



COMPORTAMENTO ELÉTRICO DE FEIXES DE CONDUTORES EM LINHAS AÉREAS DE ENERGIA

Adilton J. L. Pereira*¹, Rose M. de S. Batalha¹, Pyramo P. da Costa Junior¹, Johnny S. Andrade¹

IPUC – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Resumo – O artigo apresenta uma avaliação do uso de feixes de condutores em sistemas aéreos de transmissão de energia. Ao se aplicar o cálculo analítico da intensidade de campo elétrico nas configurações propostas, mostrou-se a efetividade da técnica para atenuação do gradiente de potencial em feixes com até quatro condutores. Os resultados evidenciam que o uso de condutores dispostos em feixes geométricos é um recurso adotado para atenuar os impactos do efeito corona, por meio da redução da intensidade do gradiente de potencial elétrico.

Palavras-Chave - Campo Elétrico Superficial. Feixe de Condutores. Linhas Aéreas de Transmissão.

ELECTRICAL BEHAVIOR OF BUNDLE CONDUCTORS IN OVERHEAD POWER LINES

Abstract – This paper presents an evaluation of the use of bundle conductors in overhead power lines. When applying the analytical calculus of the superficial electric field strength in the proposed configurations, it was shown the effectiveness of the technique for attenuation of the potential gradient in bundles with up to four conductors. The results show that the use of bundle conductors is a feature adopted to attenuate the impacts of the corona effect by reducing the intensity of the electric potential gradient.

Keywords - Bundle Conductors. Overhead Power Lines. Surface Electric Field.

NOMENCLATURA

ϵ_0	Permissividade do espaço livre.
ρ_v	Densidade volumétrica de carga.
CAA	Condutor de alumínio com alma de aço.
D	Densidade de Fluxo Elétrico. Notação vetorial.
D_n	Distância carga-carga imagem.
d_c	Diâmetro do subcondutor.
d_n	Distância carga-carga.
dS	Elemento diferencial de superfície.

dv	Elemento diferencial de volume.
e	Distância entre dois subcondutores adjacentes do feixe.
E_{av}	Gradiente de potencial médio.
E_r	Módulo da Intensidade do Campo Elétrico radial.
H_c	Distância vertical cabo-solo.
h	Distância vertical carga-solo.
L_c	Distância horizontal entre fases adjacentes.
n	Número de subcondutores.
$[P]$	Matriz dos Coeficientes de Potencial de Maxwell.
Q	Carga elétrica.
$[Q]$	Carga Elétrica. Notação matricial.
R	Raio da circunferência circunscrita ao feixe de condutores.
r	Distância radial.
r_c	Raio do subcondutor.
r_{eq}	Raio do condutor equivalente ao feixe.
V	Potencial elétrico.
$[V]$	Potencial elétrico. Notação matricial

I. INTRODUÇÃO

Em linhas aéreas de transmissão de energia, a elevação do número de subcondutores por fase é um recurso utilizado para redução dos impactos decorrentes do efeito corona.

À medida que o nível de tensão de transmissão se eleva, faz-se necessário a redução do gradiente de potencial ao redor dos cabos condutores para viabilização de operação da linha dentro dos limites regulatórios da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), como perdas elétricas e nível de campo elétrico na superfície do solo, por exemplo.

A adoção de feixe de condutores também reduz a impedância característica da linha, Z_c , influenciando a elevação de sua capacidade de transmissão total, conhecida por *Surge Impedance Loading (SIL)*.

O elevado gradiente de potencial elétrico na superfície dos subcondutores é fator preponderante para o aparecimento e manutenção da intensidade do efeito corona. Por isso mesmo, a avaliação do gradiente de potencial em feixe de condutores é etapa indispensável durante a elaboração do projeto básico de uma linha de transmissão, quando se escolhe o cabo condutor e a geometria do feixe.

O trabalho tem por objetivo apresentar a metodologia analítica do cálculo da intensidade do campo elétrico na superfície dos subcondutores dispostos em feixes. Por consequência, mostra-se que o feixe e a geometria dos

*adiltonjunio@hotmail.com

subcondutores são recursos adotados para se reduzir a intensidade dos impactos decorrentes da manifestação do efeito corona sob sistemas aéreos de transmissão.

II. EFEITO CORONA EM LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO

O fenômeno corona é resultado da ionização do ar atmosférico quando elétrons livres, acelerados pelo campo elétrico aplicado, colidem com as moléculas gasosas de oxigênio e nitrogênio [1]. Esse processo apresenta realimentação positiva, uma vez que o produto da ionização do ar resulta em mais elétrons livres passíveis de serem acelerados.

A disrupção do meio isolante gasoso, por meio de descargas parciais, atua como fonte primária para a emissão de sinais interferentes. O processo inicia-se quando a Intensidade do Campo Elétrico torna-se superior à rigidez dielétrica do ar [6].

Em situações práticas, os sinais são medidos e expressos na unidade $\mu\text{V}/\text{m}$. Daí o nome Tensão de Rádio Interferência (TRI), do inglês *Radio Interference Voltage* (RIV). Os distúrbios causados pelas descargas de corona podem ser captados via ar (medição de ruído audível ou do ruído eletromagnético medido via antena) ou pela medição direta via cabo (ruído eletromagnético conduzido).

A altitude e elevada umidade relativa do ar são exemplos de fatores ambientes responsáveis pela redução do gradiente crítico disruptivo do ar [1]. Em situações críticas, na presença de um campo elétrico não uniforme, partículas contaminadoras, como poeira, sujeira tornam-se fontes pontuais de descargas elétricas.

A. Escolha Econômica do Cabo Condutor

Como a magnitude do campo elétrico nas proximidades do condutor é fator preponderante para o início do efeito corona, é possível realizar algumas considerações de ordem geométrica dos condutores durante a avaliação do efeito corona.

A primeira delas, particularmente especial, é a escolha econômica do cabo condutor ainda no projeto básico da linha de transmissão. Entende-se por escolha econômica a determinação da formação mecânica do condutor bem como a configuração geométrica de seu feixe, por meio do equacionamento entre as perdas por efeito Joule, pelo efeito corona e os recursos financeiros associados.

A avaliação elétrica do condutor perpassa pela avaliação da condutibilidade elétrica, resistência mecânica à tração, peso específico, resistência à oxidação e oxidação por agentes químicos poluentes, e por fim, pelas perdas associadas ao efeito corona.

A abordagem experimental de Peek é usualmente retomada em trabalhos e relatórios técnicos como etapa inicial da escolha econômica do cabo condutor de linhas aéreas de energia [1].

III. CAMPO ELÉTRICO EM CONDUTORES CILÍNDRICOS

Calcula-se a Intensidade de Campo Elétrico associado a um condutor cilíndrico isolado no espaço com cargas

elétricas uniformemente distribuídas por meio da Formulação de Gauss. Seu enunciado prevê que o fluxo elétrico total através de uma superfície fechada é igual à carga total envolvida [8].

$$\oint_S \mathbf{D}_s \cdot d\mathbf{S} = \int_v \rho_v dv \quad (1)$$

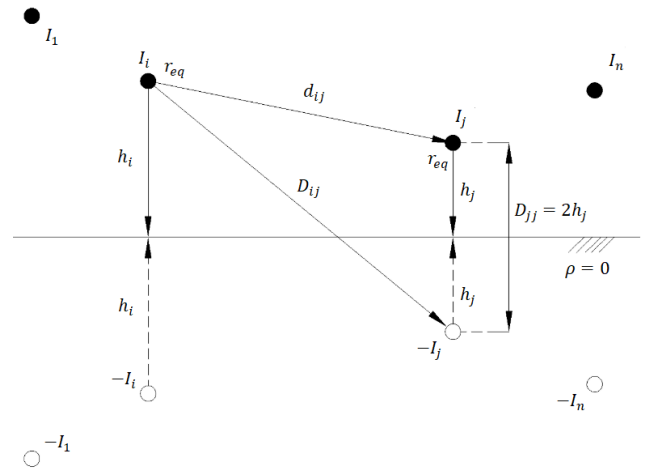
O valor do campo elétrico em uma linha radial cilíndrica pode ser encontrado pela relação [8]:

$$E_r = \frac{Q_{int}}{2\pi\epsilon_0 r} \left[\frac{V}{m} \right] \quad (2)$$

A. Matriz dos Coeficientes de Potenciais de Maxwell

Uma linha de transmissão genérica com condutores aéreos pode ser apresentada como na Figura 1. A aplicação do Método das Imagens à configuração permite obter a matriz de capacitâncias de uma linha de transmissão. O solo é apresentado como superfície equipotencial no potencial nulo, sendo a Intensidade de Campo Elétrico, portanto, normal à superfície.

Figura 1: Linha de transmissão genérica de n condutores [10].



Pelas condições de contorno do método das imagens, as imagens-carga recebem sinais opostos àqueles valores das cargas reais. Com isso,

$$\sum_{i=1}^n Q_i \Big|_{\text{cargas reais}} + \sum_{i=1}^n -Q_i \Big|_{\text{cargas-imagem}} = 0 \quad (3)$$

A diferença de potencial entre o condutor n e o solo (tomado como potencial nulo) deve levar em consideração o resultado da superposição de todos os demais condutores e suas respectivas imagens. Para isso, escreve-se a relação:

$$V_n = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[Q_1 \ln \frac{D_{n1}}{a_{n1}} + \dots + Q_i \ln \frac{D_{ni}}{a_{ni}} + \dots + Q_n \ln \frac{2h_n}{r_n} \right] [V] \quad (4)$$

Em sua forma matricial, a diferença de potencial entre os condutores da linha genérica pode ser expressa por [10]:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \begin{bmatrix} \ln \frac{2h_1}{r_1} & \dots & \ln \frac{D_{1i}}{d_{1i}} & \dots & \ln \frac{D_{1n}}{d_{1n}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ln \frac{D_{i1}}{d_{i1}} & \dots & \ln \frac{2h_i}{r_i} & \dots & \ln \frac{D_{in}}{d_{in}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ln \frac{D_{n1}}{d_{n1}} & \dots & \ln \frac{D_{ni}}{d_{ni}} & \dots & \ln \frac{2h_n}{r_n} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_i \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

Em sua forma resumida:

$$[V] = [P] [Q] \quad (6)$$

Pela Matriz dos Coeficientes de Potencial de Maxwell, é possível associar a distribuição de cargas de um sistema de condutores com o valor do potencial elétrico – grandeza básica de fácil acesso em linhas de transmissão.

Da definição de capacitância entre dois elementos condutores – razão entre a magnitude da carga total do sistema e a magnitude da diferença de potencial entre os condutores – é possível escrever, por fim:

$$[Q] = [P]^{-1} [V] \quad (7)$$

B. Feixe de Condutores

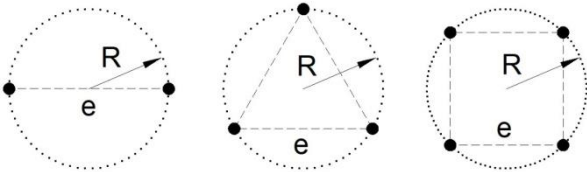
Uma das técnicas utilizadas em projeto para redução do gradiente superficial em condutores considera a elevação do número de subcondutores por fase, mantendo-se os tamanhos unitários dentro dos limites aceitáveis de carregamento elétrico e mecânico.

O efeito equivalente de vários condutores por fase é aumentar o raio efetivo do feixe, para uma mesma tensão aplicada e geometria da linha. Como a manifestação do efeito corona é função direta do gradiente de potencial próximo ao condutor, ao fazer parte da geometria do feixe, o condutor estará menos suscetível à sua ocorrência.

O raio equivalente eletrostático do feixe é definido como o raio de um condutor cilíndrico fictício que, se colocado com seu eixo longitudinal coincidindo com o do feixe de condutores, apresentará o mesmo gradiente médio que aquele existente na superfície do feixe [5].

A Figura 2 apresenta três diferentes configurações de feixes de condutores abordados neste artigo, com dois, três e quatro subcondutores por fase, respectivamente.

Figura 2: Feixe de condutores com dois, três e quatro subcondutores, respectivamente.



As relações geométricas aplicadas às três configurações da figura 2 permitem relacionar o raio da circunferência

circunscrita ao feixe, R, com a distância entre dois subcondutores adjacentes do feixe, e.

Assim, para feixes de dois subcondutores:

$$e = 2R \quad (8)$$

Em um feixe triangular:

$$e = \sqrt{3}R \quad (9)$$

Por fim, para feixes quadrados:

$$e = \sqrt{2}R \quad (10)$$

A literatura apresenta alguns métodos consagrados para resolução desse problema eletrostático. Eles são classificados por meio de sua natureza analítica ou computacional [7].

Em ordem crescente de complexidade, os principais analíticos são os Métodos de Coeficiente de Potencial Maxwell e sua extensão proposta por *Markt e Mengele*. Já os computacionais são os Métodos de Imagens Sucessivas, Simulação de Cargas e o Método de Elementos Finitos (MEF) [7].

C. Método Analítico do Cálculo do Campo Elétrico Superficial em Feixes de Condutores

Atribui-se a *Markt e Mengele* o primeiro registro da técnica analítica de cálculo do campo elétrico superficial em feixes de condutores, em uma publicação alemã de 1932. Por ela, o problema eletrostático clássico de determinação do valor do campo elétrico em condutores cilíndricos singelos carregados acima do solo, através do Método das Imagens, é estendido para abranger condutores carregados em feixe [3].

O método de resolução consiste na aplicação do Método das Imagens à configuração geométrica da linha. Por ele, as condições de contorno do problema eletrostático são substituídas por uma distribuição de cargas situadas fora da região de interesse. O termo cargas-imagem é justamente a distribuição não arbitrária de cargas escolhidas de modo a reproduzir as condições de contorno inicialmente substituídas [8].

O processo de cálculo proposto por *Markt e Mengele* [3] pode ser decomposto em duas etapas. A primeira etapa consiste na substituição do feixe de condutores por um condutor singelo equivalente para determinação da carga total dessa configuração. Para isso, recorre-se ao método do coeficiente de potencial de Maxwell [3]. O feixe de condutores deve ser substituído por um condutor equivalente de raio definido pela relação:

$$r_{eq} = [r_c \cdot n \cdot R^{n-1}]^{\frac{1}{n}} \quad (11)$$

A partir da representação dos feixes por condutores singelos equivalentes, a carga total em cada um deles pode ser determinada pelo método do coeficiente de potencial de Maxwell, levando-se em consideração os potenciais apropriados de cada fase.

Na segunda etapa ocorre a avaliação individual do campo elétrico em cada subcondutor do feixe. Considera-se nesse momento que a carga total obtida inicialmente está uniformemente distribuída ao longo dos condutores do feixe.

De posse da carga total acumulada no feixe, a intensidade de campo elétrico médio ao redor do feixe é expressa por [2]:

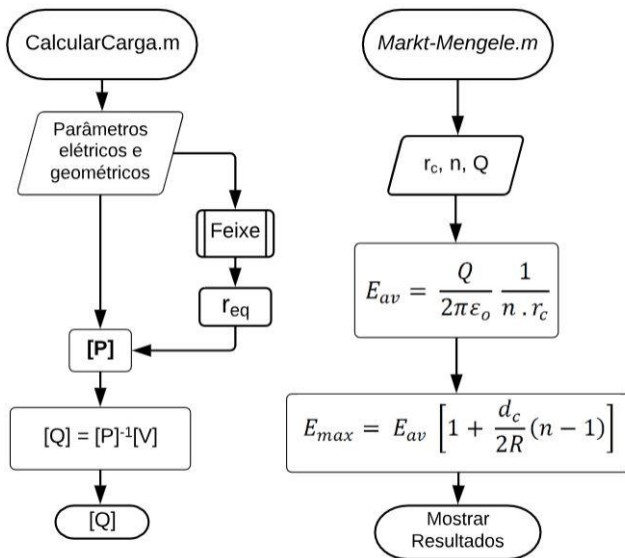
$$E_{av} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 n \cdot r_{eq}} \quad (12)$$

As condições de simplificação levam em consideração que os subcondutores estão distantes uns dos outros, de tal forma que cada um possa ser aproximado por uma linha de carga posicionada no centro de um cilindro. O máximo gradiente superficial do feixe pode ser determinado em termos de seu valor médio [2].

$$E_{max} = E_{av} \left[1 + \frac{d_c}{2R} (n - 1) \right] \quad (13)$$

Ao considerar o feixe isolado no espaço livre, *Markt e Mengele* assumem que a carga está uniformemente distribuída entre todos os subcondutores. Como resultado, os gradientes máximo e médio possuem os mesmos valores [3]. O fluxograma da Figura 3 apresenta o resumo do procedimento do cálculo analítico adotado neste trabalho.

Figura 3: Fluxograma do cálculo do campo elétrico superficial em feixe de condutores.



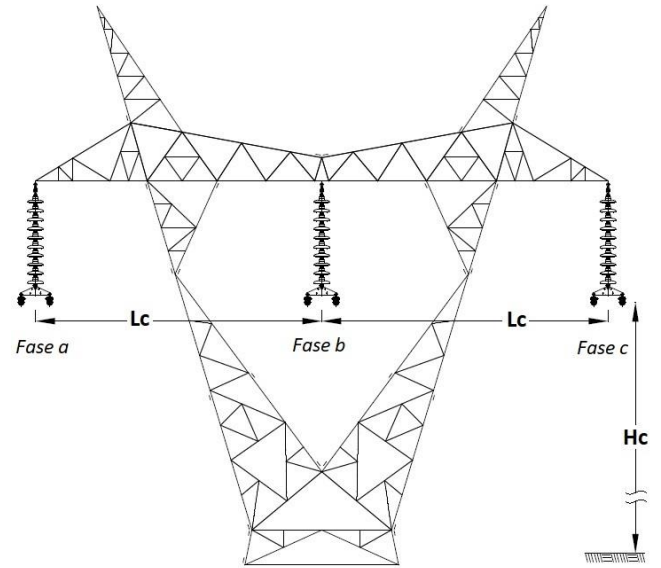
IV. METODOLOGIA

A Figura 4 apresenta a silhueta da torre de transmissão tomada como referência para o desenvolvimento do estudo.

Levando-se em consideração que os cabos para-raios são aterrados nas estruturas metálicas durante todo o percurso da linha de transmissão, os potenciais elétricos nesses condutores são equipotencializados com o sistema de aterramento das estruturas. Por isso, é possível considerar o potencial elétrico nulo nesses condutores, para condições de regime normal de operação.

As cargas elétricas induzidas nas superfícies dos cabos para-raios produzem gradientes de potencial que raramente chegam a preocupar, quando comparados com os condutores das fases submetidos aos potenciais de regime [2].

Figura 4: Linha de Transmissão de referência da metodologia.



Os principais parâmetros elétricos da configuração básica estão resumidos na Tabela 1. Com base em seus parâmetros, são calculados os valores médio e máximo do campo elétrico superficial nos subcondutores do feixe com base no Método Analítico de *Markt e Mengele*.

Tabela 1: Parâmetros Gerais da Configuração Modelo.

Nível de Tensão [kV]	H _c [m]	L _c [m]
335	12,7	10,0

Avalia-se, em seguida, a efetividade do uso de feixe de condutores em linhas de transmissão quando se comparam os valores obtidos do campo elétrico superficial em função da variação do diâmetro do condutor, número de subcondutores e espaçamento do feixe. Para esse fim, a Tabela 2 apresenta os parâmetros geométricos e construtivos dos subcondutores do feixe utilizados para fins comparativos.

Tabela 2: Hipóteses para Cálculo do Campo Elétrico e seus respectivos Parâmetros Geométricos.

Hipóteses	n	e [mm]	dc [mm]
A.01	1	-	25,15
A.02	2	200	25,15
A.03	2	457	25,15
A.04	2	600	25,15
A.05	3	200	25,15
A.06	3	457	25,15
A.07	3	600	25,15
A.08	4	200	25,15
A.09	4	457	25,15
A.10	4	600	25,15
B.01	1	-	28,14
B.02	2	200	28,14
B.03	2	457	28,14
B.04	2	600	28,14
B.05	3	200	28,14
B.06	3	457	28,14
B.07	3	600	28,14
B.08	4	200	28,14
B.09	4	457	28,14
B.10	4	600	28,14

Avaliando-se a Tabela 2, é possível discriminar o cálculo do campo elétrico superficial em três níveis distintos. São eles:

- **Diâmetro do subcondutor, d_c :** Dois diferentes condutores serão escolhidos para avaliação do campo elétrico superficial em função do raio médio geométrico;
- **Número de subcondutores, n :** Faixa de aplicação com 1, 2 e 3 subcondutores.
- **Espaçamento entre subcondutores, e :** Faixa de aplicação de espaçamento para 200, 457 e 600 mm, conforme Figura 2.

As hipóteses A e B são idênticas na concepção, exceto pela diferença do cabo condutor. As hipóteses iniciais – A.01 e B.01 – relacionam-se à adoção de condutores singelos, em lugar de feixes de condutores.

V. RESULTADOS ENCONTRADOS

Os maiores valores do gradiente de potencial para feixes de condutores utilizando cabos CAA Grosbeak, hipótese A, e cabos CAA Drake, hipótese, B foram obtidos por meio da rotina computacional desenvolvida em ambiente MATLAB®. Os resultados obtidos com base nas hipóteses levantadas na Tabela 2 estão apresentados nas Tabelas 3 e 4.

A Figura 5 apresenta a comparação gráfica entre eles. Esta disposição está associada à configuração horizontal das fases conforme apresentando na Figura 4. Dessa forma, os resultados indicados estão por fase.

Os grupos de medição destacados com uma circunferência representam os feixes de dois condutores. Os grupos intermediários, destacados por um triângulo, estão associados ao feixe de três condutores, enquanto o grupo inferior indica o feixe de quatro cabos por meio de um quadrado.

Figura 5: Gradiente de potencial na superfície de subcondutores CAA Grosbeak e CAA Drake agrupados em feixes

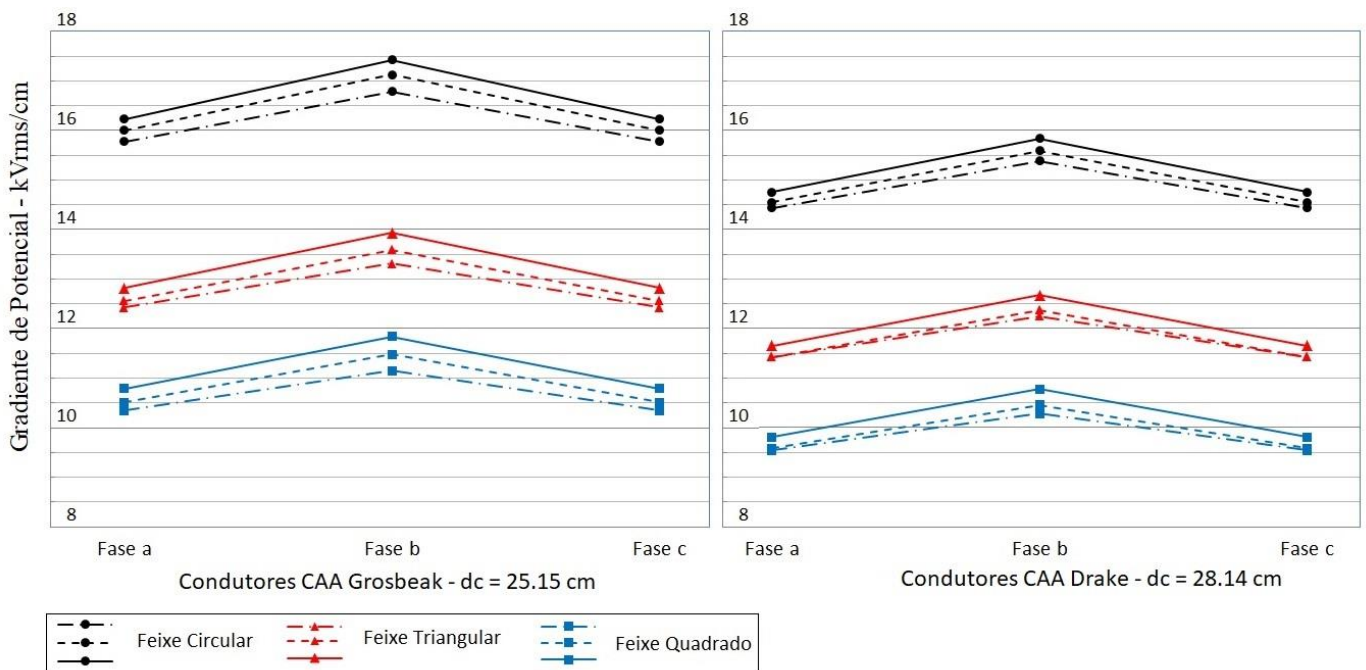


Tabela 3: Gradientes de Potencial Máximo e Crítico em Feixes de Condutores CAA Grosbeak.

Hipóteses	E_{MAX} [kVrms/cm]		
	Fase a	Fase b	Fase c
A.01	22,39	23,49	22,39
A.02	15,78	16,79	15,78
A.03	16,00	17,12	16,00
A.04	16,23	17,42	16,23
A.05	12,43	13,31	12,43
A.06	12,56	13,59	12,56
A.07	12,82	13,93	12,82
A.08	10,35	11,15	10,35
A.09	10,51	11,48	10,51
A.10	10,79	11,84	10,79

Tabela 4: Gradientes de Potencial Máximo e Crítico em Feixes de Condutores CAA Drake.

Hipóteses	E_{MAX} [kVrms/cm]		
	Fase a	Fase b	Fase c
B.01	20,34	21,36	20,34
B.02	14,44	15,38	14,44
B.03	14,55	15,59	14,55
B.04	14,75	15,84	14,75
B.05	11,43	12,25	11,43
B.06	11,43	12,38	11,43
B.07	11,65	12,67	11,65
B.08	9,54	10,28	9,54
B.09	9,58	10,46	9,58
B.10	9,81	10,78	9,81

Os resultados plotados na Figura 5 destacados por meio de linha cheia estão relacionados com os feixes de condutores espaçados em 600 mm. Os valores intermediários traçados por meio de linha pontilhada relacionam-se os feixes com 457 mm de espaçamento. Por fim, os resultados marcados por traço-ponto referem-se os feixes com 200 mm.

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo sobre o cálculo de campo elétrico na superfície de condutores cilíndricos empregados em linhas de transmissão de energia.

Por meio de considerações de geometria, foi possível utilizar a Matriz dos Coeficientes de Potencial de Maxwell para estimar a carga total distribuída no feixe. Em seguida, utilizou a metodologia de cálculo de *Markt e Mengele* para calcular o valor do gradiente de potencial na superfície de cada subcondutor.

Destaca-se que a distribuição e intensidade do campo elétrico é fator determinante para a incidência do efeito corona, onde o elevado gradiente de potencial próximo à superfície do condutor faz desencadear o fenômeno.

Os resultados indicaram que condutores agrupados com menor nível de espaçamento, assim como em maior quantidade, favoreceram a redução dos níveis de campo elétrico superficial nesses subcondutores. Além disso, os resultados indicaram uma redução dos níveis de campo elétrico naqueles condutores de maior diâmetro, em comparação a condutores mais finos.

Esta generalização permite concluir que a manifestação e os impactos do fenômeno corona estarão atenuados em condutores de maior área superficial.

Como proposta de trabalhos futuros considera-se a avaliação do campo elétrico superficial por meio de técnicas numéricas como o Método dos Elementos Finitos (MEF). Assim, as hipóteses simplificadoras poderiam ser reduzidas ao mesmo tempo em que se eleva a capacidade de processamento das equações. Com esta técnica, além dos cálculos com maior precisão, seria possível apresentar a

distribuição espacial dos valores de campo em torno dos condutores.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Britten, A. Burger, Corona, in: S. Bisnath et al. (Ed.), *The Planning, Design and Construction of Overhead Power Lines. 132 kV and above*, Crown Publications, Johannesburg, 2005.
- [2] R. D. Fuchs, *Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas*, EDUFU, 3ª edição, Uberlândia, 2015.
- [3] IEEE, “A Survey of Methods for Calculating Transmission Line Conductor Surface Voltage Gradients”. *IEEE Trans. on Power App. Syst.*, vol. PAS-98, no. 6, pp. 1996-2014, Nov./Dec. 1979.
- [4] F. Kiessling et al, *Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction*, Springer, Berlin, 2003.
- [5] P. R. Labegalini et al, *Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão*, Blücher, 2ª edição, São Paulo, 1992.
- [6] R. M. Leão, *Rádio interferência proveniente de linhas de alta tensão*, EDIPUCRS, Porto Alegre, 2008.
- [7] Q. Li, S. M. Rowland, R. Shuttleworth, “Calculating the Surface Potential Gradient of Overhead Line Conductors”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 1, pp. 43-52, February 2015.
- [8] K. D. Machado, *Teoria do Eletromagnetismo*, Volume 1, UEPG, Ponta Grossa, 2000.
- [9] A. S. Timascheff, “Field Patterns of Bundle Conductors and Their Electrostatic Properties”, *Trans. of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power App. Syst.*, vol. 80, no. 3, pp. 590-596, April 1961.
- [10] L. C. Zanetta Júnior, *Fundamentos de sistemas elétricos de potência*. Livraria da Física, São Paulo, 2005.
- [11] G. E. Adams, “Voltage Gradients on High-Voltage Transmission Lines”, *Trans. of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power App. Syst.*, vol. 74, no. 3, pp. 5-11, 1955.