostrado na Fig. 20 e Fig. 21, é possível verificar que essa medida foi capaz de mitigar completamente o fenômeno de sobretensão na saída do circuito. Isso indica que a presença desse elemento especialmente na saída da retificador é imprescindível para a proteção adequada do circuito.

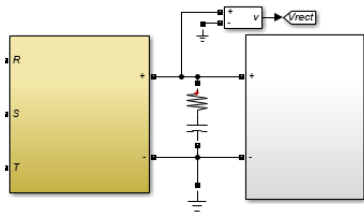


Fig. 20 Aterramento ideal adicionado no lado DC do retificador.

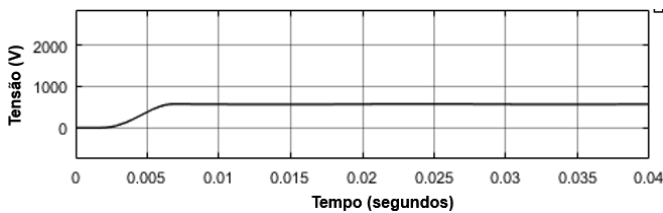


Fig. 21 Forma de onda na saída do retificador com a inclusão do aterramento.

3.3 Influência de modelos de aterramento no sistema de carregamento de veículos elétricos conectado à rede

A inclusão de aterramento ideal nas simulações torna as formas de onda de saída ideais e muito comportadas, muitas vezes divergentes da realidade. Pode-se avaliar a atuação do aterramento a partir de modelos de hastes verticais aterradas. Segundo Grcev et al. (2005), pode-se representar o aterramento por meio de uma simples resistência em baixa frequência. Em altas frequências, pode-se representar por um circuito RLC.

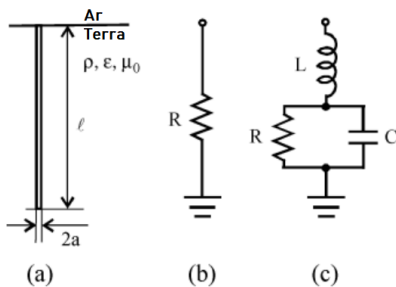


Fig. 24 Modelos de hastes de aterramento verticais. a) situação física; b) circuito equivalente em baixas frequências; c) circuito equivalente em altas frequências. Adaptado de Grcev et al. (2005).

Os parâmetros R, L e C são calculados por:

$$R = \frac{\rho}{2\pi\ell} \left[\ln \frac{4\ell}{a} - 1 \right] \quad (2)$$

$$C = 2\pi\epsilon\ell \left[\ln \frac{4\ell}{a} - 1 \right] \quad (3)$$

$$L = \frac{\mu_0\ell}{2\pi} \left[\ln \frac{2\ell}{a} - 1 \right] \quad (4)$$

Onde ϵ é a permissividade elétrica do vácuo, de aproximadamente $8,854 \times 10^{-12}$, e μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, de $4\pi \times 10^{-7}$, ℓ é o comprimento da haste, a é o raio da seção transversão da haste e ρ é a resistividade do solo.

A partir de (2), (3) e (4), calculou-se os valores de R, L e C para valores de ρ iguais a 10 Ω -m, 50 Ω -m, 100 Ω -m e 500 Ω -m. Considerou-se uma haste de comprimento ℓ igual a 3 m e o raio a igual a 7,1 mm. Os valores de R, L e C encontrados estão na Tabela 3.

Tabela 3. Modelagem da haste de aterramento vertical para diferentes resistividades do solo.

$\rho(\Omega\text{-m})$	R (Ω)	L (μH)	C (nF)
10	3,41	3,44	1,07
50	17,06	3,44	1,07
100	34,12	3,44	1,07
500	170,62	3,44	1,07

Com isso, foram realizadas simulações considerando tanto o modelo de aterramento R como também o modelo RLC. Para isso, considerou-se o modelo de carregamento de baterias de veículos elétricos ligada à rede, sob uma sobretensão impulsiva de 10 kV. Os valores de impedância de acoplamento são os mesmos das simulações anteriormente realizadas. Os resultados das simulações considerando o modelo R para os três valores de ρ estão na Fig. 22, Fig. 23, Fig. 24 e Fig. 25.

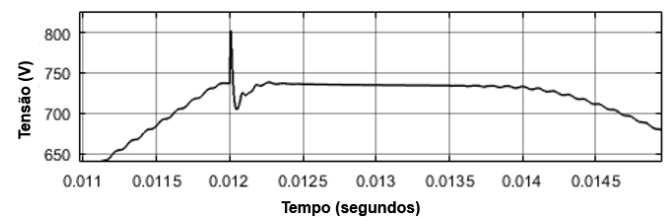


Fig. 22 Sobretensão na saída do retificador com aterramento R para ρ igual a 10 Ω -m. Tensão de pico: 802 V.

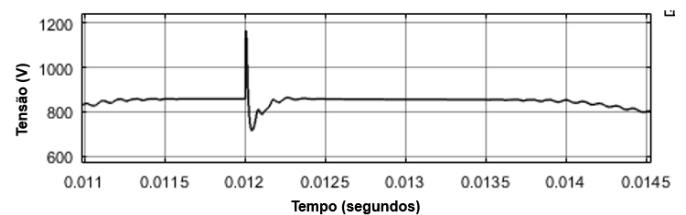


Fig. 23 Sobretensão na saída do retificador com aterramento R para ρ igual a 50 Ω -m. Tensão de pico: 1167 V.

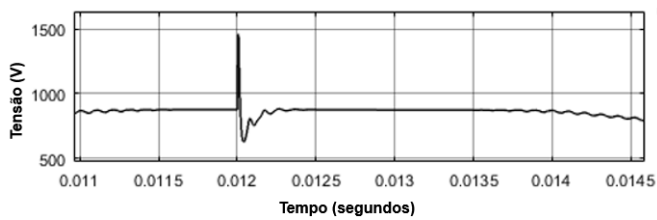


Fig. 24 Sobretensão na saída do retificador com aterramento R para ρ igual a 100 Ω -m. Tensão de pico: 1460,5 V.

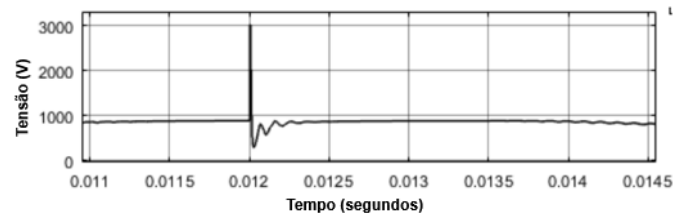


Fig. 29 Sobretensão na saída do retificador com aterramento RLC para ρ igual a 500 Ω -m. Tensão de pico: 3028V

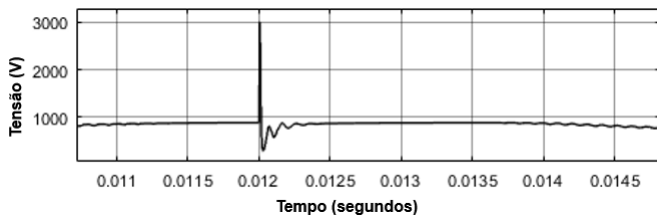


Fig. 25 Sobretensão na saída do retificador com aterramento R para ρ igual a 500 Ω -m. Tensão de pico: 2994 V.

Já para o modelo RLC, tem-se resultados mostrados na Fig. 26, Fig. 27, Fig. 28 e Fig. 29.

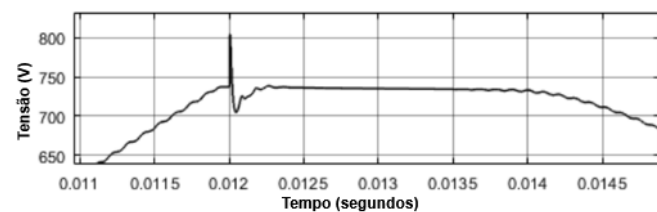


Fig. 26 Sobretensão na saída do retificador com aterramento RLC para ρ igual a 10 Ω -m. Tensão de pico: 803,8 V.

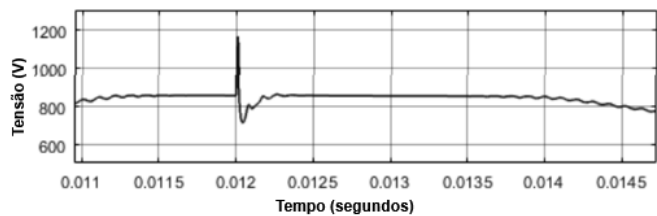


Fig. 27 Sobretensão na saída do retificador com aterramento RLC para ρ igual a 50 Ω -m. Tensão de pico: 1167 V.

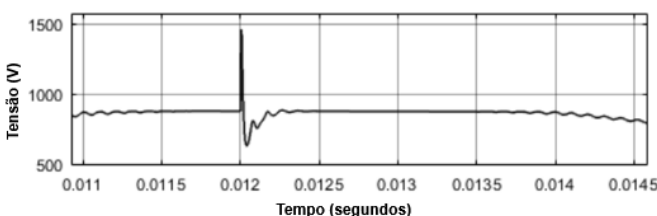


Fig. 28 Sobretensão na saída do retificador com aterramento RLC para ρ igual a 100 Ω -m. Tensão de pico: 1459,5 V.

Observa-se que, com o aumento da resistividade do solo ρ , as tensões de pico medidas são cada vez maiores. Não foram observadas diferenças significativas entre o modelo de haste R e o modelo RLC para essa aplicação. Isso se deve às relativas baixas frequências à qual o sistema está exposto. As pequenas diferenças observadas podem ser justificadas pelo período de passo da simulação, que foi realizado em 10^{-7} segundos. Nota-se ainda que a variação da resistência de aterramento R afetou diretamente os valores de tensão na saída do regime transitório, bem como as curvas de subida e inclinação do regime transitório.

4. CONCLUSÕES

O artigo analisou os transientes desenvolvidos frente às descargas atmosféricas em sistemas de carregamento de bateria. Verificou-se a forma de onda da tensão em diferentes pontos dos circuitos para diferentes aplicações de distúrbios impulsivos de frente rápida. O modelo para estudo de transientes proposto se mostrou adequado para o estudo das tensões induzidas desenvolvidas por um campo magnético externo.

Quando o distúrbio foi aplicado no modelo proposto por Durgaprasad, na entrada conversor Buck, observou-se que a saída não se mostrou tão afetada, ao passo que a entrada apresentou sobretensões. Essa situação é bastante provável de acontecer, uma vez que esse lado do circuito está mais próximo da fonte de tensão. Surtos induzidos na fonte podem se propagar até a entrada do circuito do conversor, prejudicando componentes eletrônicos associados. É, portanto, recomendada uma proteção maior por meio de DPS's nesse ponto.

Nas simulações realizadas sobre o modelo proposto por Lee, observa-se que os transientes presentes na entrada do retificador, na fase R, apresentam efeitos em outras fases, devido aos capacitores de filtro. A parte DC do retificador (saída) apresentou também oscilações de tensão. Com a aplicação do aterramento ideal no Link DC, verifica-se que o transiente foi completamente mitigado, o que denota a importância de bons aterramentos para prevenir os danos causados por esses surtos. Contudo, com o aumento da resistividade do solo, e por consequência da impedância de aterramento nos modelos elétricos das hastes verticais, nota-se que ocorre um aumento significativo das tensões, em especial seus valores de pico. Como isso, proteções mais robustas devem ser projetadas para esse tipo de circuito frente às descargas atmosféricas durante o regime transitório.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Universidade Federal do Pará – UFPA –, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE –, ao Laboratório de Pesquisa em Descargas Atmosféricas – LPDA e à Universidade de Campinas – UNICAMP, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – pela bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

- Antunes, P. D. R. (2018). Veículos Elétricos: funcionamento e seus benefícios. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Universitário UNIFACVEST.
- Durgaprasad, Sankarshan. (2021) ‘Charging of Battery Using Buck Converter powered by PV MPPT’. *Mathworks*. Matlab Central File Exchange. Disponível em: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/91410-charging-of-battery-using-buck-converter-powered-by-pv-mppt?s_tid=prof_contriblnk. Acesso em: 29/11/2021.
- Grcev, Leonid, and Popov, Marjan. (2005). On High Frequency Circuit Equivalents of a Vertical Ground Rod. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Volume 20. 1598-1603.
- Khurshid, Z.M., and Gomes, C. (2021). Impacts of Earthing Arrangement on Lightning Protection Efficiency of Grid Connected PV System. *35rd International Conference on Lightning Protection*. Sri Lanka.
- Lee, Jung-Hyo et al. (2011). ‘Fast Charging Technique for EV Battery Charger using three-phase AC-DC Boost Convert’; *37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, IECON. Melbourn, Australia.
- Mariut, Larisa, and Helerea, Elena. (2014). Electromagnetic Analysis – Application to Lightning Surge Phenomena on Power Lines. *2014 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering*. University Politehnica of Bucharest; Romania.
- Raycap. (2019). Overvoltage Protection of Electric Vehicle (EV) Charging Infrastructures Globally. *Raycap Article*. Disponível em: https://www.raycap.com/wp-content/uploads/EV-Charger-Global-Application-paper_EN.pdf. Acesso em: 21/11/2021.
- Tan, Rodney H. G., and Ramachandaramurty, Vigna K. (2015). A Comprehensive Modeling and Simulation of Power Quality Disturbances Using Matlab/Simulink. *INTECH Open Book*. Disponível em: www.intechopen.com/chapters/48982. Acesso em: 21/11/2021.
- Zhao, J., Zhang, H., Lu, Q., Xu, C., and Yang, G. (2016). Lightning Protection of Electric Vehicle Charging Infrastructure. *33rd International Conference on Lightning Protection*. Estoril, Portugal.