



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

GCQ 16
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

GRUPO XIII

GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA – GCQ

METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO EFEITO CORONA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO: MODELAGEM COMPUTACIONAL E ESTUDO EXPERIMENTAL

Gernan Edson Guimarães *
Edino Barbosa Giudice Filho

Ivan José da Silva Lopes
Wallace do Couto Boaventura
Vinícius Cordeiro Durães Araújo

Elson José da Silva
Hugo Bicalho da Silva Cruz
Daniel Pimenta Guimarães

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

RESUMO

O presente trabalho é resultado de um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento realizado pela Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG em parceria com a Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, gerenciado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, cujo objetivo é desenvolver e validar, por meio de experimentos laboratoriais, uma metodologia computacional para a avaliação do efeito corona sobre condutores e isolantes em estruturas típicas de transmissão e distribuição. São apresentados resultados de ensaios de corona visual realizados no âmbito do projeto e um estudo baseado nos valores de campo elétrico máximo obtidos nas simulações computacionais dos arranjos ensaiados. A partir deste estudo, são propostos critérios que auxiliam a decisão de alocação de dispositivos anti-corona em arranjos tomando-se como referência a probabilidade de ocorrência de corona a uma dada tensão considerada.

PALAVRAS-CHAVE

Subestação, linha de transmissão, alta tensão, campo elétrico, efeito corona, cálculo de campo.

1.0 - INTRODUÇÃO

O efeito corona e o conseqüente aparecimento de tensão de rádio-interferência gerada em sistemas de alta e extra-alta tensão é um problema a ser considerado nas etapas de projeto e fabricação de ferragens das estruturas de linhas de transmissão e subestações. É importante que se tenha um conhecimento bem fundamentado sobre sua ocorrência tanto na vizinhança de ferragens e condutores, como na vizinhança de estruturas isolantes do sistema. A investigação do efeito corona é feita basicamente através de estudos experimentais em laboratório e por meio de simulações computacionais envolvendo o cálculo de campo elétrico.

A experiência operativa mostra que, sob certas circunstâncias, o efeito corona pode reduzir a vida útil do isolamento de equipamentos, além de causar sérias interferências em sistemas de medição, controle e comunicação [1,2]. Portanto, o efeito corona pode ser visto como um fator de preocupação podendo levar a prejuízos econômicos relacionados a reparos e substituições prematuras de equipamentos, redução na segurança e eficiência dos sistemas de comunicação, e grandes prejuízos causados pela eventual interrupção dos serviços de transmissão de energia ou falha de equipamentos.

O presente trabalho é resultado de um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento realizado pela Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG em parceria com a Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, gerenciado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, cujo objetivo é desenvolver e validar, por meio de experimentos laboratoriais, uma metodologia computacional para a avaliação do efeito corona sobre condutores e isolantes em estruturas típicas de transmissão e distribuição [3].

O artigo apresenta inicialmente a metodologia e as características de um programa computacional desenvolvido, ressaltando os seus aspectos mais relevantes. Em seguida é apresentado um exemplo de utilização do programa realizando estudos de aplicação de anéis anti-corona na ancoragem de uma LT de 500kV ao pórtico de uma SE da CEMIG.

Na seqüência, são apresentados resultados de ensaios de corona visual realizados no âmbito do projeto. São mostrados valores de potencial e campo elétrico referentes ao aparecimento do corona negativo e positivo, além dos potenciais referentes à extinção do corona positivo e do corona negativo.

Finalizando, é apresentado um estudo com base nos valores obtidos nos ensaios de corona visual, contendo critérios que auxiliam a decisão de alocação de dispositivos anti-corona em arranjos. A metodologia proposta consiste em dar um tratamento estatístico aos resultados das simulações dos ensaios de corona visual. A partir deste tratamento, pode-se associar aos níveis de campo obtidos nas simulações, uma probabilidade de ocorrência de corona à tensão considerada.

2.0 - METODOLOGIA COMPUTACIONAL

Os valores críticos de campo elétrico em um determinado arranjo estão entre os principais parâmetros usados na predição do fenômeno de corona. Por isso, a determinação desses valores, bem como, as regiões onde estes valores ocorrem é fundamental para uma estimativa do surgimento de corona. Na literatura, várias técnicas numéricas têm sido aplicadas no cálculo de campos eletrostáticos. Dependendo da aplicação, cada técnica numérica possui vantagens e desvantagens. No projeto desenvolvido, o método de elementos finitos (MEF) foi utilizado para calcular a distribuição de campo elétrico e do potencial próximo às estruturas. A grande vantagem do MEF, na investigação do surgimento de corona, é a flexibilidade que o método oferece no que diz respeito ao refinamento local da solução [4, 5].

As geometrias dos eletrodos encontrados na prática ou em condições experimentais de laboratório apresentam geometrias tão complicadas que, mesmo com os recursos computacionais atuais, é muito difícil levar em conta todos os seus detalhes no cálculo. Por isso, simplificações são quase sempre necessárias para se obter resultados em tempos computacionais viáveis. Sem dúvida, a simplificação mais importante é a redução da dimensão espacial do problema através de simetrias. Por exemplo, a distribuição de potencial próxima a uma cadeia de isoladores, pode ser resolvida como um problema bidimensional utilizando simetria axial.

Neste artigo, as simulações computacionais foram feitas utilizando-se o CoroFEM, software desenvolvido durante o projeto, baseado no MEF em 2D. O CoroFEM foi utilizado para a análise numérica tanto no exemplo a seguir, que se trata de uma estrutura de 500kV, quanto nos casos de ensaios de corona visual apresentados no item 3.

2.1 Exemplo da utilização do CoroFEM – estrutura de 500kV

Nesta análise, utilizando o software desenvolvido, foi feito um estudo da Subestação (SE) Itajubá 3 que é alimentada pelo seccionamento da LT Poços de Caldas – Cachoeira Paulista de 500 kV, dando origem a duas novas LT's: Poços de Caldas – Itajubá 3 e Itajubá 3 – Cachoeira Paulista, sendo as derivações e SE de propriedade da CEMIG. Após a energização das LT's, foi constatada a presença de ruído, característico do fenômeno corona, em pontos localizados próximos ao encabeçamento das LT's no pórtico da SE. Esse fato demandou uma inspeção detalhada pelas equipes de projeto e manutenção de linhas de transmissão e subestações da CEMIG e um trabalho experimental de modo a solucionar o problema.

2.1.1 Investigação experimental em laboratório

Após definição e confecção dos novos anéis anti-corona, foram realizados ensaios laboratoriais de corona visual para garantia da sua eficiência, tendo em vista a dificuldade de intervenção na LT em operação. Os ensaios foram contratados junto ao Centro de Pesquisa em Engenharia Elétrica (CEPEL). Os ensaios foram realizados em 3 etapas assim divididas:

1. Arranjo original da SE com inserção de esferas anti-corona nas sapatas dos grampos de ancoragem;
2. Arranjo modificado com novos anéis anti-corona e sem as esferas anti-corona nas sapatas dos grampos de ancoragem;
3. Arranjo com novos anéis anti-corona e com as esferas anti-corona nas sapatas dos grampos de ancoragem;

Durante os ensaios, foi adotado como valor mínimo aceitável para a tensão de início de corona visual 350kV, o que corresponde à tensão máxima de operação fase-terra do sistema acrescida de 10%. Os resultados dos ensaios da 1ª etapa mostraram que, com a inserção das esferas anti-corona, houve uma redução significativa da intensidade do fenômeno. Entretanto, a tensão de início de corona ficou abaixo dos 350 kV e esta alternativa não atendeu ao critério adotado. Na 2ª etapa, foram utilizados os novos anéis anti-corona sem as esferas nas sapatas dos grampos de ancoragem. Os resultados obtidos foram melhores que os da 1ª etapa, e o início do corona

ocorreu em 347 kV, já no limiar do valor especificado. Na 3ª Etapa, o arranjo completo formado pelos novos anéis e as esferas anti-corona foi ensaiado e o início do corona se deu em 382kV.

Considerando os resultados da 3ª etapa satisfatórios, os arranjos com os novos anéis e esferas anti-corona foram então instalados na ancoragem da LT Poços de Caldas – Itajubá 3 ao pórtico da SE Itajubá 3. Novas inspeções foram realizadas, sendo constatada a eficiência do novo arranjo com a eliminação do corona visual e ruído audível nos níveis de tensão de operação do sistema.

2.1.2 Modelagem computacional e resultados

Para uma análise inicial foi feita uma simulação do arranjo original da SE, conforme Figura 1 (a). Com o intuito de diminuir a magnitude de campo elétrico na região próxima às sapatas dos grampos de ancoragem, foram acrescentadas à configuração inicial esferas anti-corona envolvendo as sapatas. O arranjo completo simulado, 3ª etapa da investigação experimental, encontra-se representado na Figura 1 (c). Não foram incluídas nesta modelagem as esferas anti-corona instaladas nas sapatas por causa do corte de simetria utilizado, que as coloca numa região blindada pelo novo anel anti-corona.

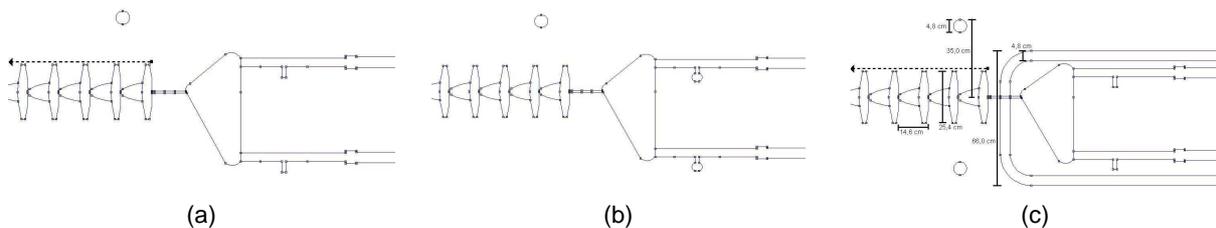


FIGURA 1 – Modelagem bidimensional de um corte dos arranjos da cadeia de ancoragem da LT na SE: (a) arranjo original; b) arranjo original com as sapatas; c) novo arranjo.

Da comparação das simulações realizadas para o arranjo original da SE (Figura 1 (a)) e o arranjo após a inserção das esferas anti-corona nas sapatas (Figura 1 (b)) observou-se que, para o arranjo original sem as esferas, a magnitude do campo elétrico máximo era 19% maior no primeiro caso, considerando-se a distribuição de campo em todo o arranjo. A inserção das esferas anti-corona, praticamente não produziu nenhuma alteração na distribuição de campo elétrico ao longo da cadeia de isoladores.

Foram observados elevados valores do campo elétrico nos isoladores mais próximos ao ponto energizado (primeiros 50cm) do arranjo original e uma significativa diminuição no novo arranjo. Sem a utilização dos novos anéis, o campo elétrico máximo na região é 30% maior. Considerando a geometria completa, na vizinhança dos isoladores, o valor do campo elétrico máximo no arranjo inicial é 11% maior do que o valor de campo elétrico máximo encontrado no arranjo completo.

A análise dos resultados das simulações mostra que, de maneira geral, apesar de ter sido utilizado uma modelagem bidimensional, os resultados computacionais acompanharam a tendência de comportamento do campo elétrico observada nos ensaios. As reduções para os valores de campo elétrico máximo simulado são da ordem do aumento da tensão de início de corona proporcionado pelos novos anéis anti-corona, verificado nos ensaios.

3 ENSAIOS DE CORONA VISUAL

Foram testados 13 arranjos envolvendo diferentes combinações de condutores, tipos de isolador e ferragem nos níveis de tensão de 138kV e 230kV. Os ensaios de corona visual foram realizados aplicando-se uma tensão variável no arranjo sob teste e, por meio de equipamentos de visão noturna, registrando-se os níveis de tensão de aparecimento e extinção de corona negativo e positivo. Após o aparecimento do corona positivo no arranjo, a tensão era elevada em mais 10 a 20% para que o fenômeno se tornasse mais pronunciado antes da redução da tensão para registrar os níveis de extinção do corona. Para cada arranjo testado, este procedimento foi repetido três vezes para que os valores médios pudessem ser calculados.

A Tabela 1 apresenta a relação dos arranjos testados divididos em 3 blocos distintos. Os arranjos de No. 1 a 5 (bloco I) consistiram basicamente apenas do cabo sob investigação. Nos arranjos de No. 6 a 9 (bloco II), foi

TABELA 1 – Valores médios da tensão (kV) de aparecimento e extinção de corona positivo e negativo

Arranjo No.	Descrição da montagem	AP (-)	AP(+)	EX(+)	EX(-)
1	Cabo Grosbeak AeroZ h=2.80m	126	159	156	116
2	Cabo Grosbeak AeroZ h=5.60m	134	174	148	112
3	Cabo Grosbeak Tradicional h=5.60m	121	138	129	96
4	Cabo LinnetTW (feixe de 2, s=45cm) h=5.60m	134	163	143	117
5	Cabo Linnet Tradicional (feixe de 2, s=45cm) h=5.60m	164	189	172	135
6a	Cabo Linnet trad. (feixe de 2, s=45cm) + polimérico	156	183	168	140
7a	Cabo Linnet trad. (feixe de 2, s=45cm) + vidro, s=45cm	172	193	177	159
8a	Cabo Grosbeak Tradicional h=5.80m + vidro	130	160	148	120
9a	Cabo Grosbeak Tradicional h=5.80m + polimérico	128	151	125	108
6b	Ferragem Linnet trad. (feixe de 2, s=45cm) + polimérico	123	258	230	107
7b	Ferragem Linnet trad. (feixe de 2, s=45cm) + vidro	130	276	236	111
8b	Ferragem Grosbeak Tradicional h=5.80m + vidro	100	229	211	80
9b	Ferragem Grosbeak Tradicional h=5.80m + polimérico	97	182	159	82
10a	Cabo Grosbeak trad. + Torre 230kV + vidro h=5.84m	95	118	111	83
11a	Cabo Grosbeak trad. + Torre 230kV + polimérico h=5.84m	101	118	112	91
12a	Cabo Grosbeak AeroZ + Torre 230kV + vidro h=5.84m	121	168	167	110
13a	Cabo Grosbeak AeroZ + Torre 230kV + polimérico h=5.84m	123	162	164	108
10b	Ferragem Grosbeak trad. + Torre 230kV + vidro h=5.84m	89	199	172	72
11b	Ferragem Grosbeak trad. + Torre 230kV + polimérico h=5.84m	85	140	117	74
12b	Ferragem Grosbeak AeroZ + Torre 230kV + vidro h=5.84m	96	196	183	81
13b	Ferragem Grosbeak AeroZ + Torre 230kV + polimérico h=5.84m	92	148	147	80

adicionada ao cabo uma cadeia com 14 isoladores convencionais de vidro ou um isolador polimérico do mesmo comprimento da cadeia. Nos arranjos 10 a 13 (bloco III), foi também acrescentada uma torre com dimensões típicas do nível de tensão de operação de uma linha de 230kV. Para os blocos II e III, o índice “a” corresponde a corona no condutor, e “b” corona na ferragem. As últimas colunas da Tabela 1 apresentam os registros dos valores médios das tensões no aparecimento e extinção do efeito corona (positivo e negativo) observados durante os experimentos.

As Figuras 2 a 4 ilustram montagens típicas destes 3 blocos. Em cada figura é apresentado o arranjo ensaiado e o arranjo durante o ensaio, evidenciando o efeito corona.



(a)



(b)

FIGURA 2 – Exemplo de montagem do bloco I (feixe de cabo Linnet): (a) arranjo ensaiado; (b) durante o ensaio.



(a)



(b)

FIGURA 3 – Exemplo de montagem do bloco II (cabo Grosbeak + isoladores de vidro): (a) arranjo ensaiado; (b) durante o ensaio.

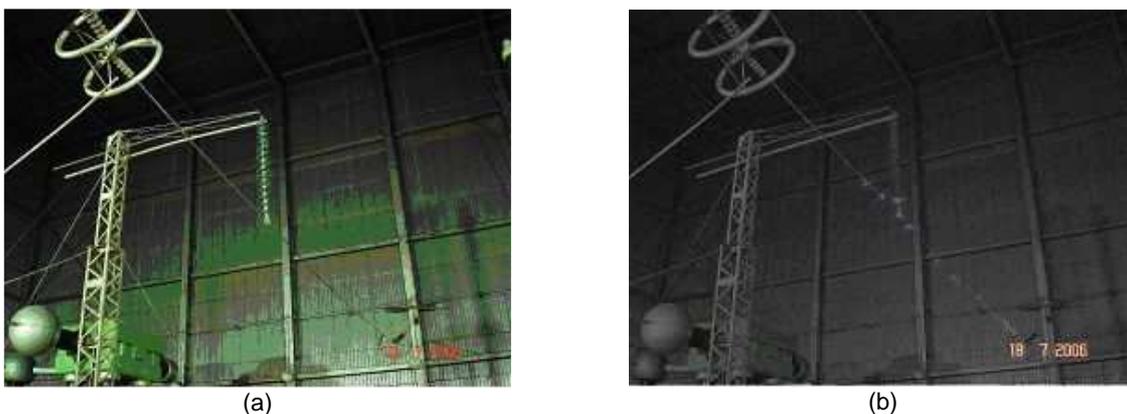


FIGURA 4 – Exemplo de montagem do bloco III (cabo Grosbeak + isoladores de vidro + torre): (a) arranjo ensaiado; (b) durante o ensaio.

A Tabela 2 apresenta os resultados das simulações computacionais realizadas com o programa CoroFEM referentes aos arranjos ensaiados e apresentados na Tabela 1. Todas as simulações foram realizadas considerando-se a parte energizada da estrutura tendo uma tensão de 1.0 Volt. Desta forma, os valores de campo inicialmente encontrados estão normalizados em (Volts/metro) por Volt aplicado (Volts/metro/Volt). Para se determinar o valor máximo do campo elétrico associado à tensão de início de corona do arranjo durante o ensaio, foi multiplicado o valor do campo normalizado obtido pelo valor médio da tensão de início de corona dos ensaios, o que corresponde aos dados da Tabela 2.

TABELA 2 – Resultado das simulações: valor do campo máximo obtido para as tensões de início de corona negativo e positivo durante os ensaios realizados

Arranjo No.	E _{max} (kV/cm) NEG.	E _{max} (kV/cm) POS.
1	8.78	11.07
2	5.40	7.00
3	5.27	6.02
4	4.36	5.31
5	6.59	7.58
6a	6.32	7.43
7a	6.98	7.82
8a	5.65	6.92
9a	5.52	6.51
6b	6.11	12.81
7b	6.76	14.34
8b	8.60	19.59
9b	7.19	13.53
10a	4.16	5.15
11a	4.40	5.15
12a	4.52	6.27
13a	4.60	6.04
10b	7.73	17.24
11b	6.11	10.03
12b	7.79	15.89
13b	6.16	9.98

4 CRITÉRIOS DE APLICAÇÃO DE DISPOSITIVOS ANTI-CORONA

O comportamento estatístico de diversos fenômenos naturais pode ser descrito por curvas de probabilidade gaussianas, como no caso do desempenho de estruturas isolantes frente a sobretensões de manobra [6]. No caso do efeito corona, se considerarmos um valor de campo elétrico de referência (E_{ref}) como média da distribuição e conhecermos o seu desvio padrão (σ), podemos calcular a probabilidade de aparecimento do corona em uma dada situação.

A Tabela 3 apresenta uma síntese do tratamento estatístico dos resultados da Tabela 2. Ela mostra que, nos arranjos simulados, os valores 5.7 kV/cm e 6.8 kV/cm correspondem aos valores médios de campo máximo nos condutores, obtidos para as tensões de início de corona negativo e positivo, respectivamente. Para a ferragem, os valores médios de campo máximo são 7.1 kV/cm e 14.2 kV/cm para as tensões de início de corona negativo e positivo, respectivamente. O desvio padrão (σ) de cada conjunto considerado será também utilizado na definição do critério. Com base nestes números, pode-se associar ao valor do campo máximo obtido numa simulação a probabilidade de ocorrência de corona negativo e/ou positivo no condutor e/ou na ferragem durante um ensaio.

TABELA 3 - Campo máximo obtido na simulação – estatística dos resultados obtidos

		E _{max} (kV/cm)	
		Corona Negativo	Corona Positivo
Condutor	Média	5.7	6.8
	Desvio Padrão	1.3	1.5
Ferragem	Média	7.1	14.2
	Desvio Padrão	0.9	3.1

Considerando-se uma distribuição densidade de probabilidade acumulada que relaciona o valor do campo máximo à probabilidade de ocorrência de corona. A partir do valor médio "X" do campo máximo obtido nas simulações dos arranjos ensaiados, pode-se definir um campo máximo de referência ao qual está associada uma probabilidade de ocorrência de corona. Escolhendo-se como referência o valor de campo máximo cuja probabilidade de ocorrência de corona é de 2% (numa alusão à conhecida sobretensão estatística normalmente utilizada em estudos de coordenação de isolamento), pode-se fazer uma avaliação dos resultados das simulações apresentados na Tabela 2. Para a probabilidade de ocorrência escolhida tem-se que: $X - 2.05 \sigma \rightarrow P = 2.0\%$. Com esta consideração e a partir da Tabela 3, têm-se então os valores de referência de campo máximo associados à tensão de início de corona negativo e positivo no condutor e na ferragem (Tabela 4).

TABELA 4 - Valores de campo máximo de referência

	E _{max} de Referência (kV/cm)	
	Corona Negativo	Corona Positivo
Condutor	3.09	3.84
Ferragem	5.27	7.75

4.1 Resultados

A partir dos valores de referência adotados, pode-se associar aos valores de campo máximo obtidos nas simulações (Tabela 2) uma probabilidade de ocorrência de corona negativo (P cor(-)) e corona positivo (P cor(+)) no condutor e na ferragem. A Tabela 5 apresenta as probabilidades obtidas.

TABELA 5 – Probabilidade de ocorrência de corona negativo e positivo no condutor e na ferragem associada ao nível de campo obtido nas simulações.

Arranjo No.	P cor (-)	P cor (+)
1	100.00%	100.00%
2	96.53%	98.35%
3	95.65%	92.86%
4	84.36%	84.12%
5	99.78%	99.49%
6a	99.52%	99.28%
7a	99.95%	99.71%
8a	97.77%	98.09%
9a	97.18%	96.38%
6b	83.04%	94.35%
7b	95.38%	98.08%
8b	100.00%	100.00%
9b	98.53%	96.50%
10a	80.26%	81.46%
11a	85.14%	81.46%
12a	87.03%	94.84%
13a	88.35%	93.06%
10b	99.80%	99.92%
11b	83.16%	76.81%
12b	99.85%	99.55%
13b	84.54%	76.33%

Como pode ser observado, existe uma alta probabilidade de ocorrência de corona negativo (93.4% em média) e positivo (93.6% em média) para todos os casos considerados. Como as simulações foram feitas para as respectivas tensões de início de corona onde, portanto, havia a presença do fenômeno, pode-se observar que este critério de avaliação do efeito corona constitui, um bom critério para avaliação da necessidade de alocação de dispositivos anti-corona num arranjo.

4.2 Investigação experimental – estrutura de 345 kV

Foi montado no laboratório um arranjo que corresponde à fase central de uma torre de 345kV, conforme apresenta a Figura 5 (a). Os condutores são suportados por uma cadeia em "V" consistindo de trinta e seis isoladores de vidro.

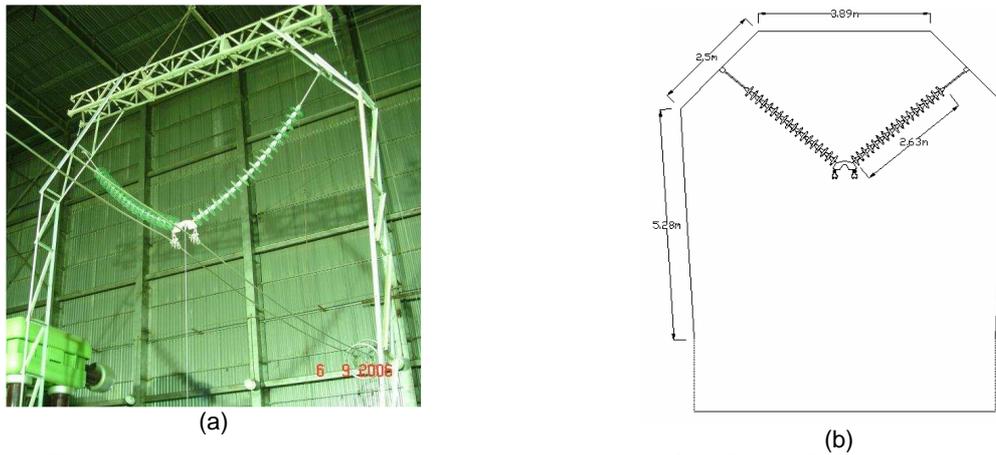


FIGURA 5 – Torre de transmissão de 345 kV: (a) montagem no laboratório; (b) detalhe dimensional do arranjo.

Foram realizados ensaios laboratoriais de corona visual para análise do comportamento da estrutura. Os valores observados para as tensões de aparecimento e de extinção do corona positivo e negativo são apresentados na Tabela 6.

TABELA 6 - Médias das Tensões observadas para a Ferragem e Cabo.

Tensões [kV]	Ferragem	Cabo
Aparecimento de Corona Negativo	135,3	166,7
Aparecimento de Corona Positivo	253,3	208,0
Extinção de Corona Positivo	248,0	195,3
Extinção de Corona Negativo	110,7	142,0

4.3 Simulação computacional

A Figura 5 (b) apresenta a modelagem bidimensional da janela da torre com a cadeia de isoladores. Neste caso foi adotada a simetria planar.

As Figuras 6 (a) e (b) apresentam a distribuição de potencial e a intensidade do campo elétrico, respectivamente, considerando-se uma tensão de 1V aplicada aos condutores com a janela da torre aterrada.

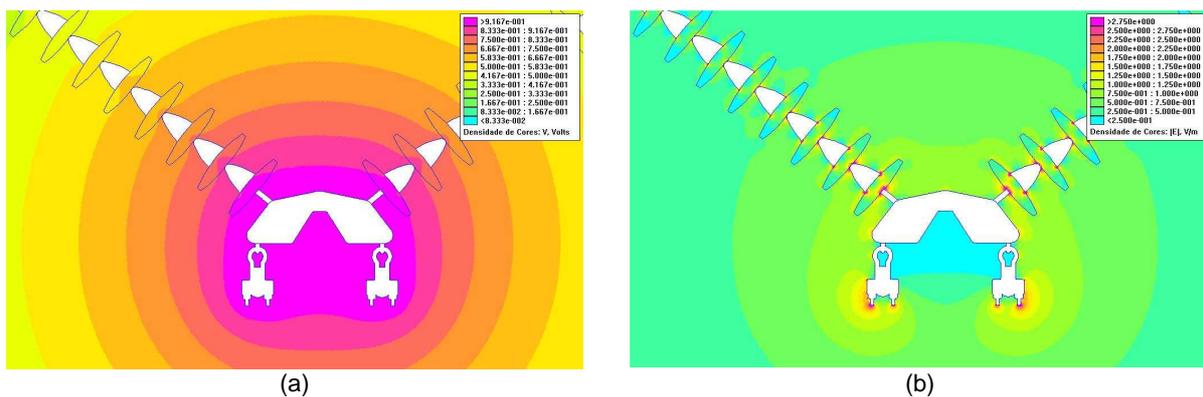


FIGURA 6 – Resultado das simulações: (a) distribuição de potencial; (b) distribuição da intensidade de campo elétrico.

A Figura 6 (b) apresenta o valor máximo do campo elétrico normalizado obtido para a ferragem de $3.62(\text{V/m})/\text{V}$. Tomando-se então o valor das tensões de início de corona na ferragem da Tabela 6, chega-se aos valores de campo máximo 4.898kV/cm e 9.169kV/cm para o corona negativo e positivo respectivamente.

Quando estes valores de campo são comparados aos valores de referência da Tabela 4 levando-se em conta o desvio-padrão apresentado na Tabela 3, chega-se às seguintes probabilidades de ocorrência de corona: 33.0%

para o corona negativo e 67.8% para o corona positivo. Uma vez que, durante os ensaios foi constatada a existência de corona negativo e positivo no arranjo, observa-se que este resultado é menos preciso que os apresentados na Tabela 5. Todavia, a probabilidade associada ao campo máximo para o corona positivo é maior que a do corona negativo. Uma explicação para esta menor probabilidade pode estar associada à maior complexidade deste arranjo quando comparado aos arranjos considerados na Tabela 2 tomada como base.

5 CONCLUSÃO

Foi realizado um estudo experimental e de modelagem computacional voltado para a análise do efeito corona em diferentes tipos de arranjos do sistema elétrico. Com base nos valores de magnitude de campo elétrico, o programa CoroFEM possibilita uma análise da região mais crítica em relação ao corona e possibilita computacionalmente alterar geometrias existentes para verificação dos valores obtidos para o valor de campo elétrico, e a partir dos valores obtidos observar (com base na análise probabilística mencionada) se haverá ou não o fenômeno, se possível eliminando a necessidade de ensaios laboratoriais que são trabalhosos e demandam mais tempo.

Os resultados apresentados mostram que os níveis de campo máximo correspondente às tensões de início de corona negativo e positivo para condutor e ferragem apresentam comportamento similar e podem ser analisados estatisticamente para serem tomados como referência de avaliação. A partir deles, pode-se avaliar, com o Programa CoroFEM, a necessidade de se utilizar dispositivos anti-corona analisando-se a probabilidade associada ao campo máximo.

Os valores de campo máximo de referência adotados ($P=2\%$) podem ser tomados como ponto de partida nas simulações feitas com o programa para que o mesmo seja utilizado como uma ferramenta de avaliação prática do efeito corona em condutores e isolantes do sistema em estudo. A confiabilidade de um sistema dessa natureza pode ser aumentada a partir da construção de um banco de dados de ensaios de corona visual ampliado. Com um maior número de dados experimentais, as tensões de início de corona de arranjos com diferentes graus de complexidade podem ser tomadas como referência para que o critério proposto seja testado a partir de uma população maior e estatisticamente mais representativa do fenômeno. Este banco de dados de ensaios pode ser utilizado também para aprimorar o critério aqui proposto (2%), ampliando a sua faixa de validade ou propondo critérios distintos para configurações distintas (por exemplo, cadeias de isoladores em "I" ou em "V", arranjos típicos de subestações, etc.).

Apesar da relativa simplicidade do critério proposto, a consistência estatística dos resultados apresentados na Tabela 5 ($P_{\min}=76\%$, $P_{\max}=100\%$ e $P_{\text{méd}}=93\%$) indica a sua aplicabilidade na previsão do aparecimento do efeito corona em configurações similares àquelas da Tabela 1.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Heinrich, O., "Corona Measuring Techniques and Their Use in Insulation System -Evaluation"; IEEE Transactions on Component Parts, Volume:11, Issue: 2, Pages:299 – 316, Jun 1964.
- (2) EHV Transmission Line Reference Book, 345kV and above - 2nd. edition – EPRI,1984.
- (3) P&D 153 – CEMIG/EEUFMG - Desenvolvimento de Metodologia para Análise sobre Condutores e Isolantes do Sistema de Distribuição de Energia. Relatórios Técnicos 1 a 6 – 2006.
- (4) N. Ida and J. P. Bastos, "Electromagnetics and Calculation of Fields", 2nd Ed. Springer-Verlag, NY, 1997.
- (5) M. N. O. Sadiku, "Numerical Techniques in Eletromagnetics," 2nd ed. CRC Press LLC, 2001.
- (6) NUNES, R. R. COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO PARA TRANSITÓRIOS DE MANOBRA CONSIDERANDO A FORMA DE ONDA DAS SOBRETENSÕES. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFMG, Belo Horizonte, 2006.

7 DADOS BIOGRÁFICOS

Gernan Edson Guimarães

Graduado em engenharia elétrica pela PUC-MG em 2000 e obteve o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela UFMG em 2005. Trabalha como engenheiro na Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG desde 2002 na área de engenharia de linhas de transmissão e sub-transmissão, atuando nas especialidades de projetos de aterramento, interferência eletromagnética e gerenciamento de projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) aplicados a linhas de transmissão.