



BREVE ESTUDO DO EFEITO CORONA E SEU IMPACTO NAS ONDAS DE TENSÃO DE UMA LINHA DE TRANSMISSÃO MONOFÁSICA

Geraldo Rodrigues Silveira Neto¹, Raphael Batista*¹ e Paulo Henrique de Ávila²

¹UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

² UNIBH – Centro Universitário de Belo Horizonte

Resumo - Este trabalho apresenta um estudo introdutório sobre o comportamento de uma linha de transmissão em decorrência das descargas corona ou efeito corona. A característica mais evidente do efeito corona é a mudança da capacitância transversal da linha de transmissão, que se torna não-linear após ultrapassar a tensão crítica para a ionização do ar circunvizinho aos condutores fase. O trabalho apresenta a curva de $q \times v$, que indica o comportamento da capacitância com o aumento de tensão, e modelos que descrevem o fenômeno de diferentes formas. O estudo de caso realizado, ainda que simples, é capaz de evidenciar a atenuação da onda de tensão promovida pelo efeito corona, que implica no aumento das perdas de potência associada a linha de transmissão. Tal comportamento é ainda mais notável ao se superestimar a magnitude do efeito corona na segunda simulação realizada.

Palavras-Chave - Descargas parciais, Efeito corona, Linha de transmissão.

A BRIEF STUDY ABOUT THE CORONA DISCHARGE AND ITS IMPACT ON A VOLTAGE WAVEFORM OF A SINGLE-PHASE TRANSMISSION LINE

Abstract - This work shows an introductory study about the transmission line behavior under the effect of corona discharges. The most characteristic feature of the corona effect is the changing of the transversal capacitance of the transmission line, which becomes non-linear after surpassing the critical voltage value that ionizes the air surrounding the conductors. This paper shows the $q \times v$ curve, which indicates the capacitance as a function of the voltage level and some models that describe this phenomenon by different approximation. The single case performed, although modest, is able to evidence the voltage attenuation occasioned by the corona effect, which implies in the increase of the power losses associated with the transmission line. This behavior is more remarkable when the magnitude of the corona effect has its magnitude

overestimated in the second simulation performed.

Keywords - Corona discharge, Partial discharge, Transmission line.

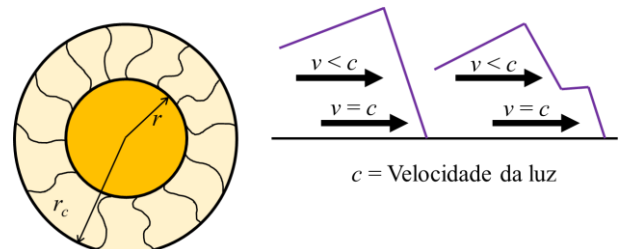
I. INTRODUÇÃO

Em situações em que as tensões de um fio ou cabo são altas o suficiente para exceder a rigidez dielétrica do ar em suas proximidades, a ionização das partículas no seu entorno dá origem ao chamado efeito corona. Na região em que ocorre, há o armazenamento e formação de cargas livres devido à ionização do meio [1-3].

As principais consequências do efeito corona são a dissipação de energia nos condutores e um aumento da capacitância dos mesmos em relação ao solo, que implica na diminuição da velocidade de propagação e da impedância de surto da linha de transmissão (LT). O efeito mais evidente da diminuição da velocidade de propagação é a distorção promovida no pico da onda durante seu deslocamento, além de sua atenuação [2,3]. A Figura 1 exemplifica tal comportamento ao redor do condutor e na propagação das ondas de tensão.

É nítido na ilustração que, ao se propagar com diferentes velocidades, a parcela da onda que se desloca na região do corona implica em atraso e diferente atenuação em relação a outra parcela, bem próxima à superfície do condutor, com velocidade similar à da luz. Assim, a onda de tensão sofre distorções como um todo. Outra informação apresentada na Figura 1 é a equivalência do efeito corona ao redor do condutor, de raio r , ao aumento do raio do objeto. Pode-se imaginar que o condutor original tem seu raio aumentado para r_c devido a ionização do ar ao seu redor.

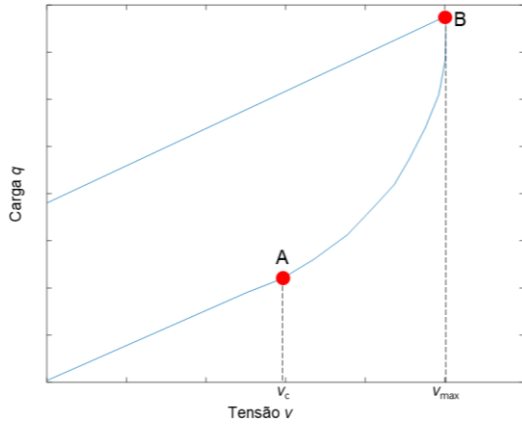
Figura 1: Efeito corona na onda de propagação – adaptado de [3].



*raphaelbatista@ufmg.br

A avaliação da propagação de ondas sob efeito corona usualmente utiliza modelos baseados em curvas de carga versus tensão nos condutores, as chamadas curvas $q \times v$, como ilustrado na Figura 2 [4].

Figura 2: Curva $q \times v$ considerando o efeito corona – adaptado de [3].



Nota-se uma característica não-linear da curva $q \times v$ em um condutor a partir da Figura 2. No período em que a tensão no condutor é menor que aquela referente ao limiar para início do corona, denominada v_c , a capacitância é constante e linear, como indicado da origem até o ponto A da Figura 2. A partir desse ponto, a tensão passa a ser maior que aquela necessária para o surgimento do efeito corona, o que promove um comportamento não-linear da capacitância na região do ponto A ao B. Nessa região da curva, o campo elétrico ao redor do condutor excede o valor da ruptura no ar, o que inicia a ionização do ar circunvizinho. Ruídos audíveis e luzes são algumas das consequências da ionização, além da dissipação de energia que é sustentada pelo condutor – causa das perdas na transmissão de energia no condutor e deformação nas ondas de tensão [5]. Deve-se atentar que o campo elétrico acentuado cria elétrons livres e consequentes íons positivos resultantes do choque entre os átomos e moléculas ao seu entorno. O processo continua até um ponto em que se torna autossustentável.

Ao atingir o seu valor máximo no ponto B, denominado v_{max} , a ionização em torno do condutor passa a ser eliminada pelas cargas espaciais, isto é, os íons positivos resultantes do processo anterior absorvem os elétrons livres circunvizinhos ao condutor. Tal condição resulta no retorno do comportamento linear da capacitância, mas com uma carga associada maior que a do início do processo [4,5].

O comportamento não-linear da capacitância na região do ponto A ao B da Figura 2 é descrita por diversos modelos, que descrevem a chamada capacitância devido ao efeito corona C_c por meio de diferentes expressões matemáticas. Alguns recursos utilizados são a representação da LT por meio de circuitos PI equivalentes em cascata; divisão das linhas, que possuem parâmetros elétricos dependentes da frequência, em seções lineares, com um ramo *shunt* não-linear em cada nó; e o uso do método das diferenças finitas nas equações de linha [3].

II. MODELAGEM DO EFEITO CORONA

Uma descrição macroscópica usualmente é realizada para avaliar o efeito da propagação de ondas de tensão da LT sob efeito corona, tendo como base a curva $q \times v$. Descrições microscópicas do fenômeno tendem a ser impraticáveis na análise de transitórios [3], logo, modelagens dessa natureza não são tratadas neste trabalho.

Os modelos baseados nas curvas $q \times v$ costumam ser divididos em linear por partes, parabólicos, polinomiais e dinâmicos [3]. Geralmente, os modelos são dependentes de um cálculo prévio da tensão limiar para início do surgimento das descargas de corona, estimada a partir do campo elétrico crítico no meio circunvizinho aos condutores. Tal campo elétrico crítico, E_c , é estimado pela fórmula de Peek [5], a qual é definida para uma LT como [3,6]:

$$E_c = g \delta m p \left(1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad (1)$$

Onde:

- g - Rigidez dielétrica do ar em um campo elétrico uniforme.
- m - Fator de irregularidade da superfície do condutor.
- δ - Densidade relativa do ar.
- p - Fator de polaridade da tensão.
- r - Raio do condutor – unidade cm.

A. Modelo linear por partes

No modelo estático linear por partes, a curva $q \times v$ é substituída por uma série de segmentos de retas [4]. Neste caso, a capacitância devido ao efeito corona C_c é definida por uma equação de reta igual a [3]:

$$C_c = C_A + K(v - v_c) \quad (2)$$

Onde:

- C_A - Capacitância no ponto A da Figura 2.
- K - Fator relacionado à altura h do condutor e à polaridade da tensão.

O fator K vale $0,1/h^2$ para uma polaridade positiva de tensão e, para o caso de uma polaridade negativa, $0,05/h^2$.

B. Modelo parabólico

No modelo parabólico, o segmento A-B da Figura 2 é representado por meio de uma expressão com formato parabólico, sendo definida como [7]:

$$C_c = \begin{cases} C_0 & v \leq v_c, \frac{\partial v}{\partial t} > 0 \\ C_0 \eta (v / v_c)^{\eta-1} & v_c < v, \frac{\partial v}{\partial t} > 0 \\ C_0 & \frac{\partial v}{\partial t} \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

Onde:

- C_c - Capacitância sob efeito corona.
- C_0 - Capacitância geométrica da linha.
- v_c - Tensão obtida da fórmula de Peek.
- η - Coeficiente que depende de r , se o condutor é único agrupado e da polaridade da tensão.

C. Modelo polinomial

Esse modelo representa a variação não-linear da capacitância na curva $q \times v$ a partir de um polinômio do tipo [3]:

$$q = b_0 + b_1v + b_2v^2 + b_3v^3 \quad (4)$$

Onde:

b_0, b_1, b_2, b_3 - Coeficientes obtidos por meio de ajuste de dados experimentais.

O modelo polinomial costuma ser mais preciso que o linear por partes e parabólico na representação da curva $q \times v$, mas possui a desvantagem de requerer dados de medição para sua representação [3].

D. Modelo dinâmico

O modelo dinâmico se diferencia dos outros pelo fato de C_c ser dependente da tensão e da variação deste parâmetro com o tempo. Nesta situação, a carga q é representada como uma função dependente da tensão, da variação deste parâmetro com o tempo, e de outras variáveis, cujas especificidades são apresentadas em [3,6]. O modelo dinâmico não é abordado neste trabalho devido à complexidade de seu uso e dificuldade da consideração de todas as variáveis que determinam o valor da carga q .

III. CASOS ESTUDADOS E RESULTADOS

O objetivo deste trabalho e das simulações apresentadas é exemplificar o impacto do efeito corona nas ondas de tensão em LT. O passo inicial é a construção da curva $q \times v$ por meio do modelo parabólico, já que dados experimentais não estão disponíveis para o estudo. A curva desenvolvida utiliza os parâmetros de uma LT monofásica sem perdas, composta por condutor de alumínio com raio r igual a 2,54 cm e altura média h de 18,9 m – adaptação de [8]. Optou-se por considerar a LT trifásica original como uma monofásica sem perdas a fim de evidenciar os efeitos da mudança da capacitância transversal por conta do efeito corona.

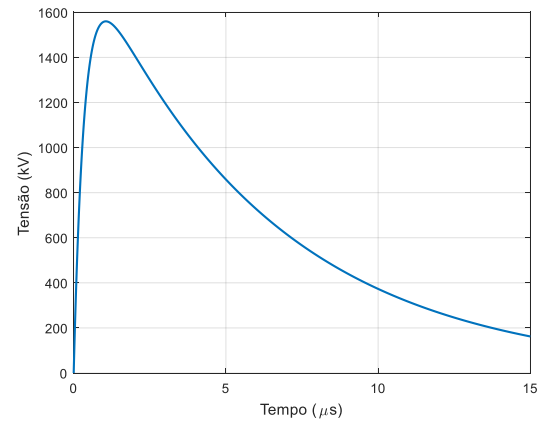
A onda de tensão injetada no terminal emissor da linha é uma exponencial dupla, definida como [3]:

$$v(t) = AK(e^{-\frac{t}{t_m}} - e^{-\frac{t}{t_f}}) \quad (5)$$

em que A vale 1560 kV, K é igual a -1,2663, t_m igual a 0,35 μ s e t_f , 6 μ s. A Figura 3 ilustra a onda de tensão citada aplicada ao terminal emissor da linha. A tensão de limiar do surgimento das descargas de corona v_c vale 450 kV [3]. Deve-se atentar que a onda de tensão utilizada serve apenas para ilustrar o fenômeno, não tendo qualquer intenção de coincidir com estudos associados à incidência de descargas atmosféricas.

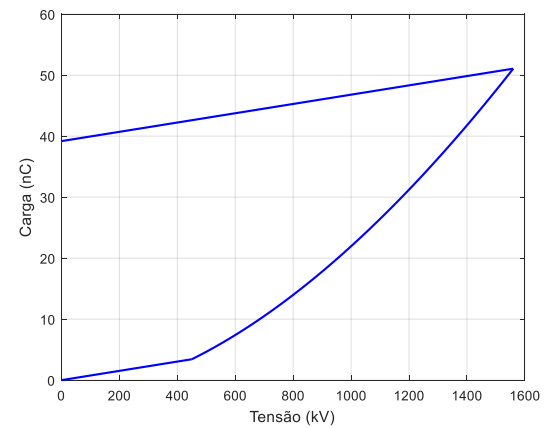
O modelo parabólico calcula a capacitância C_c da seguinte forma: até a tensão v_c , a capacitância da linha é modelada como sendo igual à capacitância geométrica, isto é, a região linear da curva $q \times v$ é considerada enquanto a tensão aplicada na linha for menor que v_c . No instante em que a tensão supera o valor de v_c , a capacitância passa a ter comportamento não-linear e regida pela onda de tensão aplicada, até o ponto em que a variação da tensão com o tempo passa a ser negativa. A partir deste instante, a capacitância volta a ser modelada por meio da capacitância geométrica da LT.

Figura 3: Tensão aplicada no terminal emissor da linha de transmissão monofásica.



A partir do uso do modelo parabólico para modelagem da capacitância C_c e considerando a onda de tensão aplicada no terminal emissor da linha, obtém-se a curva $q \times v$ ilustrada na Figura 4.

Figura 4: Curva $q \times v$ para a linha monofásica deste trabalho.



Todos os passos descritos para a modelagem de C_c , a partir do modelo parabólico, podem ser observados na curva $q \times v$ da Figura 4. A partir de 450 kV, que é a tensão v_c , a capacitância deixa de ter um comportamento linear e passa a ser modelada pela equação parabólica. No momento em que a tensão aplicada na linha atinge seu pico e começa a decair, tornando sua variação com o tempo negativa, C_c volta a assumir o valor da capacitância geométrica da linha.

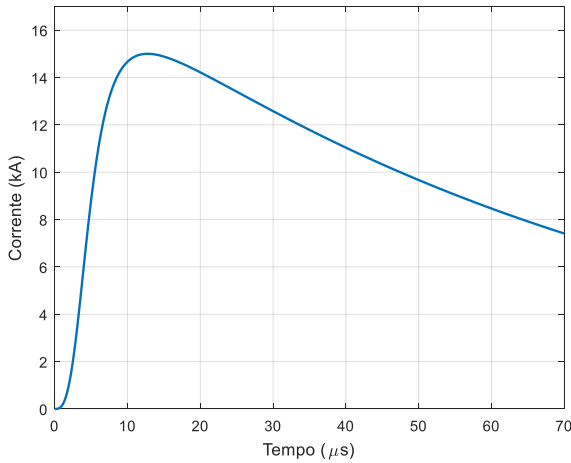
A etapa seguinte consiste em mostrar como o efeito corona impacta a forma de onda da tensão na LT. Não é levado em conta os efeitos de propagação da linha, sendo exclusivamente uma análise comparativa da tensão considerando ou não o efeito corona, com o objetivo de ilustrar como a onda é atenuada. Para a simulação, utilizou-se a mesma LT indicada na construção da curva $q \times v$, mas com a injeção de uma onda de corrente com algumas características similares às de uma descarga atmosférica. A onda de corrente, construída a partir da função de Heidler, apresenta a natureza côncava das correntes de descarga nos seus instantes iniciais e o posicionamento adequado da derivada máxima em instante próximo ao do pico [9]. O ajuste da amplitude da onda, da derivada máxima da corrente e da carga transferida através da

variação de suas constantes é realizado a partir da seguinte expressão, a qual é ilustrada na Figura 5 – I_0 igual a 30 kA, n igual a 3, τ_1 de 5 μ s e τ_2 de 75 μ s:

$$I(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{(t/\tau_1)^n + 1} e^{-t/\tau_2}, \quad (6)$$

$$\eta = e^{\left[-(\tau_1/\tau_2)(n\tau_2/\tau_1)^{1/n}\right]}$$

Figura 5: Função de Heidler utilizada para a onda de corrente.



Os valores das variáveis da Equação (6) são ajustados com base nos dados de descargas atmosféricas medidos no monte San Salvatore [10], visto que a LT do artigo original está localizada em território europeu [3].

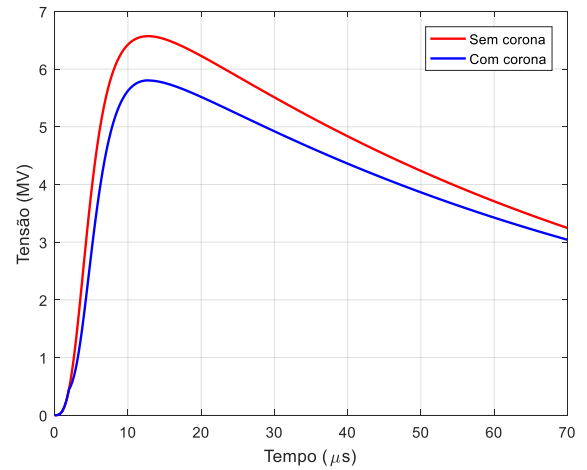
A onda de tensão resultante da injeção da onda de corrente na LT pode ser estimada pelo produto da impedância de surto Z_s com a corrente:

$$V = Z_s I, \quad Z_s = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (7)$$

Para a representação do efeito corona na onda de tensão, uma rotina numérica foi desenvolvida para o cálculo da atualização do valor da impedância de surto de acordo com a variação do valor da capacitância da LT.

A Figura 6 apresenta o gráfico da comparação da tensão resultante com e sem o efeito corona no ponto de incidência da onda de corrente. A partir das curvas, pode-se observar como o efeito corona diminui a amplitude da onda de tensão.

Figura 6: Tensão resultante no ponto de incidência com e sem o cômputo do efeito corona.



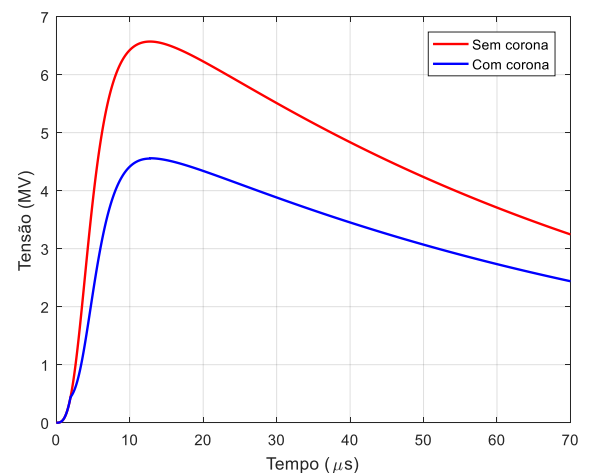
Observa-se da Figura 6 que, até o ponto onde não se tem o efeito corona – tensão menor ou igual a 450 kV, as curvas são sobrepostas. A partir do ponto em que a tensão iguala o valor de v_c , essa sofre uma forte atenuação, pois a capacitância calculada pelo modelo parabólico aumenta, o que, por consequência, diminui o valor da impedância de surto e atenua a tensão resultante.

Para um estudo mais completo e preciso dos impactos do efeito corona na linha, uma modelagem da linha por parâmetros distribuídos é desejável, já que o efeito corona varia ao longo da LT [5].

Para tornar mais explícito o impacto do efeito corona na amplitude da onda de tensão, os valores dos parâmetros associados ao cálculo da capacitância por meio do modelo matemático parabólico foram alterados. Neste caso, os parâmetros de ajuste para cômputo da tensão devido ao efeito corona são superestimados, resultando em valores de capacitância muito maiores que a do caso anterior.

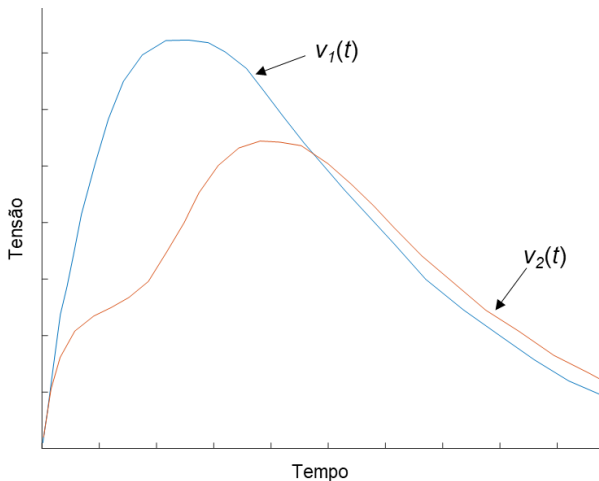
O resultado, mostrado na Figura 7, indica que a acentuação do efeito corona sobre a capacitância transversal da LT é capaz de promover uma atenuação ainda maior da onda de tensão.

Figura 7: Tensão resultante no ponto de incidência com e sem o cômputo do efeito corona – capacitância alterada para superestimação do efeito corona.



A Figura 8 apresenta o comportamento da onda de tensão sob atuação do efeito corona, para um caso real, no ponto de início, $v_1(t)$, e em outro à determinada distância, $v_2(t)$, do início da LT [5]. A distorção da onda apresentada na Figura 8 não é observada na Figura 7, já que as ondas mostradas nesta se situam no ponto de incidência. Caso fossem consideradas nas análises os parâmetros distribuídos da LT, além de suas perdas, seria possível identificar todas as características indicadas na Figura 8 nos casos avaliados.

Figura 8: Atenuação e distorção da onda de tensão devido ao efeito corona – adaptado de [5].



A atenuação que ocorre na onda de tensão é percebida na análise do efeito corona em LT reais por meio de distorções no sinal. Tal comportamento implica, em alguns casos, em uma perda de potência considerável no sistema devido a dissipação de energia provocada pelo efeito corona, que é suprida pelos condutores da LT.

Um estudo mais aprofundado considerando os efeitos de atenuação, distorção e demais peculiaridades do efeito corona torna o trabalho mais complexo, porém se faz necessário, tendo em vista que o efeito corona é muito importante nos cálculos de transitórios eletromagnéticos e a sua desconsideração leva a valores muito conservativos em projetos de coordenação de isolamento de sistemas de transmissão [5].

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo de caso introdutório e simplificado do impacto do efeito corona sobre LT e os principais modelos matemáticos que o descrevem. A avaliação exemplifica o efeito da curva $q \times v$ sobre a onda de tensão incidente em uma LT, com o aumento nítido da atenuação da onda relacionado ao crescimento da capacitância promovida pela intensificação do efeito corona.

Este trabalho se mostra como um primeiro passo para um estudo mais profundo dos impactos do efeito corona, sobretudo em condições em que a LT é modelada por meio de parâmetros distribuídos. Almeja-se desenvolver simulações que considerem esse comportamento e estimar as ondas de tensão ao longo de diversos pontos da LT. Outra possibilidade é a consideração dos efeitos relacionados ao retorno pelo solo nos parâmetros da LT. Por meio de modelos mais rigorosos

para a representação da LT, resultados mais precisos tendem a ser alcançados.

REFERÊNCIAS

- [1] J. L. Naredo, A. C. Soudack and J. R. Marti, "Simulation of transients on transmission lines with corona via the method of characteristics", *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 142, no. 1, pp. 81-87, 1995.
- [2] J. B. Whitehead, and N. Inouye, "Wave form and amplification of corona discharge", *Journal of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 41, no. 1, pp. 1-10, 1922.
- [3] Juan A. Martinez-Velasco, *Power System Transients: Parameter Determination*, CRC Press, 1st Edition, Boca Raton, 2010.
- [4] S. Carneiro, and J. R. Marti, "Evaluation of corona and line models in electromagnetic transients simulations", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 1, pp. 334-342, 1991.
- [5] G. C. Miranda, *Uma contribuição ao estudo do efeito corona em linhas de transmissão utilizando o método de elementos finitos*, Dissertação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.
- [6] Xia-rong Li, O.P. Malik and Zhi-da Zhao, "A practical mathematical model of corona for calculation of transients on transmission lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1145-1152, 1989.
- [7] C. Gary, D. Cristescu, and G. Dragan, "Distortion and attenuation of travelling waves caused by corona". *CIGRÉ Report*, Study Committee 33: Overvoltages and Insulation Coordination, 1989.
- [8] C. F. Wagner, I. W. Gross and B. L. Lloyd, "High-Voltage Impulse Tests on Transmission Lines", *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 73, no. 1, pp. 196-210, 1954.
- [9] A. F. M. Campos, *Cálculo de sobretensões causadas por descargas atmosféricas indiretas em linhas de distribuição aéreas considerando falhas de isolamento*, Dissertação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- [10] S. Visacro, *Descargas Atmosféricas, Uma Abordagem de Engenharia*, ArtLiber Editora, 1^a Edição, São Paulo, 2005.