

# Influência dos Planos de Terra durante o Ensaio de Corona Visual em Arranjo Isolante para Linha Aérea de Transmissão de 500 kV

Adilton J. L. Pereira\*, Ivan J. S. Lopes\*\*

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Minas Gerais – Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil

\* E-mail: [adt@ufmg.br](mailto:adt@ufmg.br)

\*\* E-mail: [ivanlopes@ufmg.br](mailto:ivanlopes@ufmg.br)

---

**Abstract:** Technical compliance of insulating arrangements of overhead transmission lines is traditionally validated by carrying out electrical tests in high-voltage laboratories. With limited technical and financial resources, these tests are mostly carried out in closed laboratory environments through a simplified single-phase reproduction of the transmission system. By normative recommendation, these single-phase test reproductions must foresee the influence of the adjacent phases of the original system through the positioning of panels acting as ground planes. Seeking to evaluate the correspondence between the critical electric field strength and the inception and extinction of visual corona voltage, as well as the distance factor for the ground planes, the article makes a case study of the positioning of these reflection planes and the arrangement mounting height. Using Finite Element Analysis, the simulation results show that the distance of the reflection planes can alter the electric field levels on the surface of conductors in the order of 18%.

**Resumo:** A conformidade técnica dos arranjos isolantes de linhas aéreas de transmissão é tradicionalmente validada por meio da realização de ensaios elétricos em laboratórios de alta tensão. Com recursos técnicos e financeiros limitados, os ensaios são realizados, em sua grande maioria, em ambientes fechados de laboratórios através de reproduções monofásicas simplificadas dos arranjos isolantes do sistema de transmissão. Por recomendação normativa, estas reproduções monofásicas de ensaio devem prever a influência das fases adjacentes do sistema original através do posicionamento de painéis atuando como planos de terra. Procurando avaliar a correspondência entre o campo elétrico crítico e a tensão de início e extinção do efeito corona visual, bem como o fator de afastamento para os planos de terra, o artigo faz um estudo de caso do posicionamento destes painéis e da altura de montagem do arranjo. Utilizando uma ferramenta de cálculo baseada no Método de Elementos Finitos, os resultados de simulação mostram que o afastamento dos painéis laterais é capaz de alterar os níveis de campo elétrico sobre a superfície de subcondutores na ordem de 18%.

**Keywords:** Finite Element Method; Hexagonal Conductors Bundle; Reflection Plane; Superficial Electric Field Strength; Visual Corona Effect.

**Palavras-chaves:** Efeito Corona Visual; Feixe Hexagonal de Subcondutores; Intensidade de Campo Elétrico Superficial; Método dos Elementos Finitos; Plano de Terra.

---

## 1. INTRODUÇÃO

As características e os requisitos técnicos específicos discriminados no Procedimento de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) definem o padrão de desempenho mínimo a ser atingido pelos empreendimentos de transmissão de alta e extra-alta tensão. De maneira abrangente, estão ali reunidos os Requisitos Elétricos, Mecânicos e Eletromecânicos da linha.

Em sua versão reestruturada, o item 3 do Submódulo 2.7 do Procedimento de Rede apresenta os Requisitos Elétricos

Mínimos das linhas aéreas em corrente alternada com classe de tensão entre 230 kV e 765 kV, além das linhas em corrente contínua e subterrâneas. Dentre os requisitos relacionados à Emissão Eletromagnética, é expresso que os cabos, acessórios e ferragens das cadeias de isoladores não devem apresentar corona visual à tensão máxima operativa em 90% do tempo (ONS, 2020).

Como importante fonte de perdas elétricas em linhas de alta e extra alta tensão, o fenômeno de corona está associado à propagação de ruídos audíveis, à emissão de ondas interferentes de alta frequência e a descargas luminosas (efeito

corona visual). Em LTs com tensão nominal de operação acima de 230 kV, as descargas elétricas parciais do efeito corona são responsáveis pelas perturbações de alta frequência, sendo um fator limitante de projeto durante a escolha econômica dos cabos condutores (Maruvada, 2000).

Por isso mesmo, a conformidade técnica dos arranjos isolantes é atestada por meio da realização de ensaios elétricos em laboratórios de alta tensão. Entre outros requisitos, verifica-se o nível de tensão, a frequência industrial, para início e extinção do fenômeno de corona visual e o valor da Tensão de Rádio Interferência (TRI), em uma frequência especificada, expressa em  $dB_{\mu V}$ . Entretanto, por limitações de recursos técnicos e financeiros, estes ensaios são realizados, em sua grande maioria, em ambientes fechados de laboratórios através de uma reprodução monofásica simplificada do sistema de transmissão. Diante da ampliação da capacidade de processamento digital, novas ferramentas de cálculo de campo para interpretação e análise dos fenômenos eletrostáticos tornam-se recursos necessários ao projeto eletromecânico de LTs.

Neste contexto, o trabalho de Olsen et al. (2018) compara os níveis de campo elétrico superficial em acessórios de arranjos isolantes para os ambientes de espaço aberto e de laboratório para verificar o grau de assertividade das reproduções laboratoriais. Os autores ressaltam que os resultados obtidos em reproduções monofásicas de ensaio podem contrastar com os valores correspondentes de campo elétrico observados em condição real de operação. Neste sentido, eles indicam não ser possível atribuir uma única tensão de ensaio que possa garantir a correspondência entre os níveis de campo elétrico superficial, para as duas condições. Os autores sugerem, portanto, uma avaliação conjunta dos resultados experimentais com aqueles obtidos em simulações computacionais.

De forma complementar, De La Hoz et al. (2020) investigam os valores da tensão de aparecimento do corona visual em conectores de subestações de alta-tensão quando submetidos aos ensaios normativos. Demonstram que o afastamento entre os objetos de ensaio, bem como as distâncias para as paredes e piso do laboratório, são capazes de promover alteração nos níveis de campo elétrico superficial da ordem de até 15 %.

O objetivo do presente trabalho é a avaliação de campos elétricos gerados por sistemas aéreos de transmissão de energia e a relação estabelecida entre campos gerados por sistemas físicos reais, cujos limites são domínios abertos, e reproduções monofásicas em ambiente fechado de laboratório.

Para tanto, a seção 2 apresenta a modelagem e a ferramenta computacional utilizada nas simulações. Para validação dos modelos propostos, os valores de campo elétrico, sejam eles calculados nas imediações das linhas de transmissão ou tomados ao longo da superfície dos condutores, são comparados com resultados publicados na literatura. Em seguida, a terceira seção deste trabalho mostra a metodologia empregada para a verificação experimental do efeito corona visual em arranjos isolantes. É nesta seção que se encontram os resultados experimentais que servirão de subsídios para as simulações numéricas. A quarta seção apresenta os estudos de

sensibilidade de uma reprodução monofásica instalada em laboratório para avaliação da influência dos planos de terra e da tensão de ensaio sobre os valores do campo elétrico na superfície dos subcondutores. O artigo finaliza ao apresentar as principais constatações e conclusões dos estudos realizados.

## 2. MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO ASSOCIADO ÀS LINHAS AÉREAS DE ENERGIA

Em função da disseminação dos recursos computacionais, os métodos numéricos permitiram o tratamento e análise dos complexos problemas de engenharia com maior nível de rigor e acurácia. Segundo Farah (2014), as técnicas numéricas de destaque são o Método dos Momentos (MoM), Método dos Elementos de Contorno (MEC), Método das Diferenças Finitas (MDF) e o Método dos Elementos Finitos (MEF).

O conceito fundamental do MEF consiste em discretizar o domínio de estudo em parcelas menores, chamadas de “elementos finitos”. Esta divisão, além de respeitar a fronteira entre diferentes meios, define o conceito de nó como sendo o vértice de um ou mais elementos (Bastos, 1996).

As duas grandezas físicas vetoriais de interesse imediato no estudo da Eletrostática são a Intensidade de Campo Elétrico,  $\mathbf{E}$ , e a Densidade de Fluxo Elétrico,  $\mathbf{D}$ , ambas inseridas no contexto da Lei de Faraday e da Lei de Gauss. A solução de problemas de campos eletrostáticos é simplificada pelo uso do conceito matemático do Potencial Escalar Elétrico. A partir de uma distribuição de cargas, é possível associar uma função escalar,  $\varphi$ , para o potencial elétrico desta distribuição, e então, calcular a Intensidade de Campo Elétrico. Na eletrostática, é possível mostrar (Bastos, 1996) que um campo elétrico conservativo,  $\mathbf{E}$ , associa-se ao campo gradiente de uma função escalar,  $\varphi$ , através da relação vetorial da Eq. (1):

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi \quad (1)$$

Onde o operador vetorial  $\nabla$  é definido, em coordenadas retangulares, por:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{a}_x + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{a}_y + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{a}_z \quad (2)$$

A Fig. 1 apresenta um domínio genérico de estudo com dois meios distintos no qual foi discretizado para aplicação do MEF. Assumindo que a variável de interesse seja o Potencial Escalar Elétrico no domínio de estudo, no interior do elemento triangular, a variação de  $\varphi$  assume o caráter linear (Bastos, 1996).

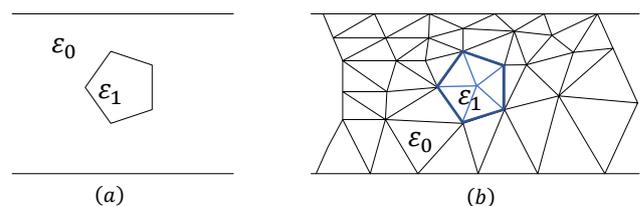


Fig. 1. Domínio de estudo (a) e Domínio discretizado (b). Adaptado de Bastos (1996).

Utilizando o módulo AC/DC do pacote computacional *COMSOL Multiphysics*<sup>®</sup> (COMSOL, 2014), é possível calcular a Intensidade do Campo Elétrico associado a um sistema aéreo de transmissão de energia trifásico, em corrente alternada.

A primeira etapa de elaboração do programa é, comumente, designada por pré-processamento. Nesta fase, o usuário fornece os elementos gráficos e geométricos do domínio, define as condições de contorno e as fontes de excitação. Ainda nesta etapa, é necessário discretizar o domínio por meio da geração automática de malhas. Uma vez realizada a discretização do domínio de estudo, solicita-se ao programa o cálculo, onde se obtém a avaliação da equação diferencial considerando as condições iniciais fornecidas. Este processo é descrito como fase de processamento. A etapa final de pós-processamento é responsável pela análise dos resultados, tanto sob a forma visual, traçado de curvas equipotenciais e dos gráficos de densidade, como a forma numérica (Farah, 2014).

### 2.1 Intensidade do Campo Elétrico nas imediações de uma Linha Aérea de Transmissão

Considerando a linha de transmissão de 500 kV indicada na Fig. 2, é possível comparar os resultados de medição de Guimarães (2005) com os resultados de uma simulação computacional em domínio bidimensional.

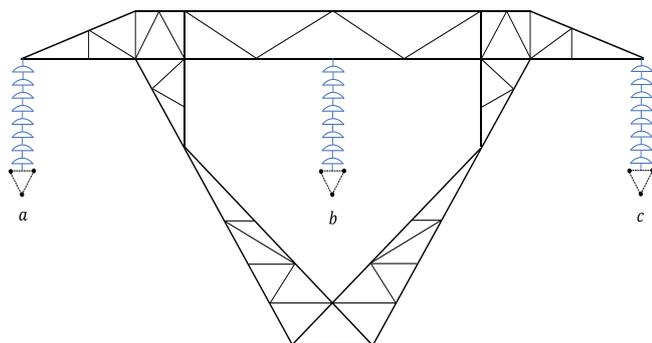


Fig. 2. LT de 500 kV com disposição horizontal das fases e agrupamento triangular dos subcondutores (Guimarães, 2005).

As características principais da LT 500 kV estão indicadas na Tabela 1.

**Tabela 1. Características da LT 500 kV**

Tensão média de operação ( $kV_{rms}$ )	545
Diâmetro do Condutor (mm)	28,74
Espaçamento do feixe (mm)	457
Distância horizontal entre fases (m)	12
Altura média dos condutores (m)	11

Para fins de simplificação de cálculo, o modelo bidimensional assume condutores cilíndricos e paralelos ao plano do solo. Desprezou-se os efeitos de distorções de campos ao se considerar os condutores tomados no meio do vão, com altura média indicada na Tabela 1. Além disso, o solo é considerando

condutor perfeito. A Fig. 3 apresenta os resultados de simulação para o perfil transversal do módulo do campo elétrico calculado ao nível de 1 m acima do solo.

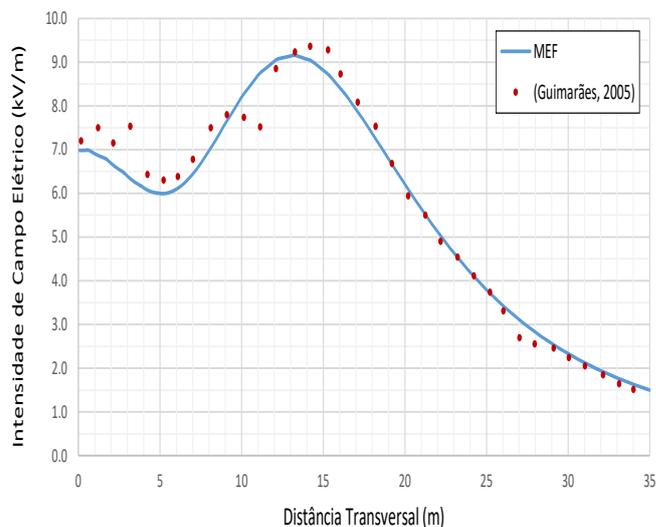


Fig. 3. Perfil transversal da Intensidade de Campo Elétrico nas imediações da LT 500 kV, ao nível de 1m acima do solo.

### 2.2 Intensidade Máxima do Campo Elétrico na Superfície de Condutores

O cálculo da Intensidade do Campo Elétrico na superfície de um condutor pode ser realizado, analiticamente, pelo Método da Lei dos Cossenos e pelo Método das Imagens Sucessivas. (Paganotti, 2012).

A Fig. 4 apresenta o perfil construtivo de um sistema de transmissão aérea de 500 kV, com feixe de cinco condutores de diâmetro  $d_c = 27,8 \text{ mm}$ . (Gomes Jr., 1995), (Paganotti, 2012).

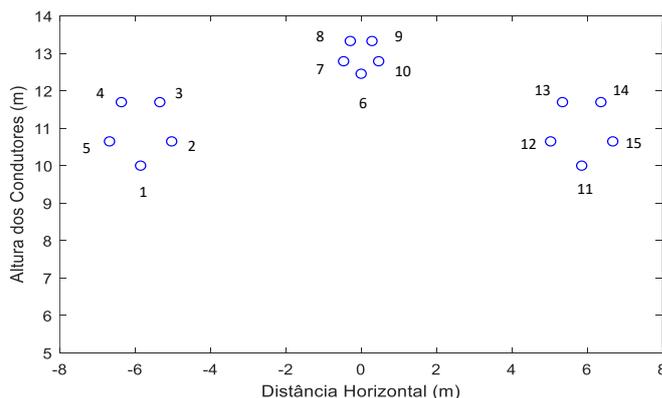


Fig. 4. Configuração geométrica da LT 500 kV de cinco condutores. (Gomes Jr., 1995) citado por (Paganotti, 2012).

A Fig. 5 compara os resultados de simulação utilizando o módulo AC/DC do Comsol<sup>®</sup> (MEF) com os resultados pelo Método das Imagens Sucessivas (MIS) disponíveis no trabalho de (Paganotti, 2012). A comparação está expressa em termos dos valores máximos de campo elétrico sobre a superfície dos subcondutores.

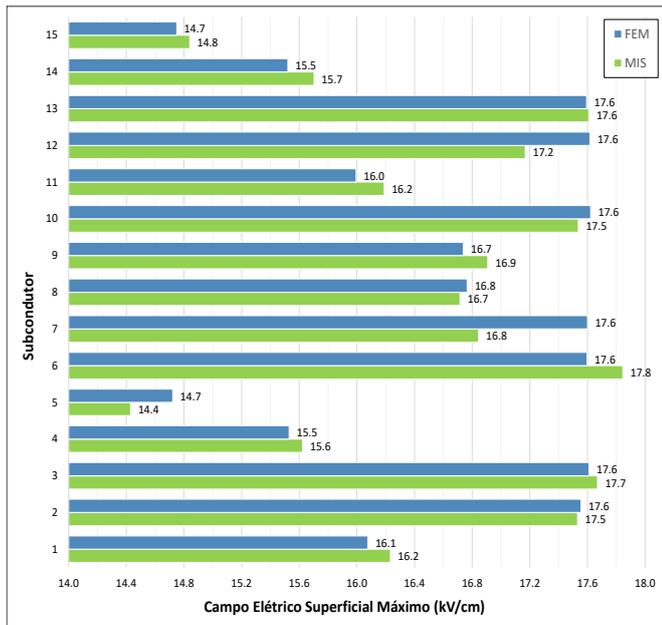


Fig. 5. Campo Elétrico Superficial Máximo dos subcondutores do da LT 500 kV de cinco condutores.

Os resultados apresentados na Fig. 3 e na Fig. 5 mostram a validade do modelo implementado em MEF para uma adequada avaliação dos níveis de campo elétrico associados a um sistema aéreo de transmissão de energia. Por um único modelo, foi possível calcular tanto o campo nas imediações da LT, a uma altura do nível do solo e ao longo da faixa de passagem, bem como o campo elétrico máximo na superfície de seus subcondutores.

### 3. EFEITO CORONA EM SISTEMAS AÉREOS DE TRANSMISSÃO

Durante a operação das linhas aéreas, os seus arranjos ficam submetidos aos mais diversos fenômenos elétricos, mecânicos e ambientais. Dentre eles, destaca-se o efeito corona.

O efeito corona é explicado como o processo de ionização e ruptura parcial da camada de ar provocado pela acentuação do gradiente de potencial elétrico sobre a superfície dos condutores e acessórios das LTs. Este fenômeno é capaz de induzir, ao longo da superfície dos condutores, pulsos de correntes de curta duração e elevados tempos de subida (Maruvada, 2000).

A metodologia empírica de Peek para estimação da formação dos eflúvios de corona associa o nível do campo elétrico próximo à superfície do condutor à condição de início do efeito corona visual. Utilizando arranjos específicos de cilindros coaxiais e condutores paralelos, estima-se a intensidade máxima do campo no início das descargas visuais de corona. Peek concluiu que o fenômeno das descargas de corona, juntamente com as manifestações luminosas, se iniciava somente para valores de gradientes mais elevados nas superfícies dos condutores, o que designou por gradiente crítico visual,  $E_{CR}$  (Gomber, Deno e Zaffanella, 1982).

Fuchs (2015) indica que o gradiente crítico disruptivo do ar atmosférico é da ordem de 30,5 kV/cm, em atmosfera-padrão

de 20 °C e pressão barométrica de 760 mmHg. Em corrente alternada, o valor eficaz do gradiente disruptivo é aproximadamente igual a  $E_{CR} = 21,6 \text{ kV/cm}$ .

#### 3.1 Verificação Experimental do Efeito Corona Visual em Arranjos Isolantes

A conformidade técnica dos arranjos isolantes de LTs é tradicionalmente atestada por meio da realização de ensaios elétricos em laboratórios de alta tensão. Com a baixa disponibilidade de laboratórios para atendimento do mercado industrial, os ensaios são particularmente dispendiosos e com limitação de agenda. As dificuldades acentuam-se quando da necessidade de repetição de testes decorrentes de uma reprovação ou para implementação de melhorias no projeto.

O procedimento normativo para execução do Ensaio de Corona Visual pelo Método da Tensão Determinada está indicado na IEC 61824 (1997). Em termos gerais, o ensaio consiste em uma reprodução monofásica do sistema de transmissão em escala real para aplicação do valor de tensão à frequência industrial e determinação dos valores de início e extinção do efeito corona visual sobre o conjunto de ferragens e isoladores. As condições de serviço são simuladas por réplicas das estruturas suportes e pela adoção de painéis aterrados para representação do efeito de blindagem das fases adjacentes do sistema original.

#### 3.2 Representação Monofásica do Sistema de Transmissão com Condutores Adjacentes

Em um sistema de transmissão trifásico com disposição geométrica de fases adjacentes, o arranjo monofásico de ensaio, reproduzido em ambiente de laboratório, deve incorporar o efeito dos condutores destas fases adjacentes. Por recomendação da IEC 61824 (1997), este efeito de blindagem é simulado por meio da instalação de painéis laterais aterrados com afastamento,  $w$ , conforme Eq. (3):

$$w = 0,7 \cdot d \quad (3)$$

onde  $d$  é a distância horizontal entre dois subcondutores de fases adjacentes.

Pelas limitações físicas dos salões de ensaio, a norma também recomenda a altura do objeto de ensaio,  $h$ , em relação ao solo. No nível de transmissão de 500 kV, os arranjos são tradicionalmente ensaiados considerando  $h = 6 \text{ m}$ .

A Fig. 6 (a) apresenta um sistema de transmissão trifásico de 500 kV, considerando feixe hexagonal de condutores com 600 mm e espaçamento entre fases de 6.175 mm. A Fig. 6 (b) apresenta o diagrama esquemático da reprodução monofásica de sua fase central, com as distâncias para os planos de terra indicadas. Pela Fig. 6 (a), a distância horizontal,  $d$ , e o afastamento dos painéis de simulação,  $w$ , são calculados como:

$$\begin{aligned} d &= 6,18 - 0,60 = 5,58 \text{ m} \\ w &= 3,9 \text{ m} \end{aligned} \quad (4)$$

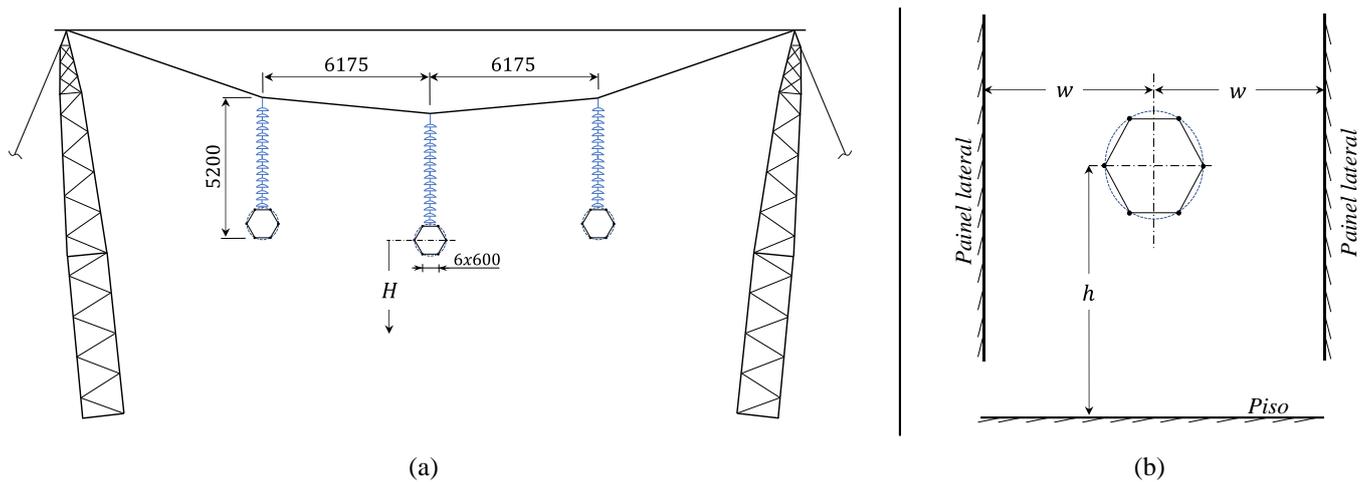


Fig. 6. (a) Arranjo trifásico do sistema de transmissão 500 kV (Distâncias em milímetros); (b) Arranjo monofásico de ensaio.

### 3.3 Resultados Experimentais

Uma reprodução monofásica da fase central do sistema aéreo de transmissão da Fig. 6 (a) foi submetida ao ensaio de Corona Visual considerando a simulação do efeito de proximidade das fases adjacentes segundo IEC 61824 (1997). Conforme indicado na Fig. 7, esta reprodução contou com os protótipos em escala real dos conjuntos de ferragens e isoladores da linha de transmissão e foram instalados em ambiente fechado de laboratório.

O feixe de condutores foi simulado utilizando tubos de alumínio com comprimento total de 12 m, diâmetro externo de 30 mm com o arranjo posicionado a uma altura de  $h = 6,5 \text{ m}$ , em relação ao piso do laboratório. Os planos laterais foram simulados por quadros retangulares de alumínio de dimensões de 12 x 2 m, aterrados em suas extremidades, e afastamento  $w = 3,9 \text{ m}$ .

Os requisitos de especificação técnica estabelecem que o objeto sob ensaio não deve apresentar o fenômeno de corona visual para uma tensão predeterminada. Este valor de tensão é denominado por tensão de ensaio. Tradicionalmente, as especificações técnicas de fornecimento dos arranjos de isoladores utilizados em LTs de 500 kV indicam uma tensão de ensaio de  $v = 335 \text{ kV}_{rms}$ , fase-terra.

O ensaio continua com a tensão sendo elevada até que o fenômeno do corona torne-se visível. Esse valor é anotado como a tensão de início do corona visual. Em seguida, a tensão é reduzida até que o fenômeno não seja mais visível a olho nu. Este valor é, então, anotado como a tensão de extinção do corona visual. Os resultados do Ensaio de Corona Visual do arranjo estão indicados na Tabela 2.

**Tabela 2. Resultados Experimentais do Ensaio de Corona Visual do Arranjo de 500 kV (CEB, 2014)**

Tensão Aplicada (fase-terra)	Resultado
$v_1 = 335 \text{ kV}_{rms}$	Sem Corona Positivo
$v_2 = 396 \text{ kV}_{rms}$	Extinção do Corona Positivo
$v_3 = 404 \text{ kV}_{rms}$	Aparição do Corona Positivo

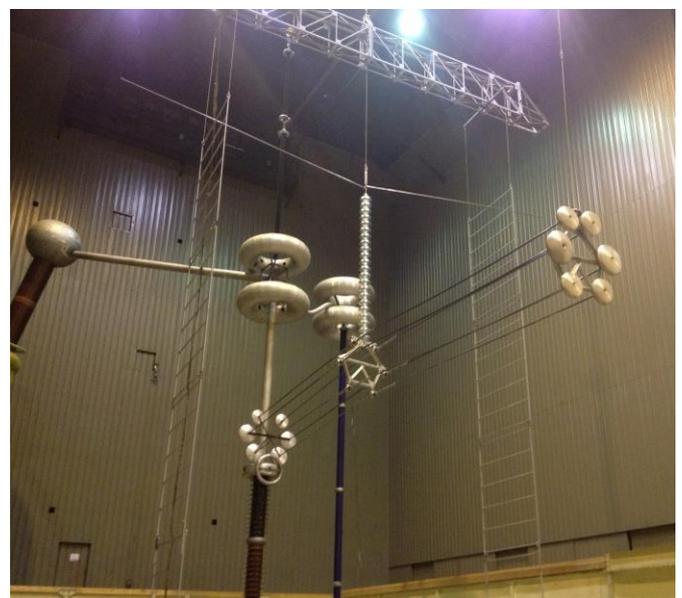


Fig. 7. Reprodução monofásica da fase central de 500 kV para ensaio de Corona Visual.

### 4. SIMULAÇÕES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Considerando o sistema de transmissão da Fig. 6 (a) instalado em condições normais de operação, em espaço aberto de campo, os valores máximos de campo elétrico sobre a superfície dos subcondutores da fase central são avaliados. Para fins de simplificação, os condutores foram tomados no meio do vão e desconsiderando os efeitos de proximidade das estruturas metálicas, isoladores e acessórios de fixação.

A Fig. 8 (a) apresenta a distribuição espacial do campo elétrico nas imediações dos subcondutores do sistema trifásico, em condições nominais de operação, tensão nominal de 500  $\text{kV}_{rms}$  e o feixe central a uma altura média de 27 m acima do solo. A Fig. 8 (b) apresenta os valores máximos de campo sob a superfície dos subcondutores da fase central. Por simetria, os níveis de campo dos subcondutores no. 1, no. 2 e no. 3 são equivalentes aos subcondutores no. 6, No. 5 e no. 4, respectivamente.

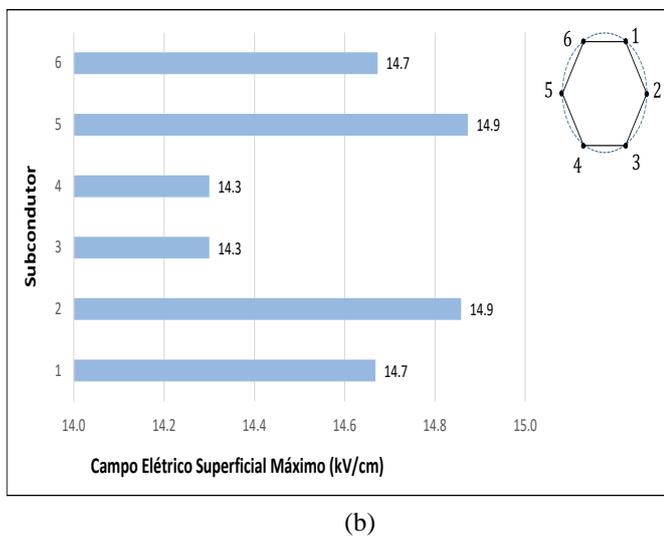
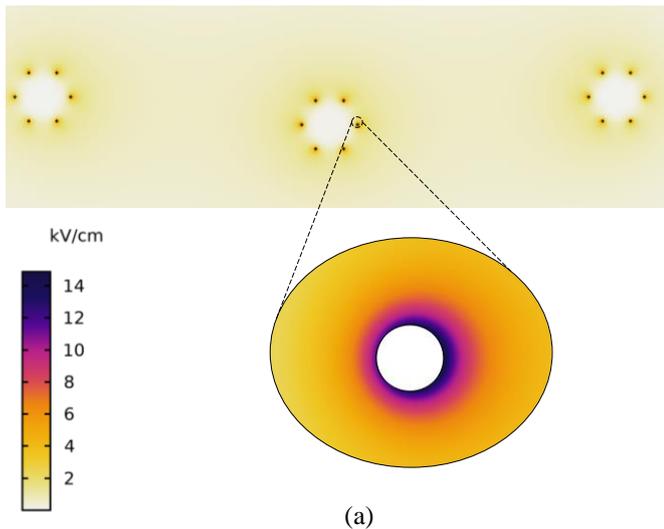


Fig. 8 (a) Mapa de cores da Intensidade de Campo Elétrico do sistema de transmissão trifásico, em condições normais de operação. (b) Valores Máximos de campo elétrico superficial sob os subcondutores da fase central.

Considerando o sistema trifásico operando em espaço aberto de campo, o valor máximo do campo elétrico obtido em simulação foi  $|\vec{E}_{max}| = 14,9 \text{ kV/cm}$ , localizado na superfície externa dos subcondutores no. 2 e no. 5 da fase central.

Uma vez obtido na condição trifásica de operação, este valor é tomado como referência para fins de comparação com os estudos de sensibilidade da reprodução monofásica instalada em laboratório durante a realização do ensaio de corona visual.

#### 4.1 Campo Elétrico Superficial sob os subcondutores durante o Ensaio de Corona Visual

Este tópico procura indicar correspondência do campo elétrico na superfície dos subcondutores entre o arranjo trifásico e sua respectiva reprodução monofásica de ensaio. Para isso, recorre-se aos resultados experimentais e utiliza-se os valores de tensão indicados na Tabela 2 para subsidiar as simulações computacionais.

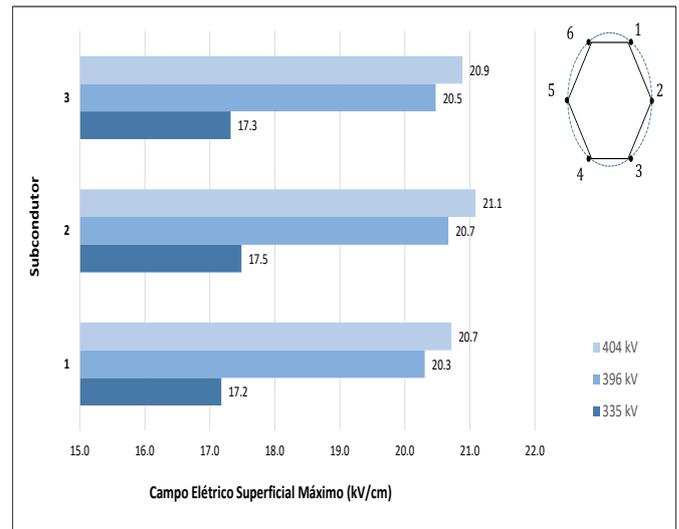


Fig. 9. Intensidade máxima de campo elétrico superficial nos subcondutores do arranjo monofásico durante o ensaio de Corona Visual.

Os valores máximos de campo elétrico, obtidos em simulação, considerando a disposição geométrica do arranjo monofásico e os níveis de tensão dos resultados experimentais estão indicados na Fig. 9.

A Tabela 3 apresenta a correspondência da intensidade de campo elétrico na superfície dos subcondutores do feixe central sistema trifásico operando no domínio aberto, com nível de tensão  $v_{FF} = 500 \text{ kV}_{rms}$ , para com os valores do arranjo monofásico, submetido à tensão de ensaio de com nível de tensão  $v_{FT} = 335 \text{ kV}_{rms}$ .

**Tabela 3. Intensidade Máxima de Campo Elétrico em Função da Condição de Serviço**

	$E_{Subc. 1}$	$E_{Subc. 2}$	$E_{Subc. 3}$
Sistema 3 $\phi$ em espaço aberto	14,7 kV/cm	14,9 kV/cm	14,3 kV/cm
Reprodução 1 $\phi$ de ensaio	17,2 kV/cm	17,5 kV/cm	17,3 kV/cm
Variação	17,1 %	17,7 %	21,4 %

O fator preponderante para a variação percentual observada nos valores de campo elétrico nas superfícies dos subcondutores está associado ao valor da tensão de ensaio aplicada ao arranjo monofásico: o valor eficaz fase-terra  $v_1 = 335 \text{ kV}_{rms}$ , quando convertido para valor eficaz fase-fase, corresponde a 116% da tensão nominal de operação da LT.

#### 4.2 Sensibilidade da Reprodução Monofásica em função da altura do arranjo, h

Para o arranjo monofásico da Fig. 7 submetido à tensão de ensaio  $v_1 = 335 \text{ kV}_{rms}$ , os valores máximos de campo elétrico nas superfícies dos subcondutores, em função da altura de instalação do arranjo,  $h$ , estão indicados na Fig. 10. Esta condição considerou os painéis laterais fixos a uma distância  $w = 3,9 \text{ m}$ .

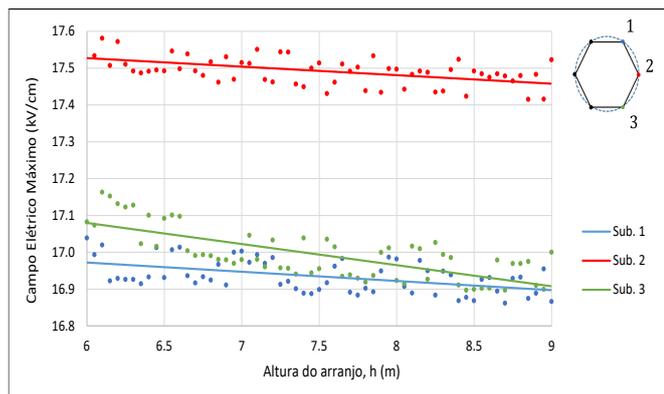


Fig. 10. Intensidade máxima de campo elétrico superficial nos subcondutores do arranjo monofásico em função da altura de instalação,  $h$ , em relação ao nível do piso.

Pelos resultados indicados no gráfico da Fig. 10, identifica-se uma pequena variação do campo elétrico superficial máximo para variação da altura de instalação do arranjo. Considerando a faixa de elevação de 3 m do arranjo, a redução máxima observada para o campo elétrico foi de 1,6 % para o subcondutor mais próximo do solo. Os demais resultados estão indicados na Tabela 4.

**Tabela 4. Intensidade Máxima de Campo Elétrico em Função da Altura do Arranjo,  $h$**

	$E_{Subc. 1}$	$E_{Subc. 2}$	$E_{Subc. 3}$
$h_{min} = 6 \text{ m}$	17,0 kV/cm	17,6 kV/cm	17,2 kV/cm
$h_{max} = 9 \text{ m}$	16,9 kV/cm	17,4 kV/cm	16,9 kV/cm
<i>Variação</i>	1,0 %	1,1 %	1,6 %

#### 4.3 Sensibilidade da Reprodução Monofásica em função do afastamento dos painéis laterais, $w$

Para o arranjo monofásico da Fig. 7 submetido à tensão de ensaio  $v_1 = 335 \text{ kV}_{rms}$ , os valores máximos de campo elétrico nas superfícies dos subcondutores, em função do afastamento dos painéis laterais,  $w$ , estão indicados na Fig. 11. Esta condição considerou a altura, em relação ao piso, fixa e igual a  $h = 6,5 \text{ m}$ .

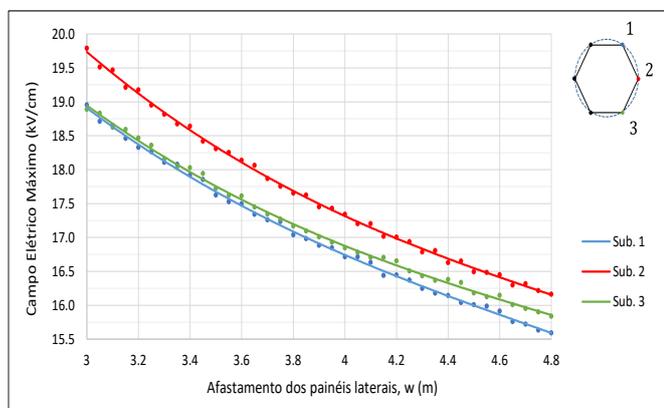


Fig. 11. Intensidade máxima de campo elétrico superficial no subcondutor no. 2 do arranjo monofásico, em função do afastamento dos painéis laterais,  $w$ .

Por ela, verifica-se uma maior sensibilidade dos valores de campo elétrico para variações do afastamento dos painéis laterais, quando se compara com as variações de altura. Tomando como referência o valor de campo para  $w = 3,0 \text{ m}$ , uma variação no afastamento de  $\delta w = 1,8 \text{ m}$  é capaz de atenuar o campo elétrico sob a superfície do subcondutor no. 2 na ordem de 18 %. Estes resultados estão resumidos na Tabela 5.

**Tabela 5. Intensidade Máxima de Campo Elétrico em Função do Afastamento dos Painéis Laterais,  $w$**

	$E_{Subc. 1}$	$E_{Subc. 2}$	$E_{Subc. 3}$
$w_{min} = 3,0 \text{ m}$	19,0 kV/cm	19,8 kV/cm	18,9 kV/cm
$w_{max} = 4,8 \text{ m}$	15,6 kV/cm	16,2 kV/cm	15,8 kV/cm
<i>Variação</i>	17,7 %	18,3 %	16,2 %

#### 4.4 Sensibilidade da Reprodução Monofásica em função da tensão de ensaio, $v_n$

Para o arranjo monofásico, os valores máximos de campo elétrico na superfície do subcondutor no. 2, em função da tensão de ensaio aplicada,  $v_n$ , estão indicados na Fig. 12. Esta condição manteve inalterados os valores de  $h$  e  $w$ . Estes resultados estão resumidos na Tabela 6.

**Tabela 6. Intensidade Máxima de Campo Elétrico em Função da Tensão de Ensaio,  $v_n$**

	$E_{Subc. 1}$	$E_{Subc. 2}$	$E_{Subc. 3}$
$v_{min} = 280 \text{ kV}$	17,7 kV/cm	18,3 kV/cm	17,9 kV/cm
$v_{max} = 404 \text{ kV}$	14,1 kV/cm	14,6 kV/cm	14,2 kV/cm
<i>Variação</i>	20,5 %	20,5 %	20,5 %

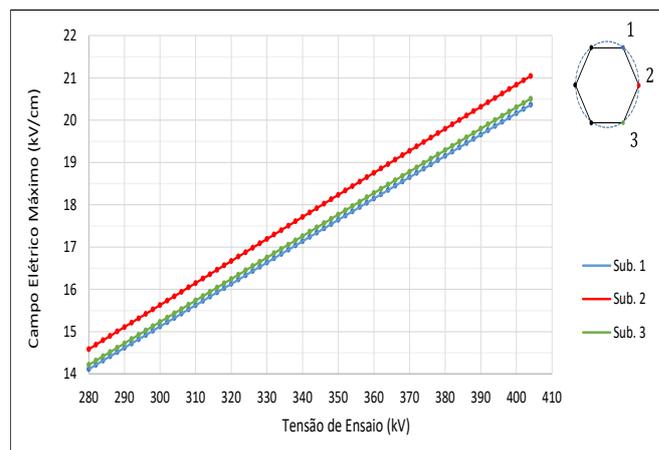


Fig. 12. Intensidade máxima de campo elétrico superficial sob o subcondutor no. 2 do arranjo monofásico, em função do nível de tensão de ensaio,  $v_n$ .

Associando os resultados indicados na Fig. 8 e Fig. 12, é possível estabelecer os valores das tensões de ensaio necessárias para se obter uma melhor correspondência entre os níveis de campo elétrico na superfície dos subcondutores considerando as duas condições de serviço. Estes resultados estão indicados na Tabela 7.

**Tabela 7. Tensão de Ensaio Necessária para Melhor Correspondência entre os Níveis de Campo Elétrico**

	$E_{3\phi}$	$v_{ensaio}$
Subcondutor 1	14,7 kV/cm	292 kV
Subcondutor 2	14,9 kV/cm	286 kV
Subcondutor 3	14,3 kV/cm	282 kV

Os resultados da Tabela 7 reforçam a argumentação inicial de Olsen et al. (2018), uma vez que cada subcondutor do feixe central, da configuração trifásica, exige uma tensão de ensaio distinta para garantia da correspondência entre os níveis de campo elétrico máximo em sua superfície.

## 5. CONCLUSÕES

O artigo avaliou os níveis de campo elétrico na superfície dos subcondutores de uma reprodução monofásica, instalada em ambiente de laboratório durante o ensaio de corona visual. Com base nos diferentes resultados de simulação, avaliou-se a correspondência entre o campo elétrico na superfície dos subcondutores com as respectivas tensões de início e extinção do efeito corona visual ensaio, obtidas experimentalmente.

Verificou-se, portanto, uma maior sensibilidade dos valores de campo elétrico máximo quando se promoveu o afastamento dos painéis laterais, em comparação com a variação da altura do arranjo. Os resultados de simulação mostraram que o afastamento dos painéis altera os níveis de campo elétrico sobre a superfície de subcondutores em até 18 %, enquanto a variação de altura produz variações inferiores a 2 %.

O artigo também mostrou que a tensão de ensaio, tradicionalmente especificada verificação experimental do corona visual, de arranjos de transmissão de 500 kV submete os subcondutores do arranjo monofásico a valores de campo elétrico 17% superiores àqueles verificados para uma condição trifásica de operação, em regime nominal.

Adotando-se um arranjo monofásico com fator de afastamento proposto pela IEC 61824 (1997) e uma tensão de ensaio de valor correspondente ao valor nominal de operação da LT, o trabalho mostrou ser possível reproduzir, a níveis satisfatórios, os valores de campo elétrico encontrados nas superfícies dos subcondutores do arranjo trifásico original. Todavia, não é possível atribuir uma única tensão de ensaio capaz de garantir a correspondência entre os níveis de campo elétrico na superfície de todos os subcondutores do feixe.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES – Brasil.

O presente trabalho contou com o acervo técnico disponível na SAE Towers Brasil Torres de Transmissão Ltda.

## REFERÊNCIAS

- Bastos, J.P.A. (1996). *Eletromagnetismo e Cálculo de Campos*. 3.ed. revisada, Editora da UFSC, Florianópolis.
- CEB (2014). *RIV/Corona and Voltage Distribution Tests for 500 kV Line Test Report N° 1768-14*. Bazet High-Voltage Laboratory (CEB). Bazet, France.
- COMSOL (2014). *AC/DC Module User's Guide*. COMSOL Multiphysics® v. 4.4. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
- De La Hoz, M., Etxegarai, A., Larrea, A.M., Mazon, A. J., Zorrozuza, M.A. (2020). Impact assessment of clearance in corona testing for a high-voltage substation connector set using FEM. *IET Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 14, Iss. 18, pp. 3710-3718.
- Farah, A.A.M. (2014). *Cálculo de Campos Elétricos e Magnéticos em Linhas de Transmissão pelo Método dos Elementos Finitos*. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Associação ampla entre CEFET-MG e UFSJ, Belo Horizonte.
- Fuchs, R.D. (2015). *Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas*: 3. ed. rev. e ampl. EDUFU, Uberlândia. 2v.
- Gomber, M.G., Deno, D.W., Zaffanella, L. E. (1982). *Corona Phenomena on AC Transmission Lines*. Chapter 4. *Transmission Line Reference Book: 345 kV and above*. 2. ed. EPRI, Palo Alto, California.
- Gomes Jr., S. (1995). *Otimização de Linhas Aéreas de Transmissão considerando Novas Concepções Construtivas para os Feixes de Condutores*. Dissertação (Mestrado), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – UFRJ, Rio de Janeiro.
- Guimarães, G.E. (2005). *Medições e Cálculos de Campos Elétricos e Magnéticos de uma Linha de Transmissão de 500 kV*. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – UFMG, Belo Horizonte.
- IEC 61824 (1997). *Linhas Aéreas: Requisitos e Testes de Ferragens*. International Electrotechnical Commission, Geneva.
- Maruvada, P.S. (2000). *Corona Performance of High-voltage Transmission Lines*. Research Studies Press, New York.
- Olsen, R.G., Tuominen, M.W. and Leman, J.T. (2018). On Corona Testing of High-Voltage Hardware Using Laboratory Testing and/or Simulation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33 (no. 4), pp. 1707-1715.
- ONS (2020). *Procedimentos de Rede, Módulo 2 – Critérios e Requisitos, Submódulo 2.7: Requisitos mínimos para linhas de transmissão*. Revisão 2020.12. ONS, Brasília.
- Paganotti, A.L. (2012). *Cálculo e Minimização de Campo Elétrico de Linhas de Transmissão*. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Associação ampla entre CEFET-MG e UFSJ, Belo Horizonte.