



## Grupo de Estudo de Linhas de Transmissão-GLT

### Estudo de modelos no domínio do tempo no cálculo de campo elétrico no solo em corredores híbridos CA/CC

FELIPE TEODORO DE OLIVEIRA(1); CARLOS KLEBER DA COSTA ARRUDA(1);  
ANTONIO CARLOS SIQUEIRA DE LIMA(2);  
CEPEL(1); COPPE/UFRJ(2)

#### RESUMO

Neste informe técnico (IT) será apresentado um estudo baseado em simulações ao longo do tempo, caracterizando corretamente os fenômenos de cargas espaciais por efeito corona. A simulação parte do princípio de emissão de cargas em função do campo elétrico superficial em cada condutor, a partir de dados de ensaio em gaiola corona. Serão comparados os resultados computacionais de campo elétrico e densidade de corrente no solo de dois métodos: *particle-in-cell* (PIC) e elementos finitos (MEF), discutindo-se sua validade e contrapondo os resultados obtidos com medições de campo.

#### PALAVRAS-CHAVE

Efeito corona, transmissão em ultra-alta tensão, *particle-in-cell*, corredores híbridos, campo elétrico

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

A adoção de projetos em corrente contínua em alta-tensão (CCAT) no Brasil e no mundo é crescente, o que leva a questões técnicas e econômicas. Um dos desafios é a obtenção da faixa de passagem, que inevitavelmente ocasiona em trechos com compartilhamento de linhas existentes e cruzamentos. Em ambos os casos o efeito conjunto das linhas pode violar requisitos de segurança ou ambientais, como limites de campos eletromagnéticos.

Quando se tem uma linha CC compartilhando a faixa de servidão com uma linha CA, denomina-se a faixa como corredor híbrido. Uma das peculiaridades deste corredor é a interação entre os campos eletromagnéticos em faixas de frequências distintas, inviabilizando um estudo como o método fasorial, e ainda pondo em questão os próprios limites normativos, que são dados por frequência. Adicionalmente, uma linha CCAT provoca o fenômeno de acúmulo de nuvens de cargas espaciais na região próxima aos cabos, que, como conhecido, afeta seu perfil de campo, provocando agora um efeito na linha CA, que devido à ação do vento deixa de ser um fator determinístico. Para o estudo destes fenômenos, existem diversas propostas elaboradas nas últimas décadas. Os modelos analíticos são limitados a configurações simplificadas, enquanto as simulações numéricas usualmente tratam o problema em regime permanente, o que graças à dinâmica das cargas espaciais e ao regime diferenciando entre as linhas ocasiona em uma validade limitada.

O modelo PIC utiliza, conforme a conveniência, malhas para obtenção de densidade de cargas espaciais, e partículas isoladas no espaço. A malha neste caso não precisa ser detalhada na região do condutor. Este método possui a vantagem, para um número moderado de cargas, em considerar um domínio semiaberto sem a necessidade de resolver o sistema para todo o espaço. O algoritmo é baseado no método de simulação de cargas.

No caso do MEF, o modelo utilizado aplica o conceito "multifísica", assumindo um modelo eletrostático com cargas espaciais e dois tipos de espécies diluídas no meio, representando os íons positivos e negativos. A concentração de cada espécie representa as cargas espaciais, com os termos fonte definidos nas superfícies dos polos pelo campo elétrico superficial. A concentração das espécies realimenta o modelo eletrostático, que por sua vez define o deslocamento das espécies conforme a mobilidade. A combinação entre as duas espécies é definida pelo fator de recombinação.

A modelagem empregada em ambos os casos é bidimensional, assumindo a geometria dos condutores no espaço na sua menor altura em relação ao solo, por ser a condição mais crítica de projeto. Ambos os modelos são resolvidos no tempo, podendo-se declarar formas arbitrárias de potenciais em cada polo, incluindo transientes.

Os resultados poderão ser utilizados para inferir novos modelos e subsidiar projetos básicos de novas LTs, contribuindo ainda para obtenção de medidas mitigatórias da influência da linha no ambiente.

Com a crescente execução de projetos em corrente contínua e em alta-tensão no Brasil e no mundo, surgem novas questões técnicas e econômicas. Uma delas relaciona-se com o campo elétrico resultante em uma faixa de passagem que inevitavelmente possui trechos com compartilhamento e cruzamento de LTs. Nas linhas de corrente contínua a inclusão de cargas espaciais para a determinação do campo elétrico e densidade de corrente no solo é imperativa. O efeito corona em condutores tem sido estudado desde aproximadamente um século, com descrições fenomenológicas [CITATION Whitehead1910 \ 1046 \m Peek1911] e equações empíricas continuamente desenvolvidas. Subsequentemente, foram desenvolvidos modelos de linhas de transmissão em corrente contínua [CITATION deutsch1933 \ 1046 \m Kaptsov1955]. Estes e outros trabalhos são baseados em observações, sendo que não existe um modelo analítico para o efeito corona. Diversos modelos implementados são utilizados em métodos numéricos, embora em todos a camada de ionização seja desprezada. O parâmetro essencial destes modelos é o campo elétrico crítico de cada condutor para a inicialização do efeito, sendo o modelo de Peek [CITATION Peek1911 \ 1046 \m Peek1920] o mais utilizado. Este IT apresenta um modelo derivado da tese de doutorado [CITATION Arruda2015corona \ 1046 \m Arruda2012] onde os fenômenos de geração de cargas espaciais e suas interações no domínio do tempo são contabilizados. Dessa forma, implementou-se o método *particle-in-cell* [CITATION Bir04 \ 1046 ], com primeira aplicação para linhas de transmissão em [CITATION Qin1994 \ 1046 ].

## 2.0 - MODELAGEM

### 2.1 Equações Básicas

Para a solução do campo elétrico com cargas elétricas no meio, utiliza-se a Equação de Poisson, que juntamente com a Equação de Continuidade define a densidade de cada espécie. Neste modelo, a espécie define um grupo de íons de mesma polaridade, que contenham um comportamento médio para esta escala:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{1}{\epsilon_0} (\rho_p + \rho_n) = \frac{e}{\epsilon_0} (n_p - n_n) \quad 2.1$$

$$\frac{\partial n_{p,n}}{\partial t} = G_{p,n}(E) - R n_p n_n - \nabla \cdot (n_{p,n} \vec{v}_{p,n}) \quad 2.2$$

$$\vec{J}_{p,n} = \rho_{p,n} (\mu_{p,n} \vec{E} + \vec{w}) + D_{p,n} \nabla \rho_{p,n} \quad 2.3$$

$$\vec{J} = \vec{J}_p + \vec{J}_n \quad 2.4$$

Onde  $\vec{E}$  é o campo elétrico,  $\epsilon_0$  a permissividade elétrica do ar,  $\rho_{p,n}$  a densidade de cargas para cada espécie iônica ( $p$  para positiva e  $n$  para negativa),  $\vec{J}_{p,n}$  a densidade de corrente por espécie,  $e$  a carga fundamental,  $t$  o tempo,  $R$  o coeficiente de recombinação,  $\mu_{p,n}$  a mobilidade da partícula,  $D_{p,n}$  o coeficiente de difusão,  $\vec{w}$  o campo de velocidade do meio (vento) e  $\vec{v}_{p,n}$  a velocidade da partícula.  $G_{p,n}$  se trata da função geradora de cargas para cada espécie, em função do módulo do gradiente superficial, que é ativada quando as condições

$E < E_{0n}$  ou  $E > E_{0p}$  são satisfeitas, com  $E_{0n}$  e  $E_{0p}$  representando os gradientes superficiais críticos para corona negativo e positivo, respectivamente.

### 2.1.1 Correntes iônicas

As funções de geração  $G_p$  e  $G_n$  dependem das correntes iônicas dos eletrodos, que por sua vez foram obtidas de [ CITATION Lekganyane2007 \ 1046 ] e ajustadas à formulação geral de [ CITATION Portela1989 \ 1046 ], conforme Equações 2.5 e 2.6:

$$G_p(E) = u_{-1}(E - E_{0p})[4 \times 10^{-8} + 5,52 \times 10^{-17}(E - E_{0p})^2] \quad 2.5$$

$$G_n(E) = -u_{-1}(E - E_{0n})[4 \times 10^{-8} + 1,18 \times 10^{-11}(E - E_{0n}) + 3,64 \times 10^{-17}(E - E_{0n})^2] \quad 2.6$$

A densidade de corrente devido à ionização na superfície do eletrodo é obtida dividindo 2.5 ou 2.6 pela circunferência. Desta forma pode-se obter o efeito localizado de geração de carga, por subcondutor.

## 2.2 Implementação Numérica

### 2.2.1 Particle-in-cell

O método *Particle-in-cell* (PIC) trata-se da técnica para resolução de equações diferenciais parciais através da discretização de um fluido em partículas distribuídas sobre um domínio. Na mecânica dos fluidos, o PIC equivale ao emprego de coordenadas lagrangeanas para a determinação do deslocamento do fluido e coordenadas eulerianas para observar momentos do fluido como densidade e temperatura. O PIC tem ampla utilização na Física de Plasma, devido à facilidade de incorporar efeitos eletromagnéticos intuitivamente nas equações de fluido. Neste método, o que se denomina "partícula" pode ser um grupo real de partículas, cujo comportamento macroscópico pode ser considerado uniforme, que é o caso neste IT.

A Equação de Poisson é resolvida pelo Método de Simulação de Cargas (MSC), em que um sistema com proposta original em [ CITATION Singer1974 \ 1046 ] é formulado da seguinte forma neste IT:

$$P \cdot q = \phi_c - P_{sp} \cdot q_{sp} - P_{sd} \cdot q_{sd} \quad 2.7$$

Em que  $P$ ,  $P_{sp}$  e  $P_{sd}$  são matrizes de potencial com  $d$  representando um sistema fixo de cargas no espaço com a utilização de densidades de cargas nas células da malha e  $p$  um sistema de cargas que localizadas próximas a eletrodos.  $q_{sp}$  and  $q_{sd}$  são vetores de cargas e  $\phi_c$  o vetor de potenciais associado aos pontos de controle nos condutores.

Ao longo do fim de cada iteração, o passo de tempo é calculado dinamicamente, aplicando a condição de Courant-Friedrichs-Levy (CFL), que é largamente usado em métodos que envolvem diferenças finitas, para que nenhuma partícula atravessasse mais de uma célula ou um condutor da LT.

### 2.2.2 Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos (MEF) utiliza de uma aproximação euleriana, que depende de uma malha bem definida, caracterizando um domínio de solução e seus respectivos contornos. No MEF, todos os contornos devem respeitar pelo menos uma das condições: Dirichlet (valor prescrito) ou Neumann (derivada prescrita). Exemplos de condições de contorno são o potencial no condutor ( $\phi = V_0$ ) ou condição de fluxo nulo em uma

parede ( $\frac{\partial n}{\partial x} = 0$ ). Em geral a qualidade da solução depende do tipo geométrico do elemento, das funções de aproximação adotadas e da qualidade da malha (por exemplo, em elementos triangulares, pode ser expressa em quanto se aproximam de um triângulo equilátero). Independente da necessidade, o MEF calcula a solução para todos os elementos no domínio.

O MEF já foi aplicado no problema de linhas CCAT [ CITATION Janischewskyj1979 \ 1046 \m Takuma1981a \m Qin1988 \m AlHamouz1998], em geral aplicadas em regime permanente. Alguns modelos utilizam das aproximações e Deutsch [ CITATION deutsch1933 \ 1046 ] e Kapzov [ CITATION Kaptsov1955 \ 1046 ].

Para este IT utilizou-se o Comsol Multiphysics, versão 5.4 [ CITATION COM18 \l 1046 ]. Uma característica do programa é a interface de multifísica, permitindo a integração de diversos módulos. Desta forma, implementou-se uma física eletrostática, conjugada com duas físicas de transporte de massa (*transport of diluted species*), uma para cada espécie do problema. O acoplamento entre as duas físicas é obtido pela migração das massas de acordo com as funções de deriva, e a densidade de cargas espaciais, definida pela diferença entre as concentrações de espécies.

Após a definição das físicas, o programa permite a aplicação de diversos estudos, sendo os mais relevantes neste caso são o de regime permanente e no domínio do tempo. Para cada estudo, haverá uma seleção do *solver* mais adequado.

O Comsol provê diversos algoritmos que melhoram o desempenho e a convergência, como descrito em seu manual [ CITATION COM18 \l 1046 ] para problemas com alto número de Péclet (sistemas aonde a convecção ou migração predominam sobre a difusão) é necessário o uso de mecanismos de estabilização. Também foi necessário a aplicação de difusão artificial (*isotropic diffusion*) devido ao surgimento de oscilações numéricas no fim da simulação. Este recurso implica em uma suavização das concentrações das espécies, o que vai ser avaliado em um dos casos teste apresentados.

### 3.0 - SIMULAÇÕES E RESULTADOS

#### 3.1 Casos de teste

Para comparação entre os métodos, foram simuladas uma configuração monopolar e a configuração da linha de transmissão de Itaipu. A primeira consiste de um polo com 4 condutores com diâmetro de 2 cm, espaçados por 45 cm, altura central de 10 m, energizados a +600 kV CC. No caso da configuração bipolar, foi simulada a LT de Itaipu, cujas dimensões podem ser visualizadas na Figura 1(a). O diâmetro dos condutores é de 3,417 cm.

Na sequência, um corredor híbrido fictício é analisado, composto pela LT 500 kV Fernão Dias – Terminal Rio e pela LT ±800 kV Xingu – Terminal Rio. As configurações das LTs estão na Figura 1 com distância escolhida entre elas de 60 m entre eixos, o que corresponde a um nível de campo elétrico no solo de aproximadamente 20 kV/m (componente vertical). As dimensões da LT 500 kV Fernão Dias foram estimadas do R2 do leilão ANEEL 05/2016, com flechas estimadas de 14,0 m e 8,4 m para as fases e cabos para-raios, respectivamente [ CITATION Oli18 \l 1046 ].

Para todos os casos e métodos adotou-se os seguintes parâmetros:  $\mu_p = 1,3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{V s})$ ,  $\mu_n = 1,7 \times 10^{-4} \text{ m}^2/(\text{V s})$ ,  $R = 2,2 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{s}$  e as funções de geração conforme 2.5 e 2.6.

As simulações comparativas entre métodos foram realizadas na medida do possível sobre as mesmas premissas. Apesar de não ser utilizada difusão no método PIC, o MEF possui difícil solução sem a parcela de difusão. Somente no caso monopolar foi possível obter resultados consistentes, sendo apresentado a seguir os resultados com e sem a rotina de difusão.

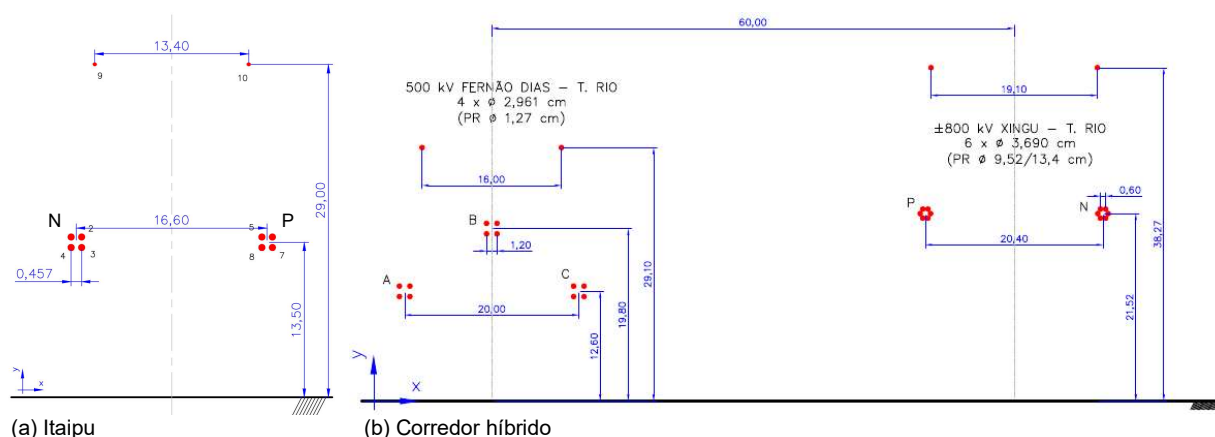


Figura 1 – Configuração no meio do vão das LTs simuladas (sem escala)

### 3.2 Comparação entre métodos

O processo para ambos os métodos se demonstrou bastante intensivo. O PIC, para as condições deste problema, mostrou-se mais estável, basicamente por assegurar na sua essência o princípio de conservação de massa. O MEF demonstrou a necessidade de malhas bem densas, o que elevou o uso da memória. As Figuras 2 e 3 ilustram a saída final, para ambos os métodos, nos dois casos teste. A cor vermelha está associada a cargas positivas e a cor azul a cargas negativas em todas as figuras seguintes. A quantificação da densidade no MEF é implícita do método, obtendo-se assim um gráfico mais suave. Em ambos os métodos, obteve-se uma distribuição de cargas bem expressiva, com correntes iônicas seguindo as linhas de campo. Na Figura 2(b) e Figura 3(b) nota-se a corrente iônica formada entre os polos.

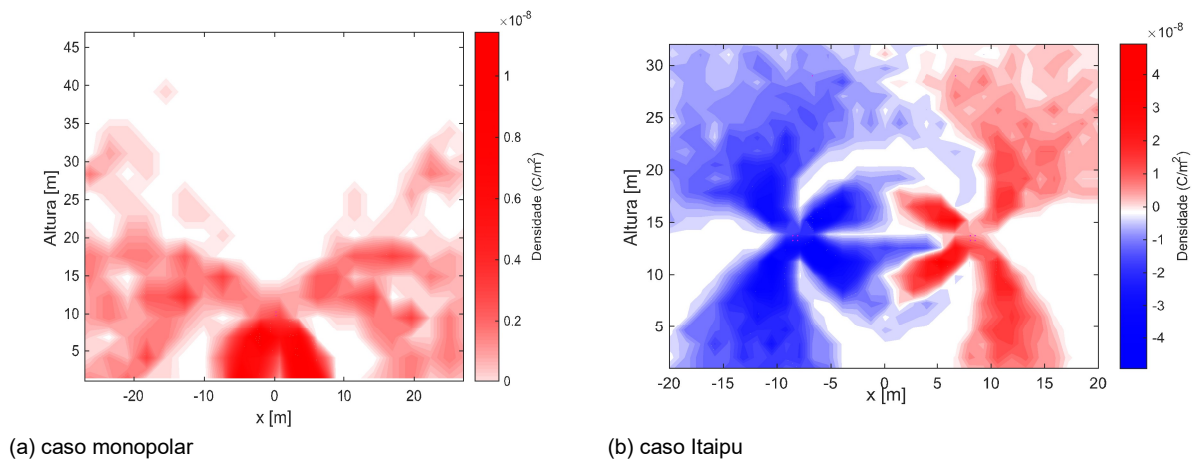


Figura 2 – Densidade de cargas espaciais obtidas com o método PIC

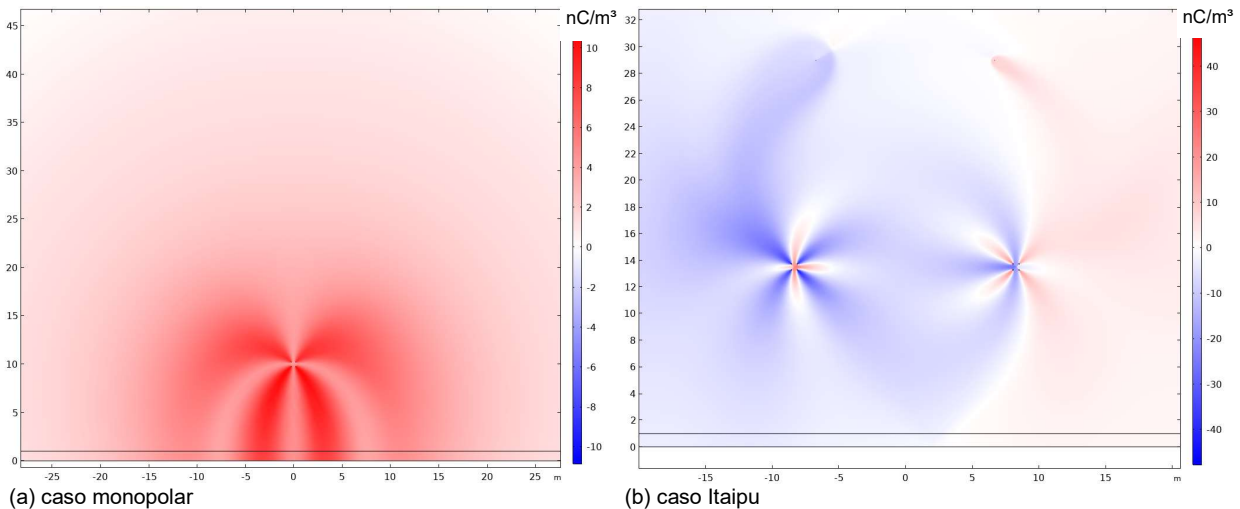
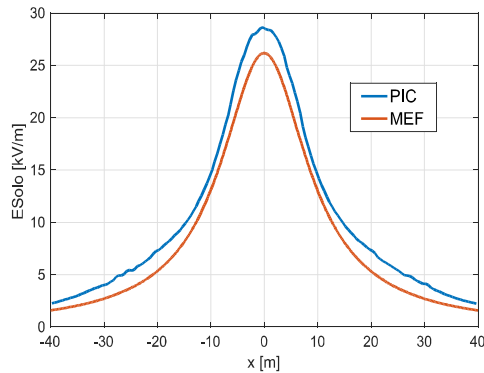
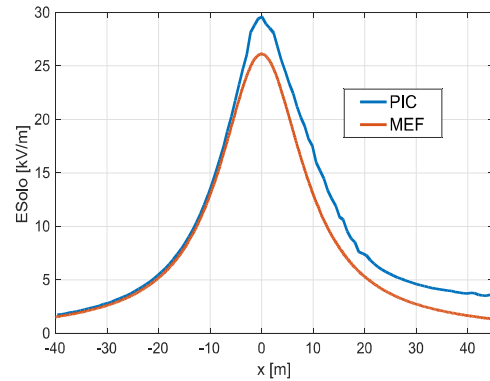


Figura 3 – Densidade de cargas espaciais obtidas com o MEF

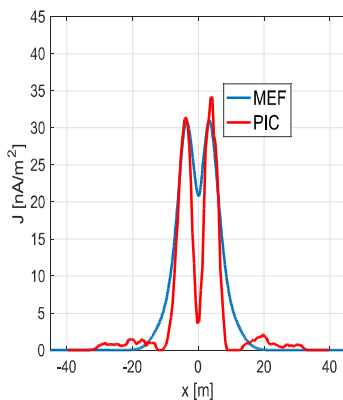


(a)  $v = 0 \text{ m/s}$

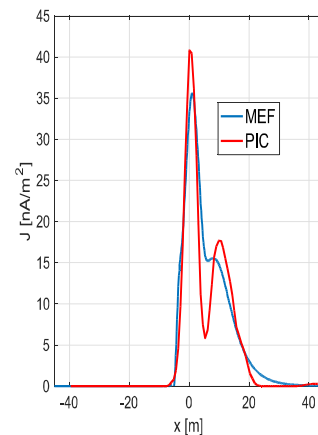


(b)  $v = 2 \text{ m/s}$

Figura 4 – Comparação do cálculo do campo elétrico entre métodos – monopolar



(a)  $v = 0 \text{ m/s}$



(b)  $v = 2 \text{ m/s}$

Figura 5 – Comparação do cálculo de densidade de corrente no solo entre métodos – monopolar

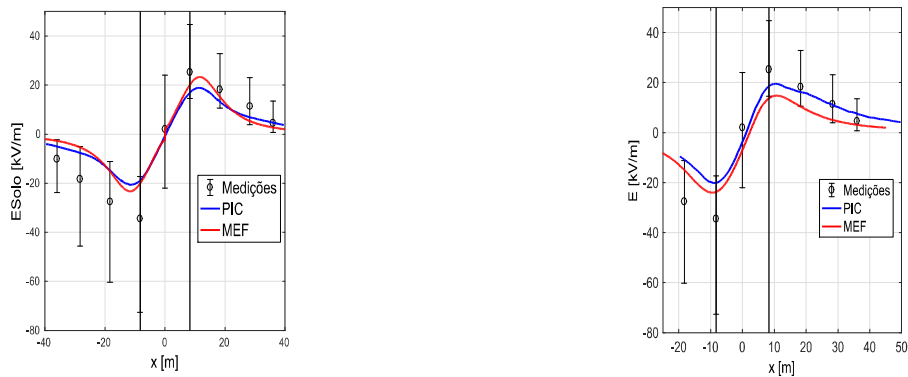
Na Figura 4 são mostrados os aspectos dos perfis de campo elétrico no solo para os dois modelos. O método particle-in-cell forneceu valores mais altos para o perfil, com valores de pico para vento nulo e 2 m/s, 9,3% e 13,3% maiores do que os valores de pico do MEF, respectivamente. Nos perfis de corrente (Figura 5(a) e (b)) as diferenças foram de 9,9% e 14,6%. Como no PIC a corrente iônica é contabilizada com o processamento das cargas que efetivamente alcançam o solo, é esperado que apresente valores de pico maiores. A partir dos gráficos de densidade de corrente iônica no solo é possível observar a influência da difusão artificial no MEF.

Na Figura 6, os valores de perfis de campo são comparados entre modelos e com medições em campo feitas pelo CEPEL [ CITATION Domingues2010 \l 1046 ]. Observa-se que ambos os modelos estão dentro das faixas de incerteza das medições, que são amplas devido às condições reais da linha e do clima e dificuldades de medição, e que há pouca diferença entre as curvas geradas por cada um. No caso dos perfis de densidade de corrente no solo (Figura 7), as faixas de incerteza das medições também são atendidas, porém com curvas divergentes entre os métodos, principalmente para vento de 2 m/s.

### 3.3 Estudo de corredor híbrido

No modelo PIC aplicado neste IT, efeitos mútuos de campo entre os condutores são contabilizados através do MSC, além da consideração da influência das nuvens de cargas espaciais nos campos. Esta propriedade do modelo faz com que o software seja adequado para cálculo de perfis de campo de corredores híbridos.

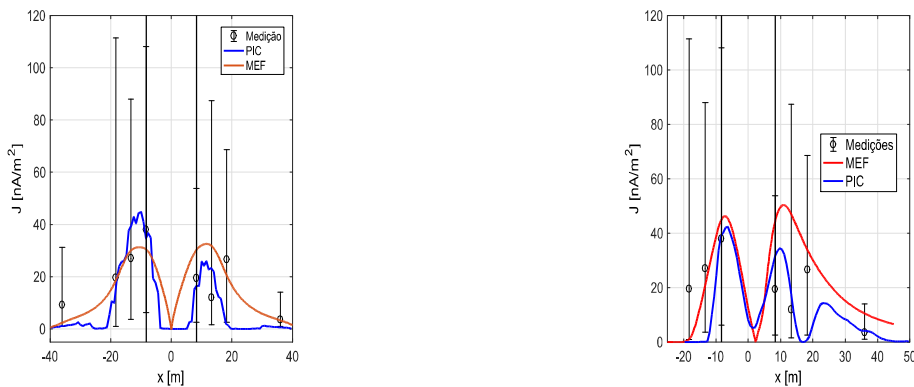
As Figuras 8 e 9 ilustram o aspecto da distribuição espacial de cargas. Na primeira, é notável a formação de nuvens de cargas negativas ao redor das fases, fenômeno conhecido como efeito blindagem (*shielding effect*) [ CITATION Zho13 \l 1046 ] e o deslocamento de partículas negativas dessas nuvens para o polo positivo. Ao longo da trajetória, as cargas espaciais são eliminadas por recombinação, restando poucas cargas que efetivamente alcançam o polo positivo. A larga nuvem de cargas positivas ao redor do polo positivo expande-se o suficiente para a fase C e tem seus íons recombinados ou absorvidos pela mesma fase. Com vento de +2 m/s (Figura 9), as cargas negativas originadas das fases são levadas pelo sentido do vento, porém ao se aproximar do polo positivo, desviam de suas trajetórias iniciais em direção ao polo positivo. As ilustrações das densidades de carga estão nas Figuras 10 e 11, que estão na mesma escala de cores.



(a)  $v = 0 \text{ m/s}$

(b)  $v = 2 \text{ m/s}$

Figura 6 - Comparação do cálculo do campo elétrico entre métodos – Itaipu



(a)  $v = 0 \text{ m/s}$

(b)  $v = 2 \text{ m/s}$

Figura 7- Comparação do cálculo de densidade de corrente no solo entre métodos – Itaipu

Comparações para distintas condições de vento encontram-se nas Figuras 12 e 13. O valor máximo de campo sob o polo positivo tem o seu menor valor em  $w = +2 \text{ m/s}$ , 18,3 kV/m, e o maior sob  $w = -2 \text{ m/s}$ , 23,9 kV/m. Abaixo do polo negativo tem-se 18,8 kV/m sob  $w = -2 \text{ m/s}$  e 23,6 kV/m com  $w = +2 \text{ m/s}$ . Nota-se que há uma tendência de aumento da intensidade de campo entre as linhas para ventos com direção negativa e tendência de redução com ventos de direção positiva.

Conforme as cargas espaciais pela LT CA não alcançam o solo, a densidade de corrente é relevante na região mais próxima à LT CC, de acordo com a Figura 13. Sem vento, as intensidades máximas para densidades de corrente positivas e negativas no solo alcançam 20,5 nA/m<sup>2</sup> e -30,5 nA/m<sup>2</sup>, nesta ordem. Sob  $w = -2 \text{ m/s}$ , a densidade de corrente positiva chega a 26,8 nA/m<sup>2</sup> (incremento de 31 %) e para  $w = +2 \text{ m/s}$  a densidade negativa tem -38,7 nA/m<sup>2</sup> (incremento de 27 %).

O *ripple* nos gradientes superficiais dos polos tem a frequência correspondente ao sinal, 60 Hz, e a amplitude é maior no polo mais próximo à LT CA. Estes *ripples* apresentaram amplitude de 0,44 kV/cm no polo positivo e 0,13 kV/cm no polo negativo.

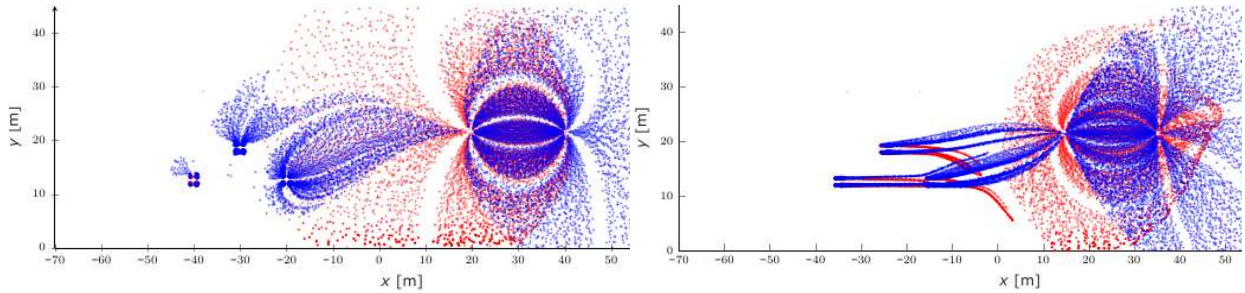


Figura 8 - Distribuição de cargas espaciais para o corredor híbrido sem vento

Figura 9 - Distribuição de cargas espaciais para o corredor híbrido com vento de +2 m/s

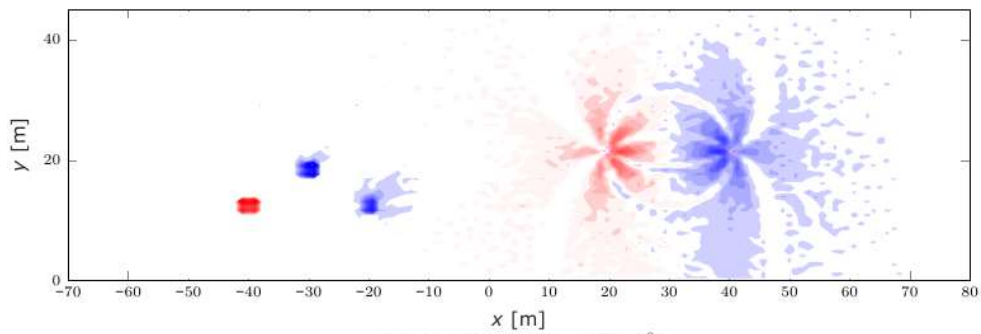


Figura 10 - Densidade de cargas espaciais para o corredor híbrido sem vento

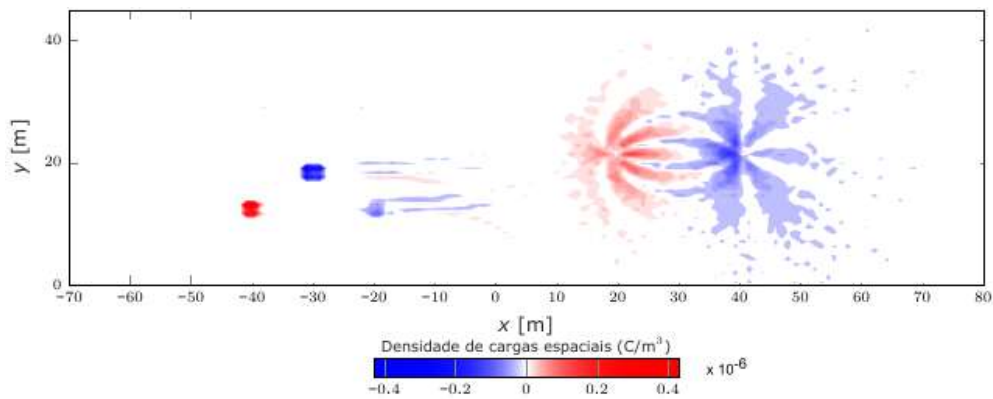


Figura 11 - Densidade de cargas espaciais para o corredor híbrido com vento de +2 m/s



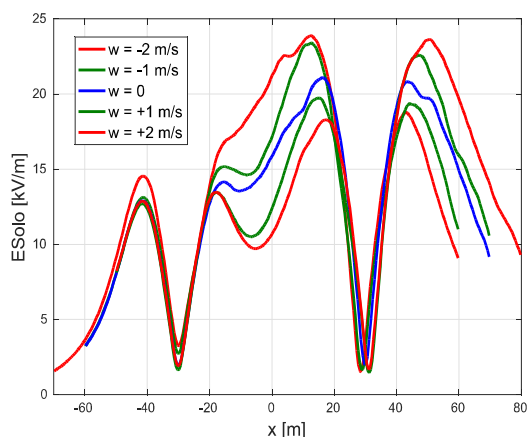


Figura 12–Campo elétrico no solo, com diversas intensidades de vento para o corredor híbrido.

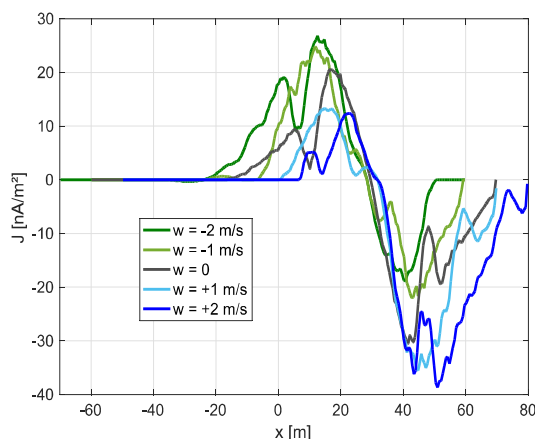


Figura 13 - Distribuição de cargas espaciais para o corredor híbrido com vento de +2 m/s

#### 4.0 - CONCLUSÃO

Os recursos computacionais atuais permitem a aplicação de modelos, que há pouco tempo se mostravam inviáveis. Demonstrou-se a eficiência do método PIC para este tipo de problema, obtendo-se como saída principal o campo elétrico a nível do solo. O método MEF apresentou algumas vantagens nas saídas de dados, como no cálculo de densidade de cargas e densidade de corrente, mas a concepção de cargas espaciais se mostrou mais intuitiva no PIC. O fluxo convectivo, dada a falta de convergência em regime permanente, onerou o processamento no MEF, e o uso de algoritmos de estabilização por difusão distorcem algumas grandezas. Estes ajustes de malha e modelos do MEF devem ser aplicados em cada configuração de linha, o que o torna menos flexível que o PIC.

No caso do corredor híbrido com vento nulo, as cargas espaciais geradas nos condutores CA, aquelas com polaridade oposta ao polo interno, são deslocadas do condutor original pela presença do campo CC. Subsequentemente elas geram nuvens iônicas de dimensões significativas que influenciam o cálculo do perfil de campo elétrico no solo na região entre as LTs. Como visto, esta região é a mais crítica para a determinação do campo, porque nela ambos componentes de campo CA e CC, além das cargas espaciais, têm grande influência no perfil e o valor máximo de pico do campo híbrido aparece nesta mesma área. Fora da região crítica entre as duas LTs, tanto na parte entre o polo negativo e a borda do corredor mais próxima quanto na parte entre a fase A e a borda do corredor em sua vizinhança afastada desta, o campo híbrido coincide com as componentes CA e CC respectivamente. Portanto, para a análise de intensidade de campo nas bordas do corredor compartilhado, a desconsideração da LT mais próxima da borda em foco revela-se uma ótima aproximação. Em relação à influência do vento, conclui-se que ela é bastante relevante tanto na avaliação do campo elétrico máximo dentro do corredor quanto em suas bordas. Na borda perto da LT CA, não há corrente iônica no solo e as cargas espaciais apresentam baixa influência devido ao efeito blindagem.

É prevista a pesquisa das funções de geração em condutores usuais nas linhas de transmissão brasileiras, possibilitando assim a calibração do sistema para condições mais próximas do setor elétrico, culminando em modelos de campo elétrico, que podem ser estendidos para outros fenômenos dependentes das cargas espaciais.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) WHITEHEAD, J. B. "The Electric Strength of Air". Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, v. XV, n. 2, p. 1159-1187, 1910.
- (2) PEEK, F. W. "The Law of Corona and the Dielectric Strength of Air". Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, v. XLVI, n. 3, p. 1889-1965, 1911.

- (3) DEUTSCH, W. "Über die Dichteverteilung unipolarer Ionenströme". Annalen der Physik, v. 408, p. 588-612, 1933.
- (4) KAPTSOV, N. A.; NEUMAIER, A.; SPRINGSTEIN, K. A. Elektrische Vorgänge in Gasen und im Vakuum. Alemanha: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1955. 488-494 p.
- (5) PEEK, F. W. Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering. New York, EUA: McGraw-Hill, 1929.
- (6) ARRUDA, C. K. C.; LIMA, A. C. S. "Corona modeling in HVDC transmission lines based on a modified particle-in-cell approach". Electric Power Systems Research, v. 125, p. 91-99, 2015. ISSN DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epr.2015.03.028>.
- (7) ARRUDA, C. K. C. Modelagem de Efeito Coroa em Linhas de Transmissão em Corrente Contínua. Coppe/UFRJ. Rio de Janeiro. 2012. (Tese de doutorado).
- (8) BIRDSALL, C. K.; LANGDON, A. B. Plasma Physics via Computer Simulation. [S.l.]: CRC Press, 2004.
- (9) QIN, B. L.; PEDROW, P. D. "Particle-in-cell Simulation of Bipolar dc Corona". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 1, n. 6, Dec. 1994.
- (10) LEKGANYANE, M. J.; IJUMBA, N. M.; BRITTEN, A. C. A comparative study of space charge effects on corona current using an indoor corona cage and a monopolar test line. PowerAfrica '07. IEEE. Johannesburg, África do Sul: [s.n.]. July 2007. p. 1-6.
- (11) PORTELA, C. M. J. C. M. Linhas de transmissão CCAT e linhas de eletrodos. In: \_\_\_\_\_ Curso sobre Estações Conversoras e Transmissão em Corrente Contínua - Tópicos Avançados. Rio de Janeiro, RJ: Promon Engenharia, v. IV, 1989. Cap. 11.
- (12) SINGER, H.; STEINBIGLER, H.; WEISS, P. "A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-93, n. 5, p. 1660-1668, Sep. 1974.
- (13) JANISCHEWSKYJ, W.; GELA, G. "Finite Element Solution for Electric Fields of Coronating DC Transmission Lines". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS99, n. 3, p. 1000-1012, May 1979.
- (14) TAKUMA, T.; IKEDA, T.; KAWAMOTO, T. "Calculation of Ion Flow Fields of HVDC Transmission Lines By the Finite Element Method". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS101, n. 12, p. 4802-4810, Dec. 1981.
- (15) QIN, B. L. et al. "Accurate Calculation of Ion Field Under HVDC Bipolar Transmission Lines". IEEE Transactions on Power Delivery, v. 3, n. 1, p. 368-376, Jan. 1988.
- (16) AL-HAMOUZ, Z. "Finite Element Computation of Corona Around Monopolar Transmission Lines". Electric power systems research, v. 48, n. 1, p. 57-63, 1998.
- (17) COMSOL. COMSOL Documentation. COMSOL. [S.l.]. 2018.
- (18) OLIVEIRA, F. T. Aplicação do método Particle-in-Cell para cálculo de campos elétricos associados a linhas de transmissão em corrente alternada e contínua. Rio de Janeiro: [s.n.], 2018. Dissertação de Mestrado.
- (19) DOMINGUES, L. A. M. C. et al. Performance of HVDC Transmission Lines in Brasil - Analysis of Field Data and Calculation Methods. Bienal Cigré. [S.l.]: [s.n.]. 2010.
- (20) ZHOU, X. et al. "Shielding Effect of HVAC Transmission Lines on the Ion-Flow Field of HVDC Transmission Lines". IEEE Transactions on Power Delivery, v. 28, n. 2, p. 1094-1102, Abril 2013. ISSN 0885-8977.



#### DADOS BIOGRÁFICOS

**Felipe Teodoro de Oliveira** nasceu na cidade de Rio de Janeiro, em 1989. Obteve seu B.Sc. e M.Sc. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 2014 e 2018, respectivamente. Atualmente está no Centro de



**XXV SNPTEE**  
**SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E**  
**TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

3764  
GLT/04

10 a 13 de novembro de 2019  
Belo Horizonte - MG

Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), onde trabalha desde 2014. Sua principal área de pesquisa envolve métodos numéricos para a concepção de linhas de transmissão de extra-alta tensão e ultra-alta tensão.

**Carlos Kleber da Costa Arruda**, nascido no Rio de Janeiro, RJ, engenheiro eletricista (1999) pelo CEFET/RJ, D.Sc. (2012) pela COPPE/ UFRJ, pesquisador do CEPEL desde 2000 trabalhando em modelos numéricos de linhas de transmissão, efeito corona, aterramento e descargas atmosféricas. Possui experiência em diversos métodos, como elementos finitos, elementos de contorno, dos momentos e simulação de cargas, com prática de implementação em diversas linguagens, como C++, Java e Fortran.

**Antonio Carlos Siqueira de Lima** formou-se em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia da UFRJ em fevereiro de 1995, obteve os títulos de Mestre em Ciências (M.Sc.) e de Doutor em Ciências (D.Sc.) em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ em fevereiro de 1997 e dezembro de 1999, respectivamente. Durante 1998 foi Visiting Scholar no Department of Electrical and Computer Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canadá. De 2000 a 2002 esteve na Gerência de Estudos Especiais do Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro (ONS). É professor associado do Departamento de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, UFRJ, desde 2002, e a partir de 2003 atua também no Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/ UFRJ.