



AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS TENSÕES INDUZIDAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO PROVENIENTES DE INCIDÊNCIAS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

André M. Alzamora*¹, Rafael H. Milhorim², Paulo H. O. Rezende¹

¹FEELT – Universidade Federal de Uberlândia

Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Bloco 3N, 38408-100, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil

²Faculdade de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Av. Dr. Randolpho Borges Junior, 1250, Univerdecidade, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

Resumo – Nos últimos anos, o grande número de pedidos de ressarcimento por danos ocorridos em equipamentos elétricos e eletrônicos têm gerado grande preocupação nas concessionárias de energia. Diante disso, trabalhos e estudos com o emprego de recursos computacionais vêm sendo desenvolvidos para que se possa reconstituir o fato ocorrido e determinar a consistência ou não donexo causal. Um dos fenômenos anômalos causador desses danos e merecedor de estudos é a descarga atmosférica, responsável pelo aparecimento das maiores sobretensões do sistema elétrico. As descargas atmosféricas podem incidir em um sistema elétrico de forma direta (sobre a linha de transmissão ou rede de distribuição) ou indireta (ocorre com maior frequência), quando ocorrem mecanismos de indução eletromagnéticos. Sendo assim, este trabalho destina-se ao estudo e modelagem de descargas atmosféricas incidindo diretamente ou indiretamente em sistemas elétricos, analisando o comportamento do sistema após a incidência das mesmas através do programa ATP/ATPDraw.

Palavras-Chave – Descarga Atmosférica, Qualidade de Energia Elétrica, Tensão Induzida, Sobretensão.

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF INDUCED VOLTAGES ON TRANSMISSION AND DISTRIBUTION LINES FROM LIGHTNING INCIDENTS

Abstract - In recent years, the large number of claims for compensation for damages in electrical and electronic equipment have generated great concern by electric utilities. Therefore, studies and researches using computational resources have been developed in order to reconstitute and determine the consistency or not of the causal nexus. One of the anomalous phenomena that causes these damages which deserves studies is the atmospheric discharge, responsible for the largest overvoltages in the electrical system. Atmospheric discharges can strike an electrical system directly (over

the transmission or distribution line) or indirectly (occurs more frequently), when electromagnetic induction mechanisms occur. Thus, the objective of this research is to study and model atmospheric discharges that strike directly or indirectly the electrical systems through the analyses of the behavior of the system after the incidence of them by the utilization of the ATP/ATPDraw program.

Keywords – Atmospheric Discharge, Electrical Power Quality, Induced Voltage, Overvoltage, Computational Simulation.

I. INTRODUÇÃO

A descarga atmosférica é uma descarga elétrica de origem atmosférica que ocorre entre uma nuvem e a terra ou entre nuvens, consistindo em um ou mais impulsos de vários quiloampères. O relâmpago, que é um fenômeno natural visível ao olho humano, é uma intensa emissão de radiação eletromagnética decorrente da descarga. Já o trovão é um grande estrondo sonoro causado pelo deslocamento de ar que a descarga provoca. Em frações de segundos, a elevação térmica pode chegar a 30000°C. As descargas atmosféricas podem afetar o sistema elétrico de forma direta, quando incidem sobre a linha de distribuição ou transmissão, ou de forma indireta, quando incide sobre o solo, gerando tensões induzidas no sistema elétrico [1].

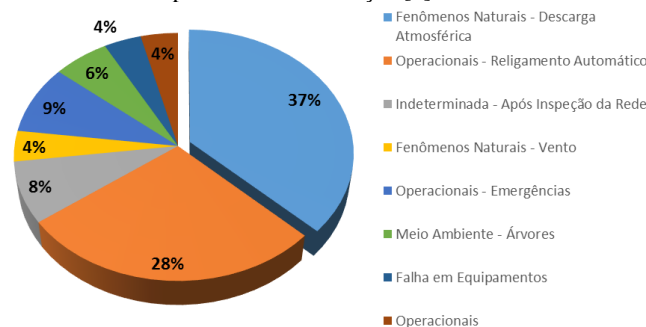
Nos últimos anos, o assunto em foco tem motivado diversos trabalhos e estudos. Isto se deve ao fato de que as descargas atmosféricas constam como a principal causa das reclamações direcionadas às distribuidoras de energia elétrica, em virtude de danos ocorridos em equipamentos elétricos e eletrônicos. A Figura 1 mostra os principais fenômenos aos quais estão associados os pedidos de indenização de consumidores [2].

Porém, a correlação entre tais distúrbios e os danos a eles atribuídos constitui-se em motivos para discussões e avaliações mais criteriosas, não bastando a existência do fenômeno para uma justa correlação entre causas e efeitos. Diante disso, o grande número de pedidos de ressarcimento por danos em equipamentos elétricos e eletrônicos vêm motivando investigações direcionadas à melhoria do

*andre.alzamora@outlook.com

processo de análise das questões em foco, incluindo o domínio e difusão do conhecimento da correlação entre distúrbios e efeitos. Além disso, vêm motivando também o fornecimento de diretrizes para o oferecimento de produtos que possuam um maior nível de suportabilidade diante dos distúrbios típicos em redes elétricas [3].

Figura 1 - Principais fenômenos aos quais estão associados os pedidos de indenização [2].



Através do desenvolvimento de uma estratégia de modelagem matemática, a qual é resumidamente descrita na sequência do trabalho, o fenômeno da indução eletromagnética é considerado e implementado no programa ATP/ATPDraw [4]. A partir destes desenvolvimentos complementares, são realizadas investigações e observações a respeito de descargas atmosféricas indiretas ocorridas em linhas de transmissão e distribuição. Para efeito de comparação, também são consideradas e implementadas descargas atmosféricas diretas nas linhas. Diante dessas considerações, os surtos atmosféricos foram representados por fontes disponíveis no *software* citado e descritas com maiores detalhes em seções subsequentes.

II. METODOLOGIA PARA CÁLCULO DA TENSÃO INDUZIDA POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Em consonância com o *software* ATP, a representação de uma descarga atmosférica é feita pelo usuário considerando que a mesma tenha atingido uma das três fases de maneira direta. Este recurso pode ser aplicado de duas formas distintas: impulso de corrente ou de tensão incidente sobre a fase escolhida.

Conforme indicado na Figura 1, a principal causa associada aos pedidos de ressarcimento por danos elétricos são as descargas atmosféricas. Muito embora as sobretensões causadas de maneira direta possam atingir maiores amplitudes do que aquelas induzidas por descargas atmosféricas nas proximidades das redes de distribuição e linhas de transmissão, estas últimas geralmente representam maiores incidências de problemas para empresas distribuidoras de energia elétrica. Isto se deve a sua maior frequência de ocorrência somada com as baixas resistências ôhmicas dos condutores que perfazem as redes de distribuição [5].

Diante dessa realidade, procede-se a seguir com um conjunto de considerações aplicáveis ao tratamento da matéria da indução eletromagnética advinda da incidência das descargas atmosféricas almejando, sobretudo, a

caracterização e modelagem dos fenômenos manifestados sobre as redes de distribuição e seus consumidores.

A. Metodologia de Cálculo

A primeira proposta identificada na literatura destinada ao cálculo teórico da tensão induzida por uma descarga atmosférica numa linha de transmissão foi feita por K. W. Wagner, em 1908 [6]. Desde esta data, vários trabalhos foram desenvolvidos, avançados e publicados sobre este assunto. De forma especial, merece destaque, os trabalhos conduzidos por Sune Rusck em 1957, o qual, em sua tese de doutorado [7], propôs uma expressão analítica para o cálculo da tensão induzida utilizada como fundamento para todas as metodologias atualmente em uso. Este trabalho considerou que a tensão induzida numa linha elétrica devido a descarga atmosférica é exclusivamente provocada pela corrente de retorno, que flui pelo canal da descarga.

Pela importância dos trabalhos realizados e publicados, a metodologia em pauta se mostrou adequada e foi acatada pela comunidade científica e, não obstante o reconhecimento da existência de trabalhos mais atuais, os fundamentos introduzidos por esse artigo ainda continuam válidos e aplicáveis ao assunto em foco.

Quando da elaboração de sua teoria, Rusck valeu-se de um sistema de três condutores posicionados horizontalmente, a certa altura acima do nível do solo, representando uma linha de transmissão trifásica, e um canal de descarga por onde flui a corrente de retorno no sentido do solo para a nuvem.

Visando simplificar o estudo, foram realizadas considerações pontuais, as quais não impactaram significativamente nos resultados esperados. Algumas delas são listadas a seguir [8]:

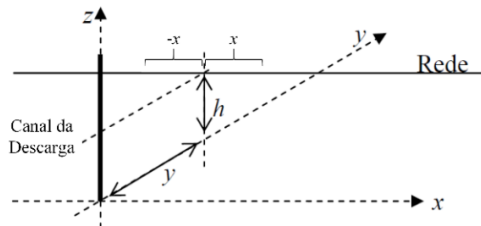
- A descarga incide perpendicularmente ao solo, ou seja, através de um canal de descarga retilíneo e vertical;
- Apesar da distribuição das cargas elétricas no canal de descarga não ser uniforme devido à variação da capacitância de acordo com a proximidade do solo, pode-se considerar que em altitudes menos elevadas (algumas centenas de metros), elas variam pouco, fato este determinante para a adoção de uma distribuição uniforme de cargas pelo canal de descarga;
- Como consequência das premissas acima, a forma de onda da corrente de retorno é considerada do tipo “degrau”, propagando-se sem distorções ao longo do canal;
- Outra hipótese adotada está no fato que o solo é tratado como um condutor perfeito. De fato, a resistividade deste só começa a ser significativa para distâncias elevadas entre o canal de descarga e a linha de transmissão;
- Tendo por base os fenômenos postos, fica evidenciado que as descargas são capazes de gerar tensões induzidas significativas na linha somente até algumas centenas de metros, fato este que permite empregar o método das imagens para o cálculo do campo eletromagnético envolvido;

- Por fim, a linha de transmissão ou distribuição junto à qual será induzida uma tensão, é considerada infinita e sem descontinuidades.

O método proposto considerou então que a tensão induzida num determinado ponto físico do sistema elétrico se apresenta na forma de um efeito combinado entre o campo elétrico criado no solo e pela própria corrente de descarga.

Objetivando uma expressão analítica da tensão induzida em uma linha longa, foram feitas as seguintes considerações: o canal de descarga foi representado ao longo do eixo z; a extensão da linha objeto do estudo da indução foi admitida ao longo do eixo x (com altura h) e, por fim, a grandeza representada por y corresponde à distância entre a linha física e o local de incidência da descarga. Este arranjo é indicado na Figura 2.

Figura 2 - Sistema utilizado para expressão da tensão induzida [9].



Por fim, o maior valor para a tensão induzida em uma linha, é no ponto mais próximo da descarga ($x=0$), sendo dado pela Equação 1.

$$U_{m\acute{a}x} = \frac{30I_0h}{y} \left[1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{v}{c} \right) \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c} \right)^2}} \right) \right] \quad (1)$$

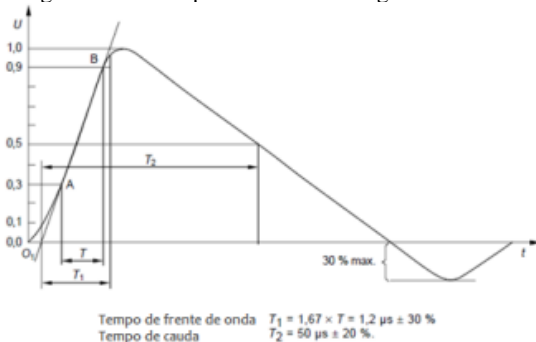
Onde:

- I_0 - Corrente de pico de descarga [A].
- v - Velocidade da corrente de retorno [m/s].
- c - Velocidade da luz no vácuo [m/s].
- h - Altura da linha em relação ao solo [m].

III. MODELOS DE FONTES DE IMPULSO ATMOSFÉRICO NO ATP

Impulsos exponenciais são utilizados para representar surtos atmosféricos, podendo ser de tensão ou de corrente. A Figura 3 representa uma onda de surto.

Figura 3 - Surto típico de uma descarga atmosférica.



Como pode ser visto na Figura 3, as ondas de surto possuem um tempo de frente de onda e um tempo de cauda. Para um surto de tensão, o tempo de frente de onda é definido como 1,67 vezes o intervalo de tempo entre os instantes de 30% e 90% do valor de pico. Já para um surto de corrente, o tempo de frente é definido como 1,25 vezes o intervalo de tempo entre os instantes de 10% e 90% do valor de pico [10]. O tempo de cauda é o intervalo de tempo entre a origem virtual e o instante de tempo em que os valores de tensão ou corrente chegarem à metade do valor de pico [11]. Para uma onda de tensão, os tempos de frente e de cauda padrões são, respectivamente, 1,2 μ s e 50 μ s. Já para uma onda de corrente, os tempos de frente e de cauda padrões são, respectivamente, 8 μ s e 20 μ s. A maior parte dos surtos atmosféricos apresenta tempos de frente de onda menores que tempos de cauda em uma proporção de duas ou mais vezes.

No *software* ATP, existem quatro diferentes fontes do "tipo 15" para representar um surto atmosférico, que podem ser escolhidas como fontes de tensão ou corrente. As fontes são: Dupla Exponencial, Heidler, Stlander e a Cigré. Neste trabalho, para a representação das descargas atmosféricas incidentes de forma indireta, foram utilizadas no ATP fontes do tipo Dupla Exponencial. Já para a representação de descargas atmosféricas incidentes de forma direta, foram utilizadas fontes do tipo Heidler.

IV. IDENTIFICAÇÃO DOS CIRCUITOS ELÉTRICOS UTILIZADOS

Com o objetivo de avaliar a influência das tensões induzidas em linhas de transmissão e distribuição provenientes de descargas atmosféricas, assim como avaliar a influência de descargas diretas nas mesmas, dois circuitos foram modelados no ATP. Um dos circuitos é referente ao sistema elétrico trifásico de transmissão (Figura 4) e o outro circuito referente à rede de distribuição (Figura 5). Ambos fictícios.

Em ambos os sistemas, foi projetada uma carga ligada em estrela de impedância constante do tipo série, de potência igual a 800 kVA, frequência de 60 Hz e fator de potência igual a 0,9 indutivo. Para a modelagem da linha de transmissão, utilizou-se o elemento LCC *template*. Definiu-a com um comprimento de 100 km e resistividade do solo igual a 100 ohms. Por outro lado, a linha de distribuição foi definida com 6 km de comprimento. Os valores de resistência, indutância e capacitância foram calculados baseadas no cabo de alumínio com alma de aço 336,4 AWG, conforme mostra a Tabela I. Ambas as linhas utilizaram o modelo PI. A tensão nominal da carga no sistema de transmissão é de 13,8 kV e no de distribuição é de 220 V.

Tabela I - Dados elétricos do cabo.

R	X_L	X_C
0,2051 Ω /m	0,3770 Ω /m	0,2266 Ω /m

V. ESTUDOS DE CASOS

Visando ilustrar e elucidar melhor os efeitos e impactos das descargas atmosféricas incidindo em sistemas elétricos,

foram simulados três casos, realizados tanto para o sistema elétrico de transmissão quanto para o sistema elétrico de distribuição. Um caso foi referente à simulação de descargas atmosféricas diretas, enquanto os outros dois remeteram às descargas indiretas, e todas incidiram no meio das linhas, para fim de comparação dos resultados.

Caso 1 – Incidência de uma descarga atmosférica direta na fase B. Para tanto, empregou-se um impulso de corrente caracterizado por um valor de crista de 40 kA, 8 μ s de tempo de frente de onda e 20 μ s de tempo de cauda.

Caso 2 – Surgimento de uma tensão induzida devido ao efeito indireto de descargas atmosféricas. Com base na teoria sintetizada neste documento, calculou-se a amplitude da tensão induzida para diferentes distâncias entre o canal de descarga e a linha, considerando o valor da corrente de retorno fixa ($I_0 = 40$ kA). Essa representação consiste na aplicação de um impulso de tensão na fase B, caracterizado pelo valor apontado pela Equação 1, contendo um tempo de frente de onda de 1,2 μ s e de cauda de 50 μ s.

Caso 3 - Surgimento de uma tensão induzida devido ao efeito indireto de descargas atmosféricas. Este caso difere do anterior quanto à variação da amplitude da corrente de descarga, mantendo-se, todavia, a distância de incidência constante de 150 m. A representação do fenômeno foi a mesma do caso anterior, ou seja, um impulso de tensão na fase B caracterizado pelo valor de crista dado pela Equação 1 para as condições agora estabelecidas, contendo um tempo de subida de 1,2 μ s e de cauda de 50 μ s.

A. Resultados das avaliações dos casos

As descargas atmosféricas foram aplicadas na fase B, de forma direta e indireta, com início em 0,1 s. Posteriormente, foi avaliada a influência e os efeitos das tensões induzidas

provenientes de incidências de descargas atmosféricas na carga ligada em estrela, presente tanto no sistema elétrico de distribuição quanto no sistema elétrico de transmissão

1) Sistema elétrico de distribuição

1.1) Resultados para o caso 1

Este caso, embora não seja o principal objeto de estudo do artigo, serve de referência numérica para os demais casos para comparações entre uma descarga incidindo de forma direta ou indireta. Com a descarga incidindo no centro das linhas, foram analisados os efeitos da mesma sobre a carga. A Figura 6 mostra o resultado associado ao efeito da descarga atmosférica direta na linha sobre a carga presente no sistema de distribuição.

Figura 6 - Tensão na carga durante a incidência da descarga atmosférica na linha de distribuição – caso 1.

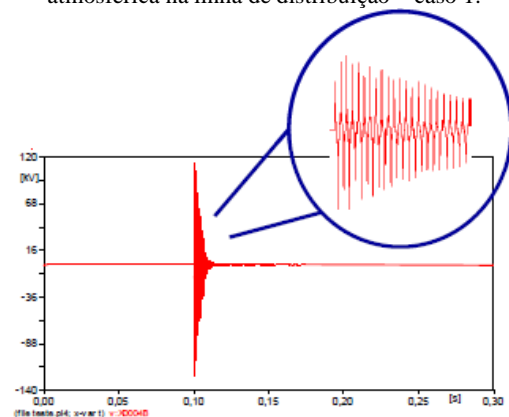


Figura 4- Sistema elétrico de transmissão modelado no ATPDraw.

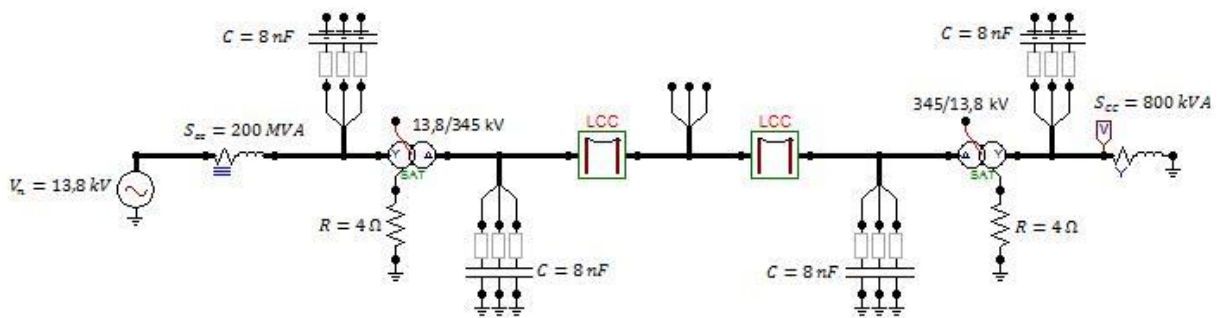
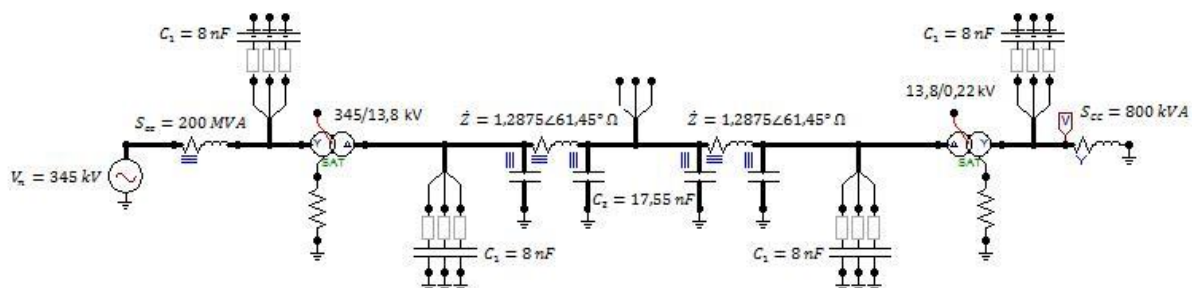


Figura 5- Sistema elétrico de distribuição modelado no ATPDraw.



No sistema elétrico de distribuição, imediatamente após a incidência da descarga atmosférica, a tensão de pico na carga atingiu o valor de 112,53 kV. Essa elevada sobretensão se deve ao fato de que, nas descargas atmosféricas diretas, há injeção de corrente diretamente na linha, o que gera rapidamente uma alta elevação no nível de tensão, uma vez que a impedância característica da linha apresenta valores bastante consideráveis, entre 200 a 400 ohms.

1.2) Resultados para o caso 2

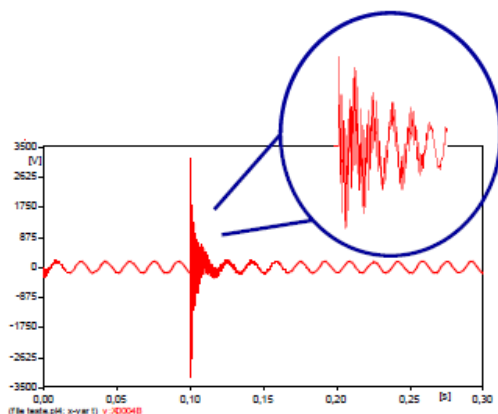
A Tabela II mostra os valores de tensões induzidas geradas através da aplicação de (1), supondo uma altura padrão (h) da linha de distribuição de 10 metros em relação ao solo e uma corrente de pico de descarga igual a 40 kA. Foram considerados para y (distância entre a linha física e o local de incidência da descarga) valores de 100 m, 200 m, 300 m, 400 m e 500 m. Também são mostradas as sobretensões geradas na carga para cada tensão induzida.

Tabela II - Tensão induzida e sobretensão na carga durante a incidência de descarga atmosférica na linha de distribuição - caso 2.

Distância (y) [m]	Tensão Induzida (kV), para $I_0 = 40$ KA	Sobretensão na carga (kV)
100	238,53	3,150
200	119,26	1,490
300	79,51	0,936
400	59,63	0,660
500	47,71	0,494

As maiores tensões induzidas foram observadas para as distâncias de 100 m e 200 m, ou seja, quanto menor a distância entre o local de incidência da descarga e a linha física, maior será a tensão induzida gerada na linha e a sobretensão que surge na carga. Para $y = 100$ m, o valor de pico da tensão na carga após a descarga foi de 3,150 kV. A Figura 7 mostra os efeitos da descarga atmosférica indireta sobre a carga para y igual a 100 m.

Figura 7 - Tensão na carga durante a incidência da descarga atmosférica na linha de distribuição para y igual a 100 m - caso 2.



1.3) Resultados para o caso 3

A Tabela III mostra os valores das tensões induzidas geradas através da aplicação da Equação 1, supondo uma altura padrão (h) da linha de distribuição de 10 metros em relação ao solo, considerou-se fixa a distância entre a linha física e o local de incidência da descarga, cujo valor é de 150 m. As amplitudes das correntes de retorno variaram entre 30 kA e 70 kA. Também são mostradas as sobretensões

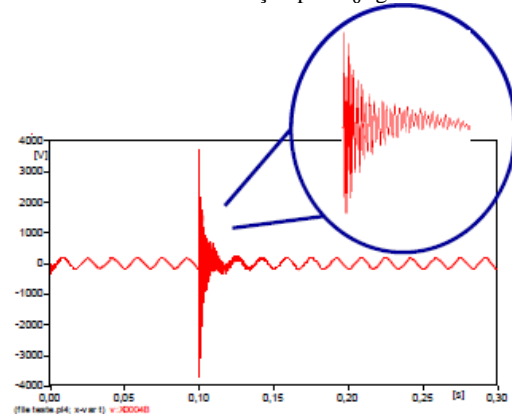
geradas na carga para cada valor de amplitude de corrente de retorno.

Tabela III - Tensão induzida e sobretensão na carga durante a incidência de descarga atmosférica na linha de distribuição - caso 3.

Amplitude da corrente de retorno (kA)	Tensão Induzida (kV), para $y = 150$ m	Sobretensão na carga (kV)
30	119,02	1,486
40	159,02	2,044
50	199,01	2,600
60	239,01	3,158
70	279,01	3,714

As maiores tensões induzidas foram geradas para as maiores amplitudes de corrente de retorno, influenciando na sobretensão que surge na carga. Para uma amplitude de I_0 igual a 70 kA, o valor de pico da tensão na carga após a descarga foi de 3,714 kV. A Figura 8 mostra os efeitos da descarga atmosférica indireta sobre a carga para I_0 igual a 70 kA.

Figura 8 - Tensão na carga durante a incidência da descarga atmosférica na linha de distribuição para I_0 igual a 70 kA - caso 3.

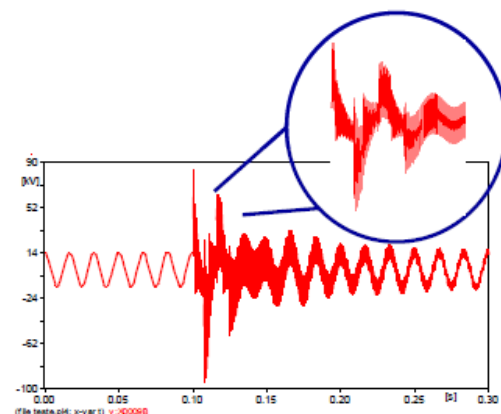


2) Sistema Elétrico de Transmissão

2.1) Resultados para o caso 1

Com a descarga incidindo no centro da linha de transmissão de 100 km, foi analisado o efeito da mesma sobre a carga presente no sistema de transmissão. A Figura 9 mostra o resultado associado ao efeito da descarga atmosférica direta sobre a carga.

Figura 9 - Tensão na carga durante a incidência da descarga atmosférica na linha de transmissão - caso 1.



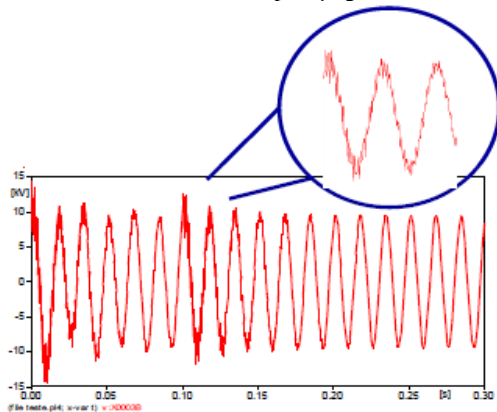
VI. CONCLUSÕES

A tensão de pico na carga atingiu o valor de 82,86 kV. Pôde-se constatar, através do resultado fornecido, que houve violação do nível de tensão admissível. Essa alta sobretensão se deve ao fato de que, nas descargas atmosféricas diretas, conforme dito anteriormente, há injeção de corrente diretamente na linha, o que gera rapidamente uma alta elevação no nível de tensão.

2.2) Resultados para o caso 2

Conforme pode ser visto na Tabela II, a maior tensão induzida na linha, nesse caso, é igual a 238,53 kV. Como a linha de transmissão possui uma tensão de isolamento por fase de 282 kV, os efeitos das descargas sobre a carga foram bem pequenos. A Figura 10 mostra os efeitos da descarga atmosférica indireta sobre a carga para y igual 100 m.

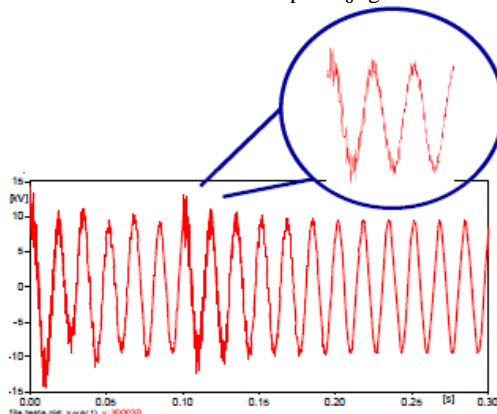
Figura 10 - Tensão na carga durante a incidência da descarga atmosférica na linha de transmissão para y igual a 100 m - caso 2.



2.3) Resultados para o Caso 3

Conforme pode ser verificado pela Tabela 3, a maior tensão induzida na linha, nesse caso, é igual a 279,01 kV. Como a linha de transmissão possui uma tensão de isolamento por fase de 282 kV, os efeitos das descargas sobre a carga foram bem pequenos. A Figura 11 mostra os efeitos da descarga atmosférica indireta sobre a carga para I_0 igual a 70 kA.

Figura 11 - Tensão na carga durante a incidência da descarga atmosférica na linha de transmissão para I_0 igual a 70 kA - caso 3.



Este trabalho contemplou os mecanismos de indução eletromagnéticos gerados por descargas atmosféricas. Após a descrição da metodologia de cálculo e da equação para obtenção de um valor para a tensão induzida gerada por esses surtos nas linhas, foram simuladas no *software* ATP descargas atmosféricas incidindo de forma direta e indireta em sistemas elétricos de distribuição e transmissão.

Constatou-se que as descargas atmosféricas diretas, que ocorrem com menor frequência, causam um impacto bem maior nos sistemas elétricos do que as descargas atmosféricas indiretas, estejam elas incidindo em sistemas de transmissão ou distribuição. Isso ocorre porque, na incidência dessas descargas, há injeção de corrente diretamente na linha, gerando uma elevada sobretensão no sistema em um curto intervalo de tempo. As descargas atmosféricas indiretas, que ocorrem com uma frequência bem maior, incidem no solo e podem gerar tensões induzidas nas linhas, dependendo de alguns fatores. Para sistemas de distribuição, pôde-se observar que quanto menor a distância entre a linha física e o local de incidência da descarga, para uma corrente de pico da descarga constante, maior será a tensão induzida na linha e maior será o impacto gerado no sistema. Para sistemas elétricos de transmissão, o mesmo não ocorre. Como a amplitude das tensões induzidas geradas pelas descargas é menor do que a tensão na linha de transmissão, os impactos são pequenos e quase imperceptíveis. Pôde-se constatar também que, para sistemas elétricos de distribuição, que quanto maior a amplitude da corrente de pico da descarga, para uma distância entre a linha física e o local de incidência da descarga constante, maior será a tensão induzida na linha e maior será o impacto gerado no sistema. Em sistemas elétricos de transmissão, assim como ocorrido no caso anterior, os efeitos e impactos são bem pequenos, ou seja, sistemas de distribuição estão mais suscetíveis a danos provenientes de descargas atmosféricas indiretas do que os sistemas de transmissão.

REFERÊNCIAS

- [1] S. V. F. Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia. Artliber, 2005.
- [2] A. B. de A. Junior, I. N. Gondim, P. H. de O. Rezende, and J. C. de Oliveira, "Processo Computacional para Análise de Pedidos de Indenização por Danos Elétricos," SBSE 2014. Foz do Iguaçu, 2014.
- [3] "A Computational Methodology to Support Reimbursement Requests Analysis Concerning Electrical Damages," International Journal of Emerging Electric Power Systems, vol. 16, p. 569, 2015.
- [4] S. W. Meyer and T. Liu, Alternative Transients Program (ATP) - Rule Book. 1992.
- [5] A. Soares Jr. and S. Visacro, "Lightning Response of Typical Brazilian Transmission Line Tower-footing Arrangements," in International Conference on Ground and Earthing (Ground 98), 1998, pp. 98–102
- [6] K. W. Wagner, Elektromagnetische Ausgleichsvorgänge in Freileitungen und Kabeln. B. G. Teubner, 1908.
- [7] S. Rusck, "Induced Lightning Over-Voltages on Power Transmission Lines with Special Reference to the Over-Voltage Protection of Low Voltage Networks," Transactions of the Royal Institute of Technology, 1957.
- [8] P. C. A. Mota, "Um estudo sobre tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas de transmissão," Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.
- [9] V. L. Coelho, "Influência das Descargas Atmosféricas no Desempenho de Sistemas Aéreos de Distribuição de Energia Elétrica," Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- [10] A. C. B. The, M. Of, S. Of, and S. Inside, "Atmosférico No Atp," pp. 1–6.