

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE ELEMENTOS
FINITOS PARA MAPEAMENTO DE CAMPOS
ELÉTRICOS SOBRE CAVIDADES INTERNAS A
ISOLADORES POLIMÉRICOS DE 13.8 KV**

por

SUELEN HOLDER DE MORAIS E SILVA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: JOSÉ MAURÍCIO DE BARROS BEZERRA, Doutor.

Recife, Junho de 2013.

© Suelen Holder de Moraes e Silva, 2013.

Catálogo na fonte
Bibliotecário Vimário Carvalho da Silva, CRB-4 / 1204

S586a Silva, Suelen Holder de Moraes e.
Aplicação de técnicas de elementos finitos para mapeamento de campos elétricos sobre cavidades internas a isoladores poliméricos de 13.8 KV / Suelen Holder de Moraes e Silva. - Recife: O Autor, 2013.
xiv, 75 folhas, il., grafs., tabs.

Orientador: Prof^o. Dr^o. José Maurício de Barros Bezerra.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2013.

Inclui Referências bibliográficas, Apêndices e listas de figuras, tabelas, abreviaturas e símbolos.

1. Engenharia Elétrica. 2. Campo elétrico. 3. Isolador Polimérico. 4. Elementos finitos. 5. Curva de Paschen. I. Bezerra, José Maurício de Barros (Orientador). II. Título.

621.3 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2013-228



Universidade Federal de Pernambuco

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE
DISSERTAÇÃO DO MESTRADO ACADÊMICO DE

SUELEN HOLDER DE MORAIS E SILVA

TÍTULO

**“APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE ELEMENTOS FINITOS PARA
MAPEAMENTO DE CAMPOS ELÉTRICOS SOBRE CAVIDADES INTERNAS
A ISOLADORES POLIMÉRICOS DE 13.8 KV”**

A comissão examinadora composta pelos professores: JOSÉ MAURÍCIO DE BARROS BEZERRA, DEE/UFPE, RONALDO RIBEIRO BARBOSA DE AQUINO, DEE/UFPE, ZANONI DUEIRE LINS, DEE/UFPE e EDSON GUEDES DA COSTA, DEE/UFPE, sob a presidência do primeiro, consideram a candidata **SUELEN HOLDER DE MORAIS E SILVA APROVADA.**

Recife, 21 de junho de 2013.

CECÍLIO JOSÉ LINS PIMENTEL
Coordenador do PPGE

JOSÉ MAURÍCIO DE BARROS BEZERRA
Orientador e Membro Titular Interno

EDSON GUEDES DA COSTA
Membro Titular Externo

RONALDO RIBEIRO BARBOSA DE AQUINO
Membro Titular Interno

ZANONI DUEIRE LINS
Membro Titular Externo

Dedico este trabalho aos meus pais, Sidney e
Cristina, minha irmã Soraya e ao meu marido
Kleber, por sempre me apoiarem e me
ajudarem nesta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Nestes anos de mestrado muitas foram as colaborações para o desenvolvimento desta dissertação. Destaco a grande e sábia orientação do professor José Maurício de Barros Bezerra, que acompanhou todo o trabalho com entusiasmo e dedicação, professor que para mim é mais que um modelo de profissional e de caráter. Sou imensamente grata por sua disponibilidade, atenção, confiança, paciência e amizade.

Agradeço aos meus pais, Sidney de Oliveira e Cristina Holder, pelo constante incentivo e conselhos que me guiam até hoje. Agradeço também a minha irmã, Soraya Holder e meu marido Kleber Rodrigues, pelo apoio, conselhos, incentivo e compreensão.

Agradeço também aos meus sogros, Moacir e Dalva Rodrigues, pelos incentivos e palavras de motivação.

Aos professores que compuseram a banca examinadora por suas contribuições para o aprimoramento desta dissertação.

À Andréa Tenório, que, mesmo assoberbada pelas atribuições da secretaria do PPGEE, sempre encontrava tempo e disposição para atender aos alunos.

Aos estagiários do grupo de pesquisa, Samuel Honorato e Viviane Moraes, por sua ajuda na preparação dos dados para as simulações.

Aos amigos Karinne Silvestre, Alexsandro Aleixo e João Marcus Pereira por seus conselhos e ajuda nas horas de necessidade.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro que possibilitou o desenvolvimento do Projeto de Pesquisa.

Para finalizar, gostaria de agradecer as pessoas que de forma direta ou indireta contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal, acadêmico e profissional. Obrigada a todos!

Resumo da Dissertação apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE ELEMENTOS FINITOS PARA MAPEAMENTO DE CAMPOS ELÉTRICOS SOBRE CAVIDADES INTERNAS A ISOLADORES POLIMÉRICOS DE 13.8 KV

Suelen Holder de Moraes e Silva

Junho/2013

Orientador: José Maurício de Barros Bezerra, Doutor.

Área de Concentração: Processamento de Energia.

Palavras-chave: isolador polimérico, descargas parciais internas e curva de Paschen.

Número de Páginas: xiv + 75.

RESUMO: Um dos problemas relacionados com a interrupção do fornecimento de energia elétrica é o colapso do sistema de isolamento das linhas de distribuição. Com o avanço tecnológico foram adotados novos materiais, como o polímero, que possuem características superiores aos já utilizados. No entanto, esses isoladores, em seu processo de fabricação, vêm apresentando cavidades em seu interior. Essas cavidades podem ser responsáveis pelo desgaste prematuro do isolador, já que, no interior delas podem ocorrer descargas parciais. Com o objetivo de identificar a possibilidade do surgimento dessas descargas foi analisada uma amostra de 85 isoladores poliméricos na classe de tensão de 15 kV, os quais apresentam cavidades internas. As análises foram realizadas utilizando-se resultados de ensaios de raios X para dimensionamento das cavidades e software de elementos finitos para mapeamento dos campos elétricos. Essas análises tiveram como objetivo a classificação da amostra em dois grupos, sendo o primeiro relacionado com os que apresentam condições propícias ao surgimento de descargas, e o segundo associado a isoladores nos quais as condições impostas não se apresentam propícias ao surgimento das mesmas. Com base nesta classificação e utilizando como dados registros de ultrassom obtidos em laboratório, seria desenvolvido um novo processo de diagnóstico, com o auxílio de técnica de reconhecimento de padrões, no entanto os resultados obtidos indicaram que os campos elétricos impostos às cavidades não são suficientes para iniciar descargas parciais internas, inviabilizando a concepção do processo de diagnóstico.

Abstract of Dissertation presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

THE APPLICATION OF FINITE ELEMENT ANALYSIS TO THE MAPPING OF ELECTRICAL STRESSES ON THE INTERNAL CAVITIES OF 13.8 KV POLYMERIC INSULATORS

Suelen Holder de Morais e Silva

June/2013

Supervisor: José Maurício de Barros Bezerra, Doutor.

Concentration Area: Energy Processing.

Keywords: polymeric insulator, internal discharge and Paschen curve.

Number of Pages: xiv + 75.

ABSTRACT: One of the problems associated with the interruption of electricity supply is the collapse of the insulation system on distribution lines. Technological advances have led to the adoption of new materials, such as polymers, whose features are superior to those of materials used in the past. However, interior cavities appear in insulators during the process of fabrication. These cavities can cause premature damage in the insulator because of partial discharges that can occur inside them. A sample of 85 polymeric insulators (13.8 kV) containing internal cavities was analyzed to identify the possible pattern of these discharges. The analyses were done using X-ray test results, that helped to measure the cavity size, and finite element software to map the electrical fields imposed. The aim of these analyses was to classify the sample into two groups. The first group included those that showed favourable conditions for discharges, while the second was related to insulators in which the imposed conditions were not favourable for discharges. Based on this classification and using data from ultrasound registers obtained from the laboratory, a new diagnostic process would be developed with the aid of pattern recognition techniques, however the results indicated that the electric fields imposed to the cavities are not sufficient to initiate internal partial discharges, preventing the design of the diagnostic process.

SUMÁRIO

Lista de figuras	viii
Lista de tabelas	xi
Lista de abreviaturas	xii
Lista de simbolos	xiii
1 Introdução	1
1.1 Organização do texto.....	8
2 Mapeamento de campos elétricos em isoladores	9
2.1 Elementos finitos.....	9
2.2 Modelagem dos isoladores e cavidades internas.....	13
2.3 Cálculo dos estresses elétricos aplicados aos isoladores.....	17
3 Descargas parciais em cavidade preenchida por um gás	20
3.1 Ionização por colisões	20
3.2 Fotoionização	21
3.3 Primeiro coeficiente de Townsend	22
3.4 Segundo coeficiente de Townsend.....	24
3.5 O mecanismo de Townsend	26
3.6 Lei de Paschen.....	28
3.6.1 Aproximações para a curva de Paschen para o ar atmosférico.....	31
4 Resultado das simulações e suas análises	35
4.1 Distribuição de campo elétrico.....	35
4.2 Reclassificação das amostras estudadas	38
4.1 Comentários.....	41
5 Conclusões	43
5.1 Proposta para trabalhos futuros	44
6 Apêndice	45
6.1 Figuras - simulação em 2d:	45
6.2 Figuras - simulação em 3d:	54
Referências bibliográficas	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Isolador com cavidade interna.	2
Figura 1.2 – Isoladores poliméricos que apresentaram problemas após poucos meses em operação	2
Figura 1.3 - Tipos de descargas parciais: (a) superficial, (b) corona, (c) interna e (d) em arborescência elétrica.	3
Figura 1.4 – Resumo quantitativo da base de dados.....	4
Figura 1.5 – Aplicação do processo de diagnóstico desenvolvido.....	4
Figura 1.6 – Tela inicial do IsoDiagnosis.....	5
Figura 1.7 – Pré-processamento do sinal e resultado da análise através do programa IsoDiagnosis.....	5
Figura 1.8 - Trecho da linha experimental com detalhe da haste confeccionada.....	7
Figura 1.9 – Linha experimental em operação.. ..	7
Figura 2.1 – Discretização de um domínio em sub-regiões.. ..	10
Figura 2.2 – Elementos finitos mais usuais: (a) para 2D e (b) para 3D.....	10
Figura 2.3 – Domínio dividido em três elementos finitos de primeira ordem.	11
Figura 2.4 – Imagem de raio X de um dos isoladores estudados.	13
Figura 2.5 – Modelo dos isoladores desenhados com o auxílio do AutoCAD. (a) tipoX em 3D (b) tipo X em 2D e (c) tipo Y em 2D.	14
Figura 2.6 – Representação dos eixos (posicionamento) e semi-eixos de uma cavidade genérica.	14
Figura 2.7 – Modelo do isolador simulado em 2D com todas as geometrias do modelo... ..	18
Figura 2.8 – Comparação entre a geometria original (a) e a malha criada (b).	19
Figura 2.9 – Malha criada nas cavidades em 3D: (a) aproximação grosseira da geometria; (b) aproximação refinada da geometria.....	19
Figura 3.1 – Variação da corrente como função da tensão.....	22
Figura 3.2 – Eletrodos de placas paralelas.. ..	23
Figura 3.3 – Variação da corrente na cavidade em função do espaçamento dos eletrodos em campo uniforme.....	25
Figura 3.4 – Valores de γ para o Argônio com diferentes materiais no cátodo.	27
Figura 3.5 – Cavidade esférica no interior de um dielétrico.	28
Figura 3.6 – Curva de Paschen.	30
Figura 3.7 – Curva de Paschen para o ar atmosférico.. ..	32
Figura 3.8 – Estresse de ruptura no ar atmosférico a 1 atm como função da distância entre eletrodos paralelos.....	34
Figura 4.1 – Isolador X003 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.....	35
Figura 4.2 – Isolador X004 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.....	36
Figura 4.3 – Isolador Y002 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.....	36
Figura 4.4 – Isolador Y013 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.....	36
Figura 4.5 – Isolador X014 - Campo elétrico na cavidade.....	37
Figura 4.6 – Isolador X015 - Campo elétrico na cavidade.....	37
Figura 4.7 – Isolador X016 - Campo elétrico na cavidade.....	37
Figura 4.8 – Distribuição de campo elétrico a 1 pu (kV/cm).. ..	42
Figura 6.1 – Isolador Y020 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.....	45
Figura 6.2 – Isolador Y022 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.....	45
Figura 6.3 – Isolador Y029 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.....	46
Figura 6.4 – Isolador Y030 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.....	46

Figura 6.54 – Isolador X128 - Campo elétrico na cavidade.....	63
Figura 6.55 – Isolador X131 - Campo elétrico na cavidade.....	64
Figura 6.56 – Isolador X133 - Campo elétrico na cavidade.....	64
Figura 6.57 – Isolador X137 - Campo elétrico na cavidade.....	64
Figura 6.58 – Isolador X139 - Campo elétrico na cavidade.....	65
Figura 6.59 – Isolador X140 - Campo elétrico na cavidade.....	65
Figura 6.60 – Isolador X142 - Campo elétrico na cavidade.....	65
Figura 6.61 – Isolador X145 - Campo elétrico na cavidade.....	66
Figura 6.62 – Isolador X147 - Campo elétrico na cavidade.....	66
Figura 6.63 – Isolador X149 - Campo elétrico na cavidade.....	66
Figura 6.64 – Isolador X158 - Campo elétrico na cavidade.....	67
Figura 6.65 – Isolador X165 - Campo elétrico na cavidade.....	67
Figura 6.66 – Isolador X167 - Campo elétrico na cavidade.....	67
Figura 6.67 – Isolador X168 - Campo elétrico na cavidade.....	68
Figura 6.68 – Isolador X173 - Campo elétrico na cavidade.....	68
Figura 6.69 – Isolador X181 - Campo elétrico na cavidade.....	68
Figura 6.70 – Isolador X183 - Campo elétrico na cavidade.....	69
Figura 6.71 – Isolador X186 - Campo elétrico na cavidade.....	69
Figura 6.72 – Isolador X187 - Campo elétrico na cavidade.....	69
Figura 6.73 – Isolador X189 - Campo elétrico na cavidade.....	70
Figura 6.74 – Isolador X190 - Campo elétrico na cavidade.....	70
Figura 6.75 – Isolador X193 - Campo elétrico na cavidade.....	70
Figura 6.76 – Isolador X194 - Campo elétrico na cavidade.....	71
Figura 6.77 – Isolador X196 - Campo elétrico na cavidade.....	71
Figura 6.78 – Isolador X199 - Campo elétrico na cavidade.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Dimensões dos eixos das cavidades e seus respectivos posicionamentos.....	15
Tabela 3.1 – Constantes de ionização F e G (T=20°C).	24
Tabela 3.2 – Tensão mínima de ruptura para vários gases.....	30
Tabela 3.3– Constantes A', B' e L para cálculo de E_{rp} no ar atmosférico.....	33
Tabela 4.1 – Resultados das simulações.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS

2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
CAC	Centros de Artes e Comunicação
Celpe	Companhia Energética de Pernambuco
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CTG	Centros de Tecnologia e Geociências
DPI	Descargas Parciais Internas
EDP	Equações Diferenciais Parciais
LDE	Linha de Distribuição Experimental
MEF	Método dos Elementos Finitos
pd	Produto entre a pressão e a distancia entre eletrodos (pxd)
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
RNA	Rede Neural Artificial
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

LISTA DE SIMBOLOS

A'	Constante para cálculo de E_r/p no ar atmosférico
A	Átomo
A^+, M^+	Íons positivos
a	Largura da cavidade
B'	Constante para cálculo de E_r/p no ar atmosférico
b	Altura da cavidade
$C1$	Classificação pelo critério 1
$C2$	Classificação pelo critério 2
$C3$	Classificação pelo critério 3.
c	Profundidade da cavidade
D	Densidade de fluxo elétrico
d	Distância entre eletrodos
dn	Aumento da quantidade de elétrons
dx	Distância adicional
E	Intensidade de campo elétrico
E_c	Estresse elétrico onde a ionização efetivamente se inicia
E_{max}	Campo máximo aplicado sobre a cavidade;
E_{med}	Campo médio aplicado sobre a cavidade;
e^-	Elétron
F, G	Constantes de ionização
H	Constante de Plank ($h = 6,624 \times 10^{-34}$ joule)
I	Corrente da descarga
I_0	Corrente inicial gerada pelo catodo
K/C	Constante utilizada para calcular V_r
L	Constante
M	Molécula
n	Número de elétrons
n_0	Número de elétrons primários gerados no catodo
n_u	Número de elétrons liberados do catodo por radiação ultravioleta;

n_+	Número de elétrons liberados do catodo por bombardeamento de íons positivos;
n'	Número de elétrons que chegam ao anodo;
p	Pressão exercida sobre o gás
r	Raio do condutor
t	Temperatura ambiente
V	Potencial elétrico
V_e	Tensão em cada nó do elemento finito e
V_r	Tensão de ruptura
ν	Frequência do fóton
x	Distância de n elétrons do catodo na direção do campo elétrico
x'	Abcissa (centro da cavidade)
y'	Ordenada (centro da cavidade)
z'	Afastamento (centro da cavidade)
α	Primeiro coeficiente de Townsend
γ	Segundo coeficiente de Townsend
δ	Densidade do gás
ϵ_0	Permissividade relativa ou constante dielétrica do vácuo
ϵ_r	Permissividade relativa ou constante dielétrica do material
ρ_v	Densidade volumétrica de carga
σ	Coeficiente angular da reta
∇	Operador Nabla

1 INTRODUÇÃO

A continuidade do serviço é uma das grandes preocupações das distribuidoras de energia elétrica, pois em caso de interrupção, além de transtornos a sociedade, a empresa, caso não consiga reestabelecer o serviço dentro de um período aceitável, acaba por ser penalizada financeiramente. Segundo BEZERRA et al. (2009), um dos componentes que apresenta alto índice de falhas é o isolador, e por isso, é de grande importância o monitoramento deste componente.

Os isoladores são fabricados em diversos materiais como a porcelana, o vidro e o polímero. Os isoladores poliméricos, devido as suas inúmeras vantagens em relação aos de porcelana e vidro, vêm sendo muito utilizados. Esses isoladores apresentam (GORUR; CHERNEY; BURNHAM, 1999, BEZERRA et al., 2010) menor peso, facilitando o seu manuseio e transporte, melhor desempenho em áreas de vandalismo e em áreas sobre poluição industrial e marinha, menor custo de instalação e boas características hidrofóbicas. HACKAM (1999) cita também que os isoladores poliméricos apresentam alta resistência mecânica e suportabilidade elétrica igual ou superior aos de cerâmica ou vidro.

No entanto, esses isoladores podem apresentar cavidades internas, Figura 1.1, que são originadas durante o processo de fabricação. No caso das resinas epóxi, por exemplo, a formação dessas cavidades pode ocorrer durante o processo de cura do material, devido à infiltração do ar atmosférico ou a formação de gases residuais originados de alguma reação química (BOGGS, 1990, GODOI, 2005). Essas cavidades podem ser responsáveis pela deterioração precoce do isolador, pois, podem ocorrer descargas parciais em seu interior, conforme registros fotográficos apontados nas Figura 1.2(a) e Figura 1.2(b). Em seu livro, KREUGER (1989), define descargas parciais como sendo uma descarga elétrica que une parcialmente os eletrodos. As descargas são classificadas em quatro tipos: descargas internas (Figura 1.3(a)), descargas superficiais (Figura 1.3 (b)), descargas corona (Figura 1.3 (c)) e descargas em arborescência (Figura 1.3 (d)), esta última é um caso especial de

Descargas Parciais Internas (DPI), é possível visualizar na Figura 1.3 esses tipos de descarga.



Figura 1.1 – Isolador com cavidade interna. Fonte: (MENDONÇA et al., 2008).



Figura 1.2 – Isoladores poliméricos que apresentaram problemas após poucos meses em operação. Fonte: fornecida pela Celpe.

As descargas parciais internas são descargas que ocorrem no interior do dielétrico, em cavidades preenchidas com gás. Para que essas descargas tenham início, considerando uma cavidade preenchida por gás, é necessário que exista pelo menos um elétron livre disponível para dar início ao processo de avalanche, no caso do mecanismo de Townsend, e que o campo elétrico aplicado à cavidade seja superior à rigidez dielétrica do gás presente (GUTFLEISCH; NIEMEYER, 1995, MORSHUIS, 1993 e 1995). O valor do estresse máximo suportado pelo gás é dependente do tipo de gás, da pressão sobre ele e da dimensão da cavidade, sendo regida pela Lei de Paschen. A geometria da cavidade influencia a distribuição do campo elétrico sobre ela e é possível calcular essa intensidade em alguns casos (geometrias regulares). O estresse sobre uma cavidade esférica é igual a $3\varepsilon_r/(1 + 2\varepsilon_r)$ vezes a intensidade do campo na mesma região sem a cavidade. Se o valor da permissividade relativa do dielétrico (ε_r) é grande a intensidade do campo elétrico na

cavidade tende a ser 1,5 vezes maior que na mesma região sem a presença da cavidade (KREUGER, 1989, BARTINIKAS; McMAHON, 1979). Para geometrias irregulares é recomendado o uso de softwares para resolver a equação de Laplace com condições de contorno apropriadas (CHANG; SUDARSHAN; THOMPSON, 1986).

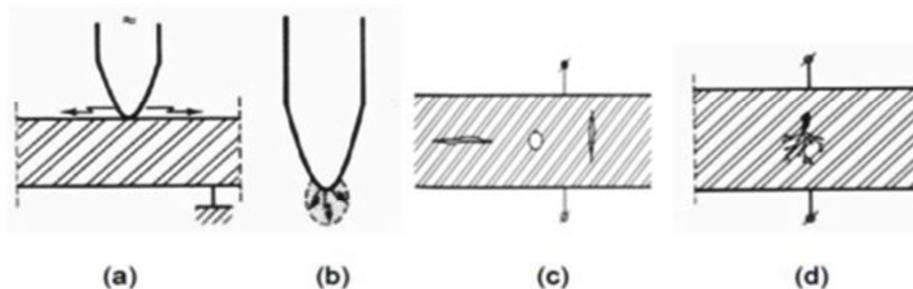


Figura 1.3 - Tipos de descargas parciais: (a) superficial, (b) corona, (c) interna e (d) em arborescência elétrica. Fonte: (KREUGER, 1989).

Com o objetivo de procurar desenvolver um processo de diagnóstico para detecção de descargas parciais internas, foi desenvolvido um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) conjuntamente pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e Companhia Energética de Pernambuco (Celpe) (MENDONÇA *et al.*, 2008), no período de junho de 2006 a março de 2007. Nesse P&D foram adquiridos 254 isoladores poliméricos, sendo 200 do tipo X e 54 do tipo Y, na classe de tensão 15 kV. Todas as unidades poliméricas foram submetidas a ensaios de raio X para a identificação da presença de possíveis defeitos (cavidades internas), e caso apresentassem cavidade interna eram classificadas como “com defeito”. As amostras que não apresentaram cavidades foram classificadas como “sem defeito”.

Após a classificação, cada isolador foi submetido a ensaios elétricos nos níveis de tensão de três e três e meio pu, por um período de dez minutos, e ao término desse período foram registrados sinais de ultrassom para construção do conjunto de treinamento da Rede Neural Artificial (RNA). Todo o ensaio foi monitorado por detector de descargas parciais e instrumento de detecção de corona (DayCor) no intuito de assegurar a existência de descargas internas sem a presença de corona. Após análise das imagens obtidas pelo DayCor constatou-se que algumas amostras precisariam ser descartadas, pois apresentavam alto índice de corona. Assim, um novo agrupamento foi constituído, separando as amostras em aptas e não aptas devido à geração excessiva de descargas corona (MENDONÇA *et al.*, 2008). A Figura 1.4 ilustra essa nova classificação.

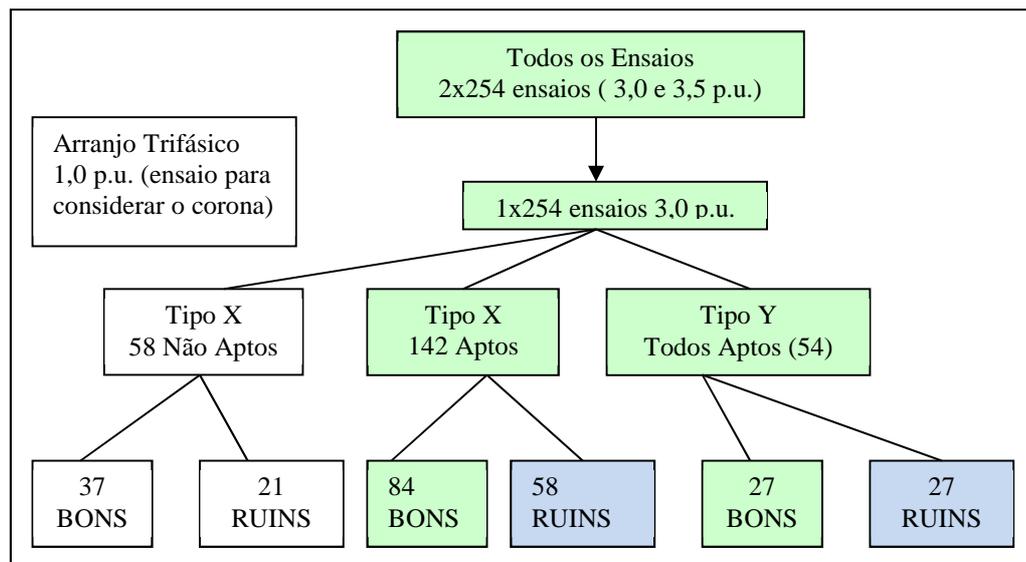


Figura 1.4 – Resumo quantitativo da base de dados. Fonte: (UFPE; CELPE, 2008).

Com a base de dados montada foi realizado o treinamento da RNA, no entanto, a rede desenvolvida não conseguiu dar respostas coerentes para dados não apresentados a ela durante o treinamento (MENDONÇA *et al.*, 2008). As análises finais das pesquisas apresentaram resultados não conclusivos, apesar de ter sido montado processo de diagnóstico para ser exercitado em campo, conforme ilustra a Figura 1.5, a título de visão de como tal procedimento poderia ser incorporado à rotina de manutenção preventiva na empresa de energia elétrica (UFPE; CELPE, 2008).



Figura 1.5 – Aplicação do processo de diagnóstico desenvolvido. Fonte: (UFPE; CELPE, 2008)

Na Figura 1.6 é apresentada a tela de entrada do sistema computacional desenvolvido, o qual se propusera a simular tal processo de diagnóstico.

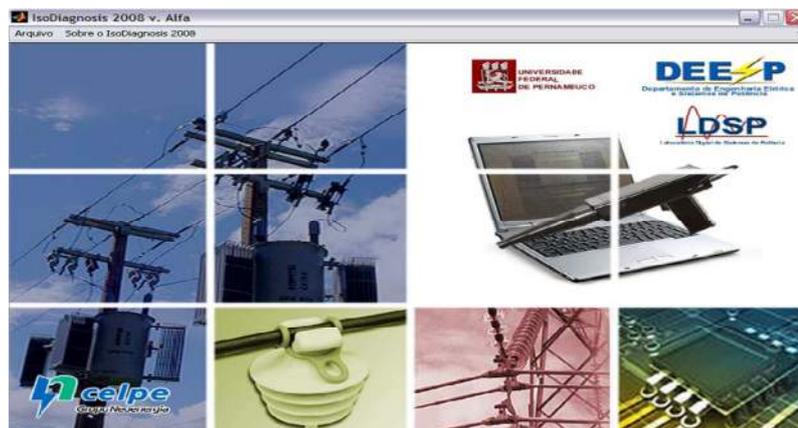


Figura 1.6 – Tela inicial do IsoDiagnosis. Fonte: (UFPE; CELPE, 2008)

Na Figura 1.7 é ilustrado o procedimento para o pré-processamento do sinal adquirido em campo. Depois da aquisição o sinal de ultrassom passava por um particionamento, no qual era dividido em 34 partições, e cada partição era submetida à rede neural implantada para suporte ao processo de diagnóstico. A partir dos diagnósticos obtidos se procedia a uma “eleição” automática: caso 50 % mais um dos diagnósticos indicassem que a amostra analisada apresentava anormalidades (sinais característicos de ultrassom relacionado com a presença de cavidades) a conclusão do processo era de que a amostra estava com defeito, caso contrário a amostra era considerada em bom estado.

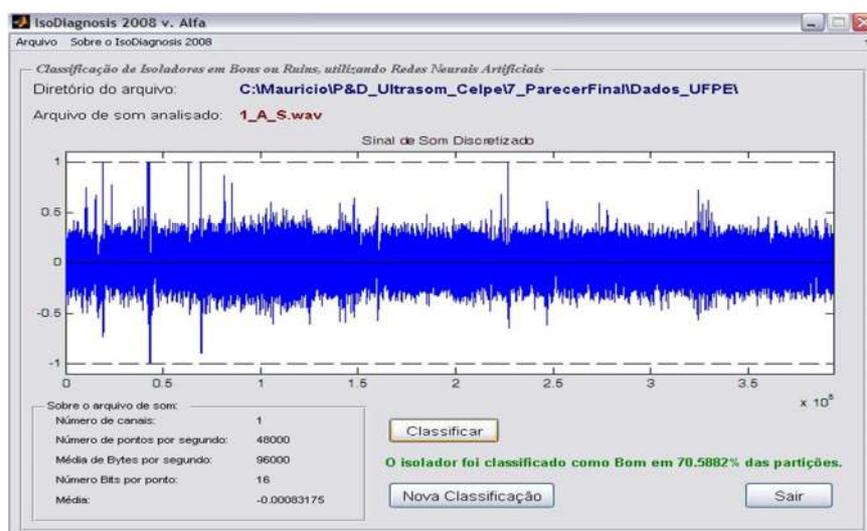


Figura 1.7 – Pré-processamento do sinal e resultado da análise através do programa IsoDiagnosis. Fonte: (UFPE; CELPE, 2008)

Com o intuito de se rever os resultados “não conclusivos” encontrados nesta pesquisa foram levantados alguns questionamentos sobre o que poderia ter levado a tal resultado

(BEZERRA et al., 2009). Diante destes questionamentos se propôs um novo projeto, com o auxílio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que pudesse aprofundar os seguintes aspectos:

- aferição da distribuição de tensão interna para mapear os estresses elétricos nas cavidades e corrigir o conjunto de treinamento definido no projeto anterior;
- aplicação da tensão nominal por um longo período, de tal forma que o estresse ocorra mais naturalmente;
- concepção de uma linha experimental que permita o ensaio simultâneo de todas as unidades, na tensão nominal;
- desenvolvimento de novo sistema de diagnóstico preditivo, o qual seria gradativamente ajustado ao longo do projeto.

Uma linha de distribuição experimental (LDE) foi idealizada com o objetivo de submeter os isoladores, tradicionalmente utilizados em linhas de distribuição de energia elétrica, a condições usuais de operação. Deste modo, se buscava obter dados mais reais para o desenvolvimento de uma tecnologia para o diagnóstico, não invasivo, de defeitos em isoladores poliméricos através de sensores de ultrassom. Para a construção da linha foram disponibilizados na rede de 13,8kV da UFPE quatro vãos localizados entre os Centros de Artes e Comunicação (CAC) e de Tecnologia e Geociências (CTG). Estes vãos estão protegidos com chave fusível e para-raios (BEZERRA et al., 2012).

Devido ao grande número de isoladores, foi necessário adaptar a linha no sentido de comportar todas as unidades. Por isso foi instalado um cabo aterrado, paralelo a cada fase. Para obter a distância necessária entre fase e terra foi confeccionada uma haste de alumínio cujo detalhe construtivo está ilustrado na Figura 1.8. Na parte superior das hastes, uma rosca compatível com a do isolador foi feita; e, na parte inferior, uma rosca com um corte para conexão ao cabo terra foi realizada. Na montagem foi utilizada uma porca galvanizada na parte inferior da haste para sustentação do cabo terra e uma liga de silicone para fixação do isolador ao condutor. Devido a não padronização dos isoladores ensaiados foi necessário utilizar uma rosca específica para cada tipo de isolador (BEZERRA et al., 2012).

Todos os isoladores foram rotulados e instalados seguindo ordem pré-determinada para facilitar a localização e identificação. A Figura 1.9 apresenta foto de um dos vãos da LDE com sua montagem finalizada (BEZERRA et al., 2012).

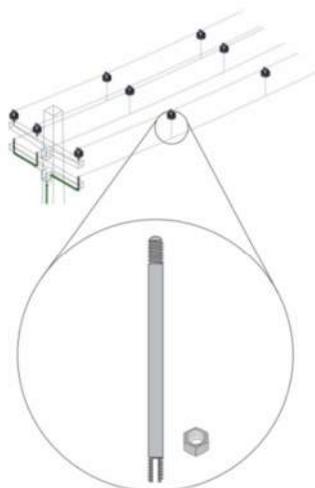


Figura 1.8 - Trecho da linha experimental com detalhe da haste confeccionada.
 Fonte: (BEZERRA et al., 2012).



Figura 1.9 – Linha experimental em operação. Fonte: (BEZERRA et al., 2012).

As características da LDE e da região na qual esta linha está presente são (BEZERRA et al., 2012):

- quatro vãos de aproximadamente 45 metros cada;
- estruturas terminais com esforço nominal de 1500 daN;
- estruturas de suspensão com esforço nominal de 200 daN;
- comprimento das estruturas: 11 m;
- cabo CAA Swan (4 AWG);
- temperatura coincidente: 22 °C;
- velocidade básica do vento: 20 m/s;
- terreno: categoria D (áreas urbanizadas);

- altitude média da região de implantação da linha: 8m.

Esta dissertação apresenta os resultados das análises realizadas, enfocando especificamente a busca de uma nova classificação para as unidades poliméricas (isoladores “propícios ao surgimento de DPI” e “não propícios ao surgimento de DPI”), através do mapeamento dos estresses elétricos nas 85 cavidades consideradas aptas por corona, buscando corrigir o conjunto de treinamento definido no projeto anterior. Para isso, foram realizadas simulações com software de elementos finitos, para estimar o estresse elétrico aplicado a cada unidade isolante comparando esse valor ao obtido na Curva de Paschen.

1.1 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O presente trabalho é composto por cinco capítulos. No primeiro capítulo é apresentada a visão geral, através da contextualização do assunto, os objetivos para o desenvolvimento do trabalho e a metodologia utilizada.

No segundo capítulo é abordado o Método dos Elementos Finitos, fazendo uma breve introdução sobre o assunto e sua aplicação na resolução de problemas relacionados à distribuição de tensão elétrica. Nesse capítulo também é descrita a simulação realizada para a análise do estresse elétrico aplicado as cavidades existentes no interior dos isoladores poliméricos, através de software de elementos finitos, mostrando como as informações para a reprodução das cavidades foram obtidas.

No terceiro capítulo é apresentada a teoria sobre ruptura no gás, indicando os critérios utilizados para análise da predisposição para o surgimento de descargas nas cavidades existentes.

No quarto capítulo são expostos os resultados das simulações, através de imagens onde é possível visualizar através de escala de cores a intensidade da distribuição de campo elétrico ao longo da cavidade. São apresentados também os resultados da comparação com os valores encontrados através da curva de Paschen para reclassificação das amostras.

No quinto capítulo são realizadas as considerações finais, além de apresentar propostas para trabalhos futuros.

2

MAPEAMENTO DE CAMPOS ELÉTRICOS EM ISOLADORES

O ser humano procura descrever praticamente todos os fenômenos da natureza através de formulações matemáticas, tentando explicar, através das leis da física, o seu comportamento. Esses fenômenos podem ser de natureza biológica, geológica, mecânica, eletrostática ou eletromagnética, por exemplo. O estudo destes fenômenos envolvem duas grandes tarefas, a formulação matemática do processo físico e a análise numérica do modelo matemático (REDDY, 1993). Entre os métodos numéricos conhecidos pode-se citar o Método dos Elementos Finitos (MEF), que é utilizado para resolver Equações Diferenciais Parciais (EDP) (SADIKU, 2001). Neste capítulo será realizada uma breve introdução sobre o MEF e sua aplicação através do software COMSOL[®] (2012) para o mapeamento do estresse elétrico ao longo do isolador e sobre a cavidade, com o intuito de identificar a possibilidade do surgimento de descargas parciais internas.

2.1 ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos é uma poderosa e versátil técnica para resolver problemas que envolvem geometrias complexas (SADIKU, 2000). A aplicação desta técnica envolve quatro etapas básicas: a discretização, a derivação de equações que governam um elemento típico, a montagem de todos os elementos na região da solução e a solução do sistema de equações obtidas. A discretização consiste em dividir o objeto de estudo (domínio) em sub-regiões de geometria mais simples, como ilustrado na Figura 2.1, denominadas elementos finitos (SADIKU, 2000, REDDY, 1993). A Figura 2.2 ilustra alguns dos elementos mais utilizados para problemas de duas (2D) e três (3D) dimensões.

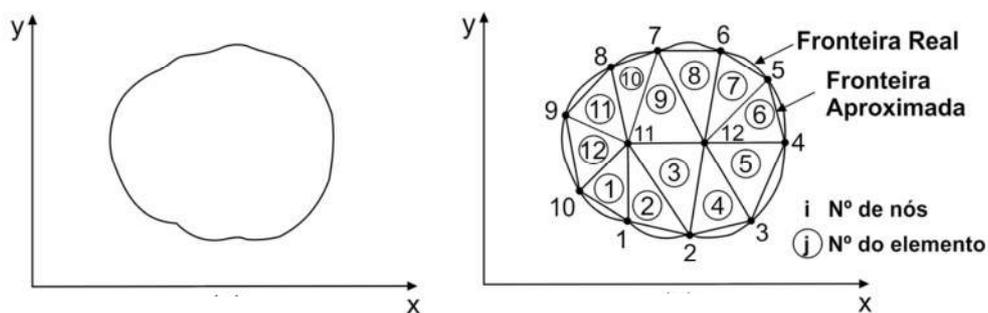


Figura 2.1 – Discretização de um domínio em sub-regiões. Fonte: (SADIKU, 2000).

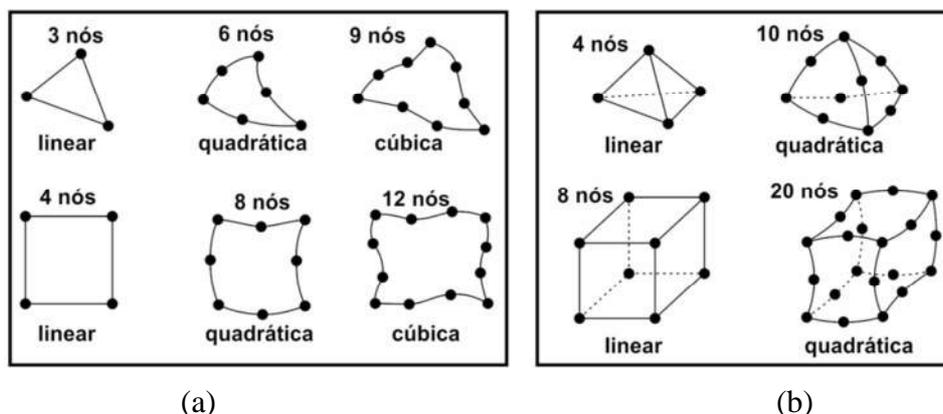


Figura 2.2 – Elementos finitos mais usuais: (a) para 2D e (b) para 3D. Fonte: (BASTOS; SADOWSKI, 2003).

Os elementos finitos são interligados através dos nós e a malha formada recebe o nome de *mesh*. REDDY (1993) enumera três características básicas que essa malha deve ter:

1. A malha deve representar a geometria do domínio de forma precisa;
2. Deve representar adequadamente as soluções;
3. Não deve conter elementos com geometrias inaceitáveis, ou seja, os elementos devem ter sua geometria a mais perfeita possível.

Logo, a malha criada pode ser grosseira (constituída por poucos elementos) ou refinada (constituída por muitos elementos) e apresentar vários tipos de elementos com geometrias diferentes. A construção correta da malha (escolha do elemento finito e quantidade desses elementos) pode melhorar o desempenho computacional na resolução do MEF, convergindo com mais facilidade e apresentando resultados mais próximos dos reais (REEDY, 1993).

Após a criação da malha, cada elemento finito é analisado individualmente através de equações pertinentes ao estudo desejado. Para calcular a distribuição de campo elétrico ao longo de uma determinada geometria, por exemplo, é necessário calcular o valor aproximado do potencial V_e em cada nó de um elemento "e" (BASTOS; SADOWSKI, 2003). A Figura 2.3 ilustra a representação de três elementos finitos de primeira ordem para o cálculo da distribuição de tensão ao longo da geometria. As tensões v_1 e v_4 são conhecidas (condições de contorno) e para calcular as demais tensões é realizada uma interpolação linear para representar a tensão num determinado ponto. Com essa informação as equações pertinentes são aplicadas e as equações diferenciais resolvidas (MEUNIER, 2008).

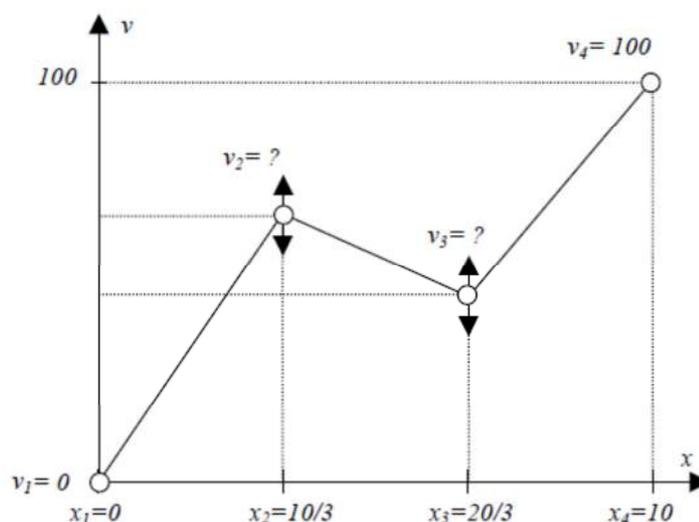


Figura 2.3 – Domínio dividido em três elementos finitos de primeira ordem.
Fonte: (MEUNIER, 2008).

As equações de interesse da eletrostática para o cálculo do campo elétrico são (HAYT JR.; BUCK, 2003, BASTOS; SADOWSKI, 2003):

- Intensidade de campo elétrico (sistema de coordenadas cartesiano):

$$E = -\nabla V, \quad (2.1)$$

onde,

E → intensidade do campo elétrico;

V → potencial elétrico;

∇ → operador *Nabla*.

- Primeira equação de Maxwell (Eletrostática):

$$\nabla \cdot D = \rho_v, \quad (2.2)$$

onde,

D → densidade de fluxo elétrico;

ρ_v → densidade volumétrica de carga.

Como $D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E$ e relacionando a equação (2.1) com a equação (2.2) obtém-se:

$$-\nabla \cdot (\varepsilon \nabla V) = \rho_v, \quad (2.3)$$

onde,

ε_0 → permissividade do vácuo;

ε_r → permissividade relativa do material.

Reorganizando a equação (2.3) chega-se à equação de Poisson

$$\nabla^2 V = \frac{\rho_v}{\varepsilon}. \quad (2.3)$$

E no caso de um sistema livre de cargas ($\rho_v = 0$) chega-se à equação de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0. \quad (2.4)$$

Devido à complexidade das geometrias estudadas, as malhas criadas podem apresentar milhares de elementos finitos, o que torna sua resolução manual inviável. Para aplicar o MEF nessas geometrias são utilizados softwares de elementos finitos, que analisam o problema, basicamente, em três etapas (BASTOS; SAODWSKI, 2003):

- 1ª etapa (Pré-processamento): os dados gerais para resolução do problema são inseridos pelo usuário. Entre os dados podem ser citados: as geometrias (domínios), os materiais aplicados a cada domínio, as condições de contorno, a

natureza do problema estudado (eletrostática, distribuição de calor, entre outros) e as equações que a regem. É nessa etapa que a malha é automaticamente gerada.

- 2ª etapa (Processamento): o método dos elementos finitos é aplicado ao domínio discretizado e o sistema de equações é resolvido através de análise numérica.
- 3ª etapa (Pós-processamento): os resultados são apresentados através de gráficos (linhas equipotenciais) e os resultados numéricos (fluxo, campo, forças, indutância, entre outros) são calculados e apresentados ao usuário.

2.2 MODELAGEM DOS ISOLADORES E CAVIDADES INTERNAS

Com o auxílio do software ISee! (2010) foi possível obter, das imagens de raio X, as dimensões e posições das cavidades existentes nas 85 unidades analisadas. Para a reprodução das cavidades em 3D foram utilizadas as vistas frontal e superior das unidades, como ilustrado na Figura 2.4. Algumas unidades do tipo X não possuíam a imagem superior e por isso as cavidades foram reproduzidas em 2D. Todos os isoladores do tipo Y, que apresentavam cavidades internas, também tiveram suas cavidades reproduzidas em 2D, pois suas vistas superiores não possibilitaram a visualização da cavidade.

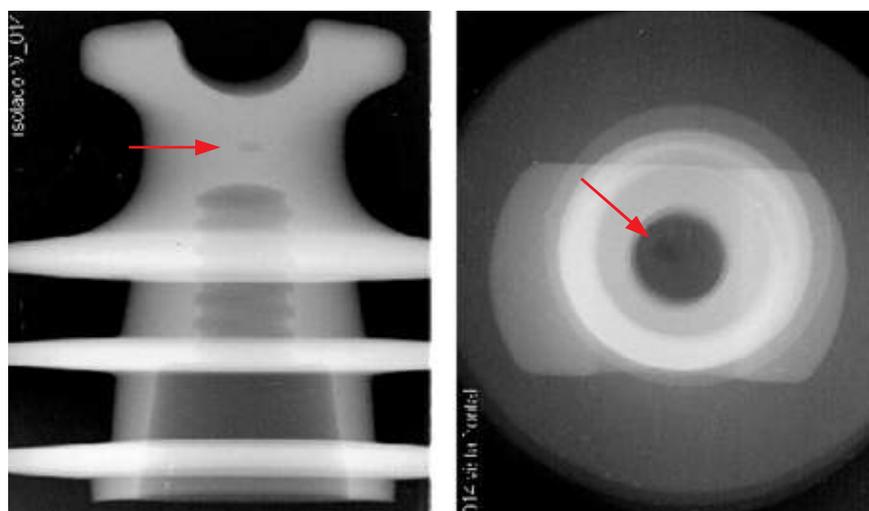


Figura 2.4 – Imagem de raio X de um dos isoladores estudados.

Os isoladores, em 2D e 3D, foram desenhados com o auxílio do software AutoCAD® (2010) e importado para o COMSOL® (2012) através da interface LiveLink™ AutoCAD®. A Figura 2.5(a) ilustra o modelo em 3D do isolador utilizado nas simulações sem cavidade interna. A Figura 2.5(b) e Figura 2.5(c) ilustram os modelos em 2D. Para

facilitar a manipulação das geometrias, o isolador e o pino foram importados como geometrias independentes. Essa distinção permitiu criar seleções com apenas os pontos, domínios ou linhas que compõem aquela geometria.

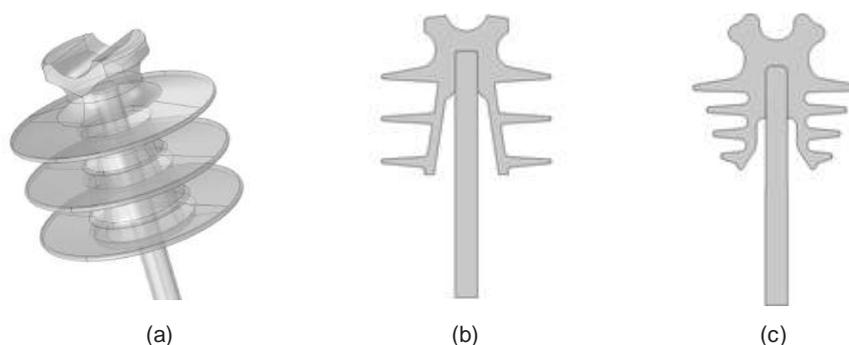


Figura 2.5 – Modelo dos isoladores desenhados com o auxílio do AutoCAD. (a) tipo X em 3D (b) tipo X em 2D e (c) tipo Y em 2D.

As cavidades analisadas apresentam, em sua maioria, forma elipsoidal. Logo, foram extraídas as dimensões dos semi-eixos (a, b e c) para a construção das elipses (semi-eixo $c=0$, não existente), no caso dos isoladores em 2D, e elipsoides, no caso de isoladores em 3D. Devido ao diferentes posicionamentos e rotações das cavidades existentes nas amostras, os semi-eixos foram relacionados com os eixos x, y e z. A Figura 2.6 ilustra a relação adotada para a construção das cavidades em 2D. Para que as cavidades fossem posicionadas de forma fiel foram extraídos os valores x' , y' e z' do centro da geometria, indicando a posição da cavidade em relação aos eixos x, y e z respectivamente. Para as imagens em 2D, $z'=0$. Na Tabela 2.1 podem ser visualizados os valores encontrados para cada unidade polimérica.

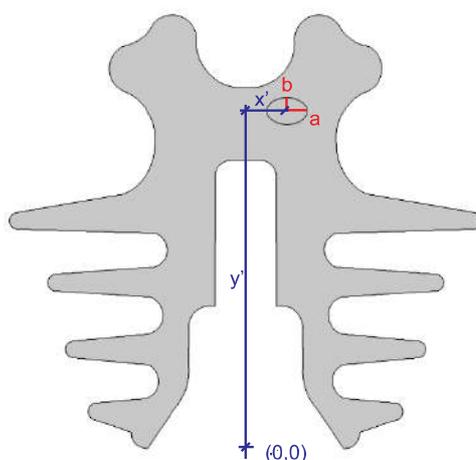


Figura 2.6 – Representação dos eixos (posicionamento) e semi-eixos de uma cavidade genérica.

Tabela 2.1 – Dimensões dos eixos das cavidades e seus respectivos posicionamentos.

(continua)

Identificação das amostras	Semi- eixos em [mm]			Posição no interior do isolador em [mm]		
	a (largura)	b (altura)	c (profundidade)	x'	y'	z'
X003	3,175	1,590	-----	3,855	108,265	-----
X004	3,705	1,720	-----	7,255	109,595	-----
X014	3,175	1,325	3,190	4,055	109,595	4,555
X015	3,840	1,720	3,310	-0,445	109,325	0,955
X016	4,110	1,720	3,440	2,755	109,855	-0,745
X020	3,995	1,460	3,315	2,055	109,895	1,655
X021	3,445	1,720	2,120	9,655	109,595	-0,945
X023	4,505	1,720	3,445	-2,845	110,665	1,155
X026	3,570	1,325	2,790	-0,645	110,165	1,855
X027	2,38	1,325	2,115	0,955	109,065	-3,045
X034	2,515	1,455	2,250	3,855	109,325	-0,145
X036	4,235	1,720	3,310	-5,145	110,365	0,155
X037	4,100	1,590	2,910	-2,045	110,165	4,355
X039	2,250	1,455	1,850	-4,345	109,595	2,755
X040	2,910	1,590	2,260	-1,245	109,595	3,355
X042	2,115	1,190	1,855	-2,545	108,795	-2,545
X044	1,720	1,190	1,455	-0,145	108,265	-0,445
X066	2,910	1,590	3,180	-0,945	109,855	-1,545
X072	4,365	1,850	4,235	3,055	110,865	1,755
X074	2,910	1,590	2,515	2,455	109,855	0,955
X084	4,895	1,850	3,730	-1,245	111,465	2,355
X087	3,705	1,720	3,350	-3,345	110,365	-1,745
X089	3,570	1,455	2,390	1,955	109,595	-1,545
X090	3,440	1,590	3,310	1,655	109,855	-0,145
X093	3,835	1,850	4,765	2,455	110,365	0,855
X095	4,365	1,720	3,440	4,655	110,965	-1,245
X097	2,910	1,325	2,780	-4,645	110,165	-0,445
X098	4,895	1,850	3,590	-3,545	110,665	2,955
X100	4,765	1,720	3,315	-3,045	110,165	-3,945
X106	1,590	1,190	1,455	-6,545	109,325	-3,845
X107	2,780	1,455	2,650	-0,945	109,595	-3,945
X114	5,150	1,325	3,175	0,855	110,465	0,955
X123	2,250	1,325	1,610	2,155	108,795	-2,045
X128	3,175	1,720	2,595	-0,445	109,595	1,955
X131	2,115	1,190	1,590	3,255	109,595	-0,145
X133	2,910	1,455	2,230	5,955	107,735	-0,145
X137	3,440	1,325	1,935	-1,245	109,065	1,455
X139	3,310	1,190	2,810	-3,645	109,065	2,455

Tabela 2.1 – Dimensões dos eixos das cavidades e seus respectivos posicionamentos.

(continuação)

Identificação das amostras	Semi-eixos em [mm]			Posição no interior do isolador em [mm]		
	a (largura)	b (altura)	c (profundidade)	x'	y'	z'
X140	2,780	1,720	2,295	4,055	109,595	0,155
X142	3,045	1,465	2,645	5,155	107,775	0,655
X145	3,310	1,325	3,180	-1,245	109,865	-0,445
X147	3,175	1,325	1,59	6,155	109,065	-0,445
X149	1,720	1,325	2,115	-1,445	107,735	-1,245
X158	1,850	1,060	1,590	-0,945	109,065	4,855
X165	3,570	1,590	3,045	1,955	110,365	0,355
X167	5,050	1,850	2,960	-0,145	109,855	2,655
X168	2,645	1,060	1,195	0,955	109,855	1,455
X173	4,105	1,455	3,120	2,255	109,595	-2,545
X181	4,115	1,195	2,780	-1,345	109,325	-4,345
X183	4,635	1,875	2,990	4,855	110,665	-0,445
X186	3,045	1,325	1,855	-1,245	109,335	0,655
X187	4,235	1,590	3,310	-0,145	108,795	3,555
X189	2,250	0,925	2,475	-3,845	109,595	3,555
X190	4,100	1,455	2,385	0,155	109,855	-3,845
X193	3,710	1,590	2,910	1,655	109,865	-5,245
X194	2,645	1,190	1,850	-1,245	110,165	4,055
X196	2,655	1,060	1,845	-0,445	109,855	5,155
X199	3,575	1,325	3,045	2,255	109,345	2,455
Y02	1,455	1,850	-----	12,279	101,089	-----
Y13	2,250	1,325	-----	13,279	90,989	-----
Y20	2,910	1,325	-----	6,479	101,289	-----
Y22	1,985	1,720	-----	10,379	102,889	-----
Y29	1,325	1,325	-----	11,979	98,389	-----
Y30	1,325	1,855	-----	12,279	98,889	-----
Y31	2,250	1,325	-----	9,879	96,789	-----
Y32	1,720	1,985	-----	12,479	97,089	-----
Y33	0,795	0,930	-----	-2,021	103,189	-----
Y35	1,720	1,455	-----	13,079	98,089	-----
Y36	0,950	1,190	-----	13,079	99,289	-----
Y37	1,590	1,590	-----	13,079	97,589	-----
Y38	1,325	0,795	-----	-11,521	96,489	-----
Y39	0,660	1,060	-----	13,279	97,389	-----
Y40	1,325	1,720	-----	12,479	98,889	-----
Y41	1,850	1,590	-----	12,479	97,589	-----
Y42	1,710	1,605	-----	14,579	99,089	-----
Y43	1,720	0,795	-----	11,179	97,389	-----

Tabela 2.1 – Dimensões dos eixos das cavidades e seus respectivos posicionamentos.

(conclusão)

Identificação das amostras	Semi- eixos em [mm]			Posição no interior do isolador em [mm]		
	a (largura)	b (altura)	c (profundidade)	x'	y'	z'
Y44	1,060	1,065	-----	12,179	98,689	-----
Y45	1,325	1,190	-----	10,979	96,589	-----
Y47	1,590	1,460	-----	11,179	95,769	-----
Y49	1,720	1,460	-----	12,279	97,089	-----
Y50	1,060	0,930	-----	11,979	98,489	-----
Y51	1,720	1,325	-----	10,179	96,589	-----
Y52	1,330	1,330	-----	14,279	99,789	-----
Y53	1,455	1,325	-----	12,779	97,889	-----
Y54	1,855	1,860	-----	13,899	97,389	-----

2.3 CÁLCULO DOS ESTRESSES ELÉTRICOS APLICADOS AOS ISOLADORES

Devido à grande quantidade de amostras a serem simuladas, foi utilizado o COMSOL[®] (2012) em conjunto com o MATLAB[®] (2010), através da interface LiveLink[™] MATLAB[®], para que as informações fossem preenchidas de forma automática e seus resultados armazenados e comparados com o valor de campo calculado através da curva de Paschen. Essa comparação é realizada na etapa final da simulação para cada unidade, onde o MATLAB[®] (2010) calcula, através das equações que serão apresentadas no próximo capítulo, o estresse máximo suportado para cada configuração cavidade-isolador e compara com o valor de campo obtido através do COMSOL Multiphysics[®] (2012).

Com o auxílio do MATLAB[®] (2010) foram construídas as demais geometrias para compor a simulação. Estas geometrias são o condutor, a cavidade e a caixa de ar para compor os limites do sistema considerado. A Figura 2.7 ilustra um dos modelos em 2D completo. Os parâmetros considerados para construção das geometrias, incluindo as características dos materiais utilizados, são apresentados a seguir (o pino e o condutor foram associados a materiais existentes na biblioteca do COMSOL Multiphysics[®] (2012)):

- Condutor de cobre: raio do conduto $r = 9,15$ mm (na simulação em 3D apresenta comprimento de 400 mm);

- caixa de ar (apresenta lado com 300 mm na simulação em 2D e lado com 1000 mm para simulação em 3D);
- cavidade interna com dimensão variável em cada simulação;
- permissividade relativa do ar ($\epsilon_r = 1$);
- permissividade relativa do material isolante, Polietileno de Alta Densidade (PEAD), ($\epsilon_r = 2,4$) (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003);
- pino de aço.

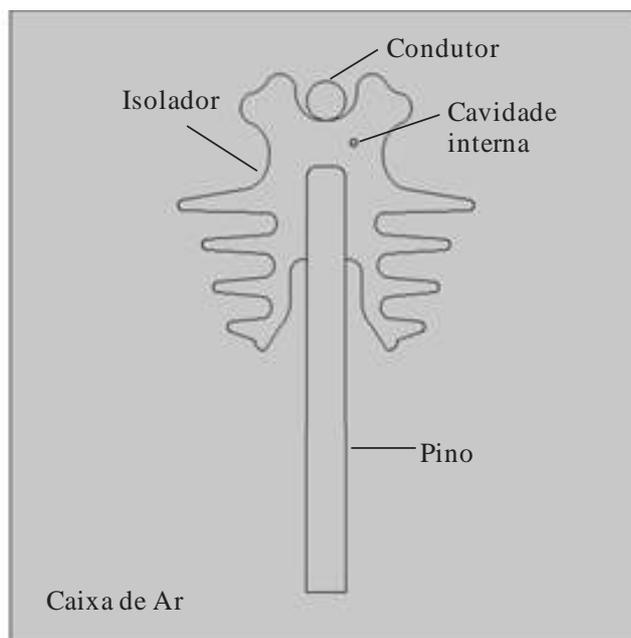


Figura 2.7 – Modelo do isolador simulado em 2D com todas as geometrias do modelo.

As simulações foram realizadas para a tensão (pico) de 3 pu fase-terra, já que o banco de dados para 3,5 pu foi descartado por excesso de corona. Ao pino foi atribuída a tensão de 0 V. Com todos os parâmetros definidos foi gerada a malha, ilustrada na Figura 2.8. É possível ver que a geometria do isolador foi fielmente reproduzida pela malha. No entanto, o nível de refinamento escolhido, para o modelo em 3D, não foi suficiente para representar a geometria da cavidade fielmente, portanto optou-se por aplicar um refinamento maior apenas na região onde a cavidade está presente, já que, aplicando este refinamento a todo o modelo provocaria um aumento desnecessário ao tempo de processamento e uma possível propagação de erros. A Figura 2.9 ilustra as duas situações, na Figura 2.9(a) é mostrada a cavidade representada de forma grosseira, já na Figura 2.9(b) a cavidade está representada de forma fiel, após a melhoria no refinamento.

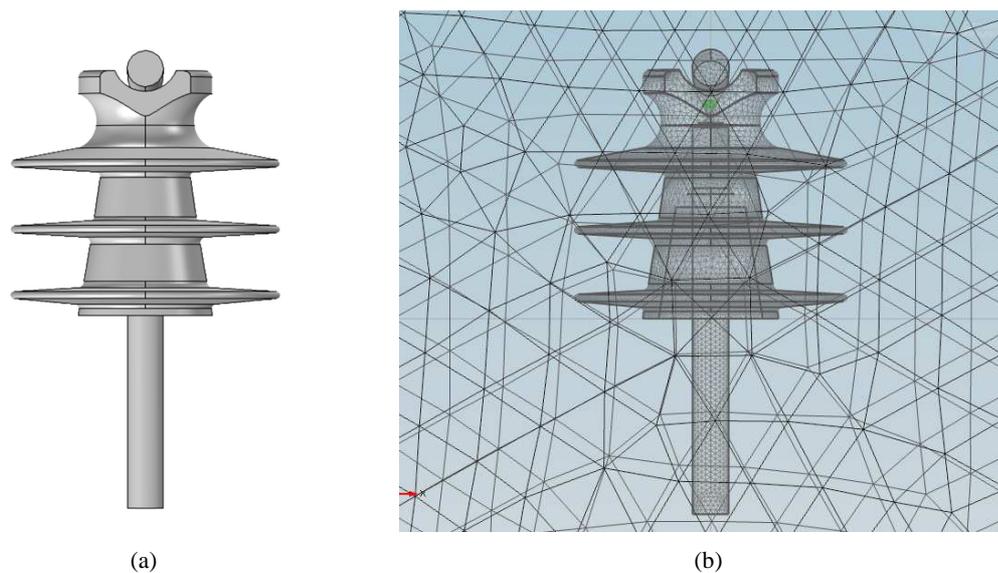


Figura 2.8 – Comparação entre a geometria original (a) e a malha criada (b).

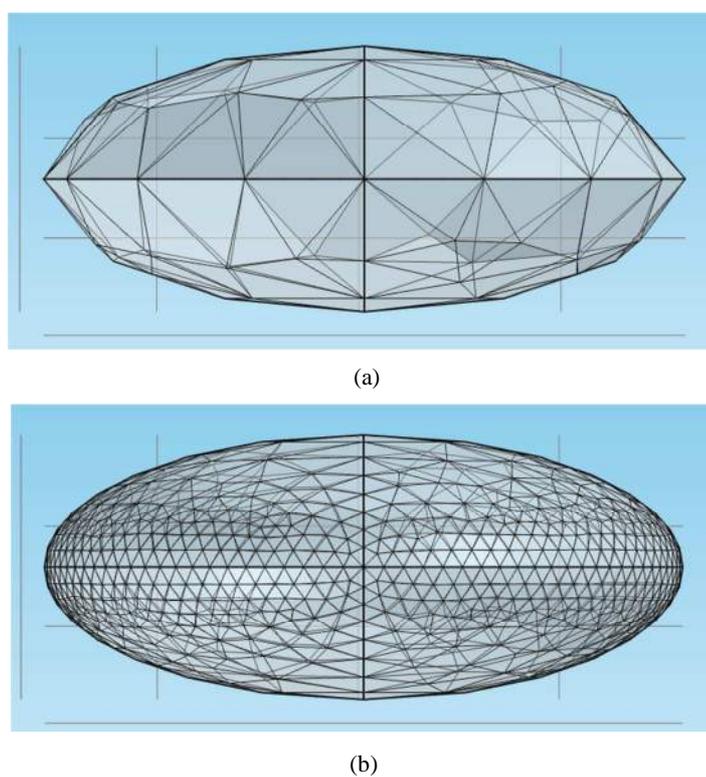


Figura 2.9 – Malha criada nas cavidades em 3D: (a) aproximação grosseira da geometria; (b) aproximação refinada da geometria.

Depois de definido todos os itens necessários ao processamento do MEF, o estudo foi concluído e os resultados foram armazenados para comparação com o estresse máximo suportado sem que ocorra ruptura, regida pela curva de Paschen, assunto que será apresentado no capítulo a seguir.

3

DESCARGAS PARCIAIS EM CAVIDADE PREENCHIDA POR UM GÁS

O gás em seu estado normal é considerado praticamente um isolante ideal. No entanto, quando se aplica uma tensão elevada (tensão de ruptura) entre dois eletrodos imersos em um meio gasoso, o gás se torna um condutor e uma descarga elétrica se inicia (NAIDU; KAMARAJU, 1995). Os processos responsáveis por iniciar essas descargas no gás são a ionização por colisões e a fotoionização, considerando que um campo elétrico seja aplicado e sua intensidade seja superior ao valor máximo suportado pelo gás. A tensão de ruptura (V_r) é calculada através da Lei de Paschen associada a um mecanismo de ruptura do gás. Existem dois mecanismos muito utilizados para explicar o processo da descarga elétrica em um gás, o Método de Avalanche de Townsend e o Método do Canal (Streamer). Essa dissertação irá abordar apenas o método da Avalanche de Townsend, que através de experimentos para geração de descargas no ar teve a sua validade comprovada para campos uniformes e valores do produto entre pressão e distância dos eletrodos (pd) para valores de até 15 kPa.m (ALSTON, 1968, BARTINIKAS, 2002, ABDEL-SALAM; STANEK, 1988). As cavidades estudadas apresentam pd com valores muito inferiores a 15 kPa.m, logo o método de Townsend pode ser aplicado aos experimentos realizados.

3.1 IONIZAÇÃO POR COLISÕES

A avalanche de elétrons geralmente é formada por colisões de elétrons que produzem novos íons e elétrons (avalanche de Townsend) e continua como uma descarga transitória até que a descarga se mantenha (MEEK; CRAGGS, 1953). Devido ao gradiente de potencial um elétron livre é acelerado e se ele ganhar velocidade suficiente até colidir com um átomo, esse átomo pode perder um elétron e se tornar um íon. Com a continuidade do

processo, serão produzidos vários elétrons livres e quando a quantidade de elétrons e de íons for suficiente, o gás, que é isolante, passará a conduzir ocorrendo uma descarga parcial entre os eletrodos. Esse primeiro elétron livre que dá início ao processo pode ser gerado através de radiação cósmica ou por fotoionização, por exemplo (BARTINIKAS, 1979).



onde,

$A \rightarrow$ átomo;

$A^{+} \rightarrow$ íon positivo;

$e^{-} \rightarrow$ elétron gerado.

3.2 FOTOIONIZAÇÃO

Uma molécula em seu estado fundamental pode ser ionizada por um fóton, minúscula partícula elementar presente na onda eletromagnética, quando a radiação absorvida pelo átomo ou molécula excede o seu potencial de ionização (NAIDU; KAMARAJU, 1995, LUCAS, 2001). Ou seja,

$$h\nu > E_i, \quad (3.2)$$

onde,

$\nu \rightarrow$ Frequência do fóton;

$h \rightarrow$ Constante de Plank ($h = 6,624 \times 10^{-34}$ joule).

Uma vez satisfeita essa condição, a geração do primeiro elétron ocorre. A equação (3.3) representa a reação do processo (LUCAS, 2001).



onde,

$M \rightarrow$ Molécula;

M^+ → Íon positivo;
 e^- → elétron gerado.

3.3 PRIMEIRO COEFICIENTE DE TOWNSEND

Townsend, em seus estudos, verificou que com o aumento da tensão, a corrente aumenta até próximo de um valor I_0 e se mantém praticamente constante, como pode ser visualizado na Figura 3.1. A corrente I_0 corresponde a corrente produzida pelo catodo por radiação externa. Para tensões superiores a V_2 a corrente aumenta acima desse valor I_0 a uma taxa que rapidamente aumenta com a tensão até que a descarga ocorre. Esse aumento da corrente foi atribuído por Townsend ao processo de ionização do gás por colisão de elétrons (MEEK; CRAGGS, 1953,).

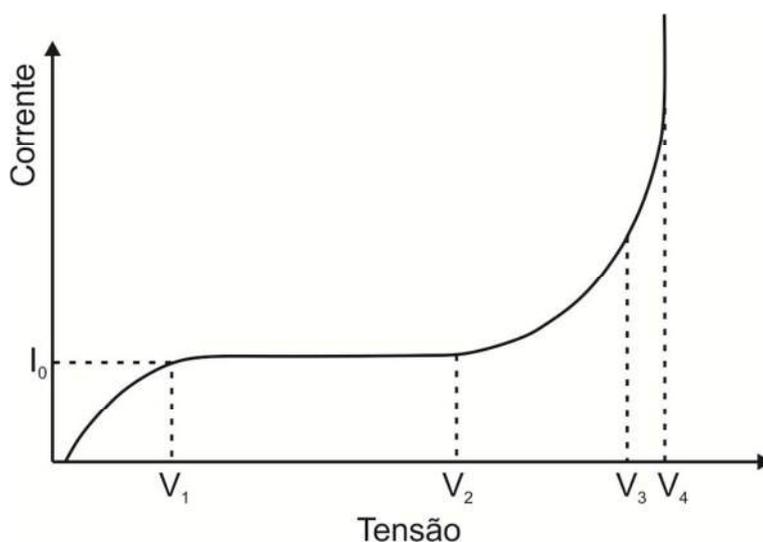


Figura 3.1 – Variação da corrente como função da tensão. Fonte: (MORSHUIS, 1993).

Para explicar esse aumento da corrente Townsend introduziu uma constante, denominada de primeiro coeficiente de Townsend (α), que é definido como sendo a quantidade de elétrons produzidos no caminho de um elétron percorrendo a distância de 1 cm na direção do campo elétrico, e seu valor depende do tipo de gás no interior da cavidade (MEEK; CRAGGS, 1953, NAIDU; KAMARAJU, 1995, KUFFEL, 2002). Considerando n como sendo o número de elétrons em uma distância x do catodo na direção do campo, Figura 3.2, o aumento da quantidade de elétrons, dn , em uma distância adicional, dx , é dada por (KUFFEL, 2002, WADHWA, 2007):

$$dn = \alpha dx \quad (3.4)$$

onde,

α → primeiro coeficiente de Townsend;

Integrando ao longo da distância do cátodo para o ânodo, obtém-se:

$$n = n_0 e^{\alpha d}, \quad (3.5)$$

onde,

n_0 → número de elétrons primários gerados no catodo.

Reescrevendo a equação (3.5) em função da corrente chega-se a:

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (3.6)$$

onde,

I → corrente da descarga [A];

I_0 → corrente inicial gerada pelo catodo [A];

d → distancia entre eletrodos [mm];

O termo $e^{\alpha d}$ é conhecido como elétron de avalanche e representa o número de elétrons produzidos por um elétron viajando do catodo para o anodo.

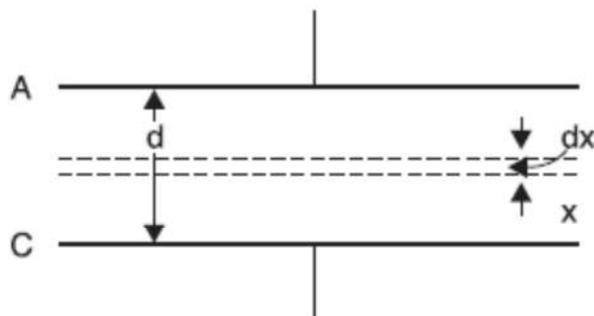


Figura 3.2 – Eletrodos de placas paralelas. Fonte: (WADHWA, 2007).

Diversas medições de α foram executadas por diversos pesquisadores e essas medições mostraram que α/p , onde p é a pressão exercida sobre o gás, é uma função dependente de E/p , onde E é o campo elétrico aplicado (MEEK; CRAGGS, 1953). Essa relação é mostrada na equação (3.7) (KUFFEL, 2002, SANDIA NATIONAL LABORATORIES, 2003):

$$\frac{\alpha}{p} \approx Fe^{-Gp/E} \quad (3.7)$$

Alguns dos valores experimentais das constantes de ionização F e G para vários gases estão listados na Tabela 3.1. Com esses valores é possível obter, através da equação (3.7), a relação α/p válidas para as faixas de E/p apresentadas. No caso das cavidades apresentadas nesta dissertação é considerado que o gás presente em seu interior é o ar atmosférico. Essa suposição é feita devido ao seu processo de fabricação, explanado no Capítulo 1.

Tabela 3.1 – Constantes de ionização F e G ($T=20^\circ\text{C}$).

<i>Gás</i>	<i>F</i> [cm ⁻¹ Torr ⁻¹]	<i>G</i> [Vcm ⁻¹ Torr ⁻¹]	<i>Faixa de E/p</i> [Vcm ⁻¹ Torr ⁻¹]
H ₂	5	130	150-600
N ₂	12	342	100-600
Ar atmosférico	15	365	100-800
CO ₂	20	466	500-1000
He	3	34	20-150
Hg	20	370	200-600

Fonte: adaptada de (KUFFEL, 2002).

3.4 Segundo Coeficiente de Townsend

Multiplicando os dois membros da equação (3.6) pelo logaritmo neperiano obtém-se:

$$\ln I = \ln I_0 + \alpha d \quad (3.8)$$

Plotando um gráfico utilizando a equação (3.8), deveria ser encontrado uma reta com inclinação α , onde para uma dada pressão (p) o campo elétrico (E) permanece constante. No entanto, os experimentos de Townsend indicaram uma não linearidade na curva, como ilustrado na Figura 3.3. Foi observado que para tensões mais elevadas a corrente aumentava a uma taxa maior que a dada pela equação (3.8). Para explicar esse afastamento da linearidade Townsend sugeriu que um segundo mecanismo deveria estar afetando a corrente e postulou que essa corrente adicional devia-se a presença de íons positivos e fótons. Os íons positivos iriam liberar elétrons por colisão com as moléculas do gás e por bombardeamento contra o catodo, ocorrendo de forma similar com os fótons (KUFFEL, 2002, WADHWA, 2007).

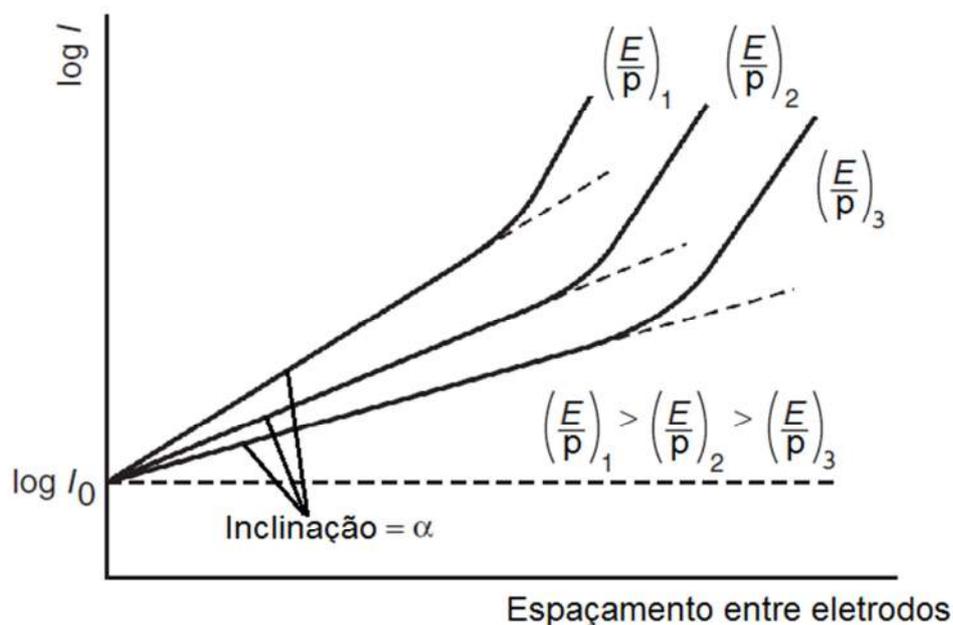


Figura 3.3 – Variação da corrente na cavidade em função do espaçamento dos eletrodos em campo uniforme. Fonte: (KUFFEL, 2002, WADHWA, 2007).

Considerando o fenômeno da descarga autossustentada, onde os elétrons são liberados do catodo por bombardeamento de íons positivos (KUFFEL, 2002, WADHWA, 2007), têm-se:

$$n' = (n_u + n_+)e^{\alpha d} \quad (3.9)$$

$$n_+ = \gamma[n' - (n_u + n_+)] \quad (3.10)$$

onde,

n_u → número de elétrons liberados do catodo por radiação ultravioleta;

n_+ → número de elétrons liberados do catodo por bombardeamento de íons positivos;

n' → número de elétrons que chegam ao anodo;

γ → segundo coeficiente de Townsend (que é definido como o número de elétrons liberados do catodo por um íon positivo incidente).

Substituindo a equação (3.10) na equação (3.9), obtém-se:

$$n' = \frac{n_u e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (3.11)$$

Reescrevendo a equação (3.11) em função da corrente:

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (3.12)$$

O segundo coeficiente de Townsend pode ser obtido pela equação (3.12) através de medições da corrente na cavidade para vários valores de pressão, campo elétrico e espessura da cavidade (MEEK; CRAGGS, 1953, HUSAIN, NEMA, 1982). O seu valor varia com E/p e também com o material do eletrodo, a Figura 3.4 ilustra a situação. Para um mesmo gás, nas mesmas condições de temperatura e pressão, variando apenas o material que constitui o catodo existe um valor de γ correspondente (MEEK; CRAGGS, 1953).

3.5 O MECANISMO DE TOWNSEND

Quando a tensão entre o catodo e o anodo aumenta, a corrente, que é dada pela equação (3.12), também cresce até que ocorra uma descarga autossustentada. Neste ponto a corrente se torna indeterminada (muito elevada) e o denominador da equação (3.12) tende a zero (KUFFEL, 2002, WADHWA, 2007), logo:

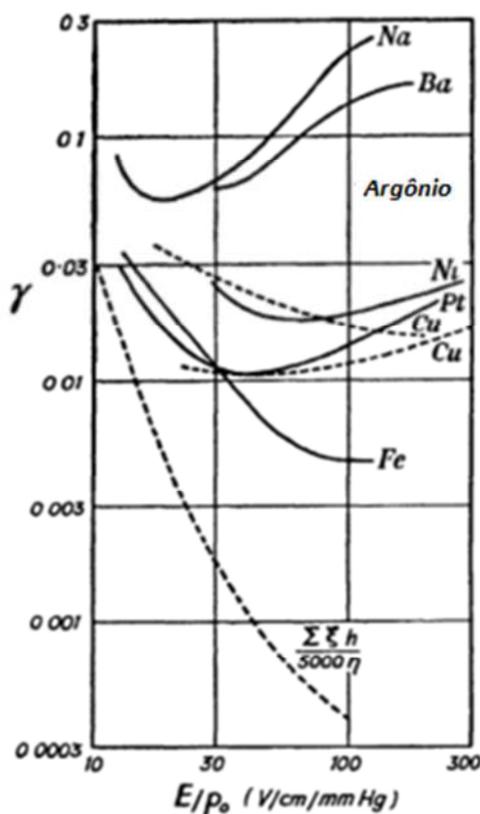


Figura 3.4 – Valores de γ para o Argônio com diferentes materiais no cátodo. Fonte: (MEEK; CRAGGS, 1953)

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1. \quad (3.13)$$

Reescrevendo a equação (3.13):

$$\alpha d = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) = K \quad (3.14)$$

A equação (3.13) é conhecida como o critério de Townsend para a ocorrência de descarga. Logo, a tensão de ruptura de um gás é função da distância entre os eletrodos, d , e dos coeficientes de Townsend, α e γ . As descargas que acontecem no interior das cavidades rodeadas por um material dielétrico, como ilustrado na Figura 3.5, ocorrem aproximadamente à mesma tensão aplicada entre eletrodos metálicos igualmente espaçados (KREUGER, 1989, MORSHUIS, 1993). Logo a teoria abordada neste capítulo pode ser aplicada as cavidades, considerando a espessura ou altura da cavidade, b , igual ao espaçamento dos eletrodos, d .

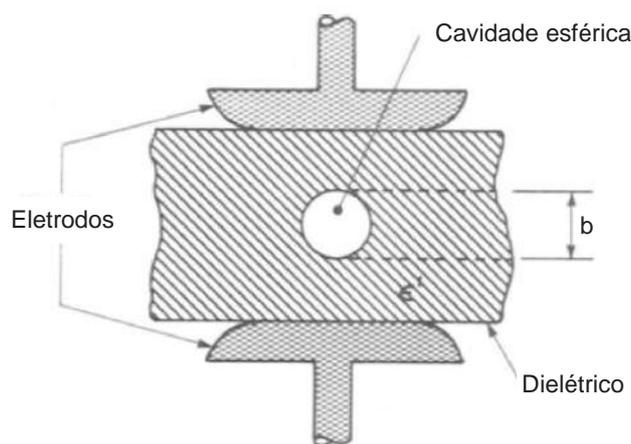


Figura 3.5 – Cavidade esférica no interior de um dielétrico.
 Fonte: (BARTINIKAS; McMAHON, 1979).

3.6 LEI DE PASCHEN

Nas Seções 3.3 e 3.4 foi mostrado que os coeficientes de Townsend são dependentes da relação E/p (NAIDU; KAMARAJU, 1995, ABDEL-SALAM et al., 2000), ou seja:

$$\frac{\alpha}{p} = f_1\left(\frac{E}{p}\right) \quad (3.15)$$

$$\gamma = f_2\left(\frac{E}{p}\right) \quad (3.16)$$

Substituindo a equação (3.15) na equação (3.14):

$$f_1\left(\frac{E}{p}\right) pd = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) = K \quad (3.17)$$

Como $E = V_r/d$, substituindo E na equação (3.17), chega-se a:

$$f_1\left(\frac{V_r}{d}\right) pd = K \quad \text{ou} \quad V_r = F(pd) \quad (3.18)$$

A equação (3.18) mostra a relação que existe entre a tensão de ruptura (V_r) e o produto pressão (p) e distância entre eletrodos (d), o que implica dizer que a tensão de

ruptura varia com o produto pd . Esta relação é conhecida como a Lei de Paschen. A Figura 3.6, ilustra o comportamento da curva dada pela equação (3.18). Analisando a curva é possível visualizar um ponto de mínimo, onde a tensão de ruptura, para um valor específico do produto pd (pd_{\min}), apresenta um valor mínimo ($V_{r\min}$), que indica o máximo estresse que o gás pode ser submetido sem que venha a sofrer ruptura (NAIDU; KAMARAJU, 1995, KUFFEL, 2002). Uma expressão analítica pode ser obtida para a tensão de ruptura, reescrevendo a equação (3.7):

$$d \cdot \frac{1}{\alpha d} = \frac{e^{Gpd/V_r}}{pF} \quad (3.19)$$

Substituindo a equação (3.14) na equação (3.19):

$$d = \frac{e^{Gpd/V_r}}{pF} \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (3.20)$$

Assumindo que γ é constante, $\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) = K$:

$$d = \frac{e^{Gpd/V_r}}{pF} K \quad (3.21)$$

Reorganizando a equação (3.21) e multiplicando os dois lados por \ln , obtém-se:

$$V_r = \frac{Gpd}{\ln Fpd/K} \quad (3.22)$$

Diferenciando a equação (3.22) em relação à pd e igualando a zero, chega-se a:

$$V_{r(\min)} = 2,718 \frac{G}{F} \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (3.23)$$

O mesmo procedimento é realizado para encontrar $pd_{(\min)}$:

$$pd_{(\min)} = \frac{e}{F} \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (3.24)$$

A Tabela 3.2 apresenta a tensão mínima de ruptura para diversos gases, ou seja, apresenta o ponto de mínimo da curva de Paschen.

Tabela 3.2 – Tensão mínima de ruptura para vários gases.

Gás	$V_{r \min}$ [V]	pd_{\min} [Pa.m]
Ar atmosférico	327	0,754
Ar	137	1,197
H ₂	273	1,530
He	156	5,320
CO ₂	420	0,678
N ₂	251	0,891
O ₂	450	0,931

Fonte: adaptada de (ABDEL-SALAM et al., 2000).

Se os valores de F e G são conhecidos o valor da tensão mínima de ruptura pode ser calculado (KUFFEL, 2002). Como γ varia com o material do catodo, a equação (3.22) não será aplicada nesta dissertação, pois o exato valor do segundo coeficiente de Townsend para o material, ao qual o catodo utilizado foi fabricado, não foi localizado.

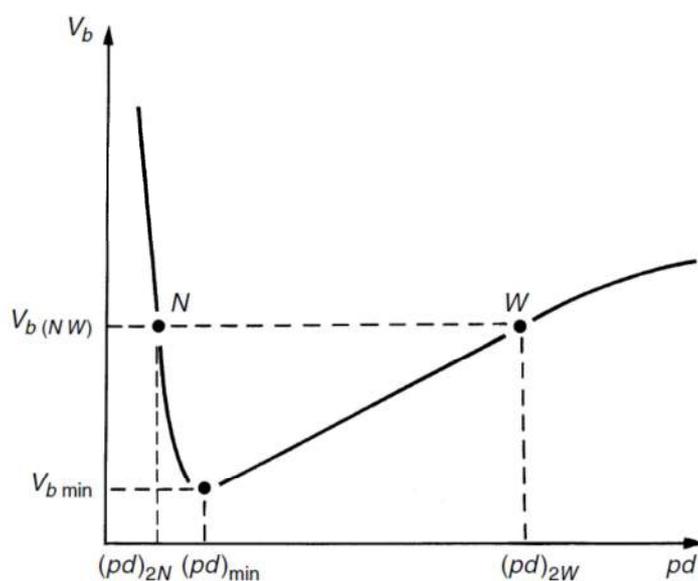


Figura 3.6 – Curva de Paschen. Fonte: (KUFFEL, 2002)

3.6.1 Aproximações para a curva de Paschen para o Ar atmosférico

Schumann sugeriu uma formulação quadrática entre α/p e E/p sobre um campo uniforme para uma ampla gama de valores de campo elétrico (KUFFEL, 2002, WADHWA, 2007):

$$\frac{\alpha}{p} = C \left[\frac{E}{p} - \frac{E_C}{p_C} \right]^2, \quad (3.25)$$

onde,

$C \rightarrow$ constante;

$E \rightarrow$ estresse elétrico;

$E_C \rightarrow$ estresse elétrico onde a ionização começa.

Dividindo a equação (3.25) por pd e substituindo a equação (3.14) na equação (3.25):

$$\frac{K}{pd} = C \left[\frac{E}{p} - \frac{E_C}{p_C} \right]^2 \quad (3.26)$$

Reescrevendo a equação (3.26):

$$\frac{E}{p} = \frac{E_C}{p_C} + \sqrt{\frac{K/C}{pd}} \quad (3.27)$$

E a equação para calcular a tensão de ruptura se torna:

$$V_r = \left(\frac{E_C}{p_C} \right) pd + \sqrt{\frac{K}{C}} \sqrt{pd} \quad (3.28)$$

Utilizando as constantes ($K/C = 45,16 \text{ kV}^2/\text{cm}$ e $E_C = 24,36 \text{ kV/cm}$) determinadas por Sohst e Schroder para campos homogêneos a uma pressão (p_C) igual a 1bar, temperatura igual a 20°C, (KUFFEL, 2002, WADHWA, 2007), a equação (3.28) apresenta a seguinte forma:

$$V_r = 6,72\sqrt{pd} + 24,36pd \text{ [kV]} \quad (3.29)$$

A tensão de ruptura calculada pela equação (3.29) para eletrodos separados por ar e campo uniforme para uma faixa de pd de 10^{-2} a 5×10^2 bar.cm (pontos pretos) é comparada com dados experimentais disponíveis na Figura 3.7. Os dados calculados através da equação (3.29) estão em acordo com os dados medidos e apresentados pela curva, exceto para valores muito baixos do produto pd . Nesta região, onde a relação E/p são maiores que os apresentados pela equação de Schumann, equação (3.25), ela não se aplica, mas estes valores são de pouco interesse prático, sendo considerada uma aproximação válida (KUFFEL, 2002).

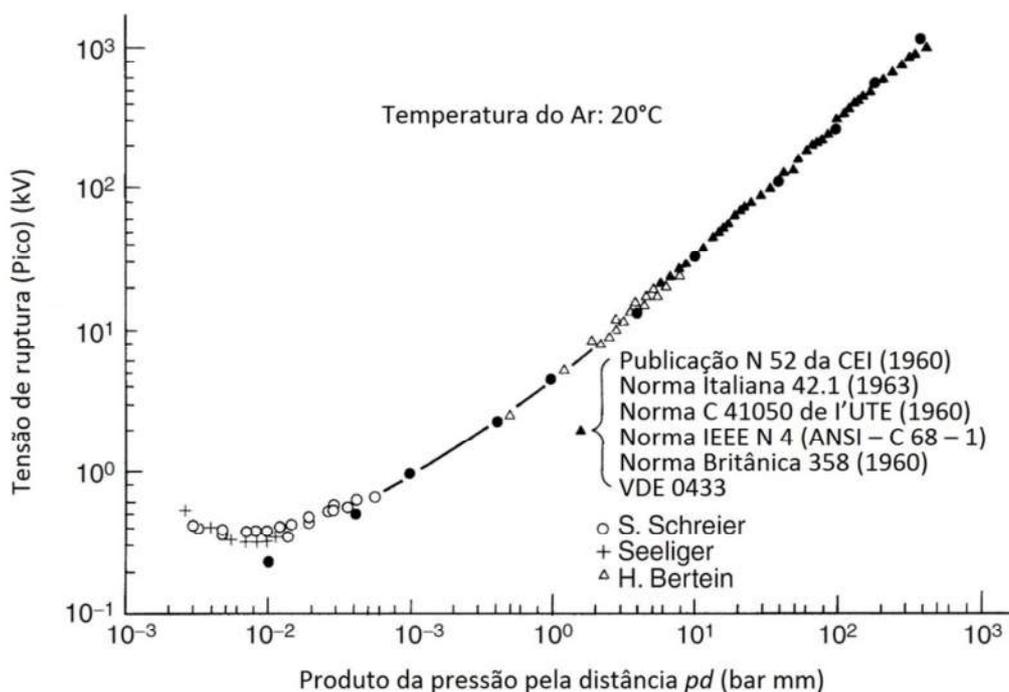


Figura 3.7 – Curva de Paschen para o ar atmosférico. Fonte:(DAKIN, 1974).

Devido à variação de temperatura e pressão existente em diversos lugares no mundo, a pressão é normalmente substituída na equação (3.29) pela densidade do gás (δ), correção de Peek, (NAIDU; KAMARAJU, 1995, KUFFEL, 2002, WADHWA, 2007, SILI; KOLIATENE; CAMBRONNE, 2011):

$$\delta = \frac{p}{760} \times \frac{293}{273+t} \quad (3.30)$$

onde,

$t \rightarrow$ temperatura ambiente [$^{\circ}\text{C}$];

$p \rightarrow$ pressão [torr].

Dessa forma, a equação (3.29) passa a ter a seguinte expressão:

$$V_r = 6,72\sqrt{\delta d} + 24,36\delta d \text{ [kV]} \quad (3.31)$$

E o estresse elétrico passa a ser calculado por:

$$E_r = \frac{V_r}{d} = 24,36 \delta + 6,72 \sqrt{\frac{\delta}{d}} \text{ [kV/cm]} \quad (3.32)$$

Em seu livro, MEEK e CRAGGS (1953), apresentam outros valores experimentais para o campo E_c e a relação K/C , a Figura 3.8 ilustra a variação entre as curvas geradas para pressão e temperatura constantes. Devido a essa variação serão utilizadas na simulação as constantes de Schumann ($E_c = 24,36 \text{ kV/cm}$ e $\sqrt{K/C} = 6,72 \text{ kV}^2/\text{cm}$) e as constantes de Bruce ($E_c = 24,22 \text{ kV/cm}$ e $\sqrt{K/C} = 6,08 \text{ kV}^2/\text{cm}$). Outra formulação para o cálculo do estresse máximo suportado E_r sem que venha a ocorrer à ruptura do gás foi sugerida por MALIK et al. (1987):

$$\frac{E_r}{p} = A' + \frac{B'}{(pd)^L} \text{ [kV/kPa.m]} \quad (3.33)$$

onde, A' , B' e L são constantes e seus valores podem ser visualizados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3– Constantes A' , B' e L para cálculo de E_r/p no ar atmosférico.

A' [kV/kPa.m]	B' [kV]	L	Variação do produto pd [kPa.m]
0	$2,789 \times 10^{-10}$	3,523	$9 \times 10^{-5} \leq pd \leq 2 \times 10^{-4}$
329,39	$12,077 \times 10^{-6}$	2,249	$2,3 \times 10^{-4} \leq pd \leq 8 \times 10^{-4}$
30,25	3,12	0,675	$9 \times 10^{-4} \leq pd \leq 0,6$
23,24	8,464	0,405	$0,7 \leq pd \leq 36$

Fonte: (MALIK et al., 1987).

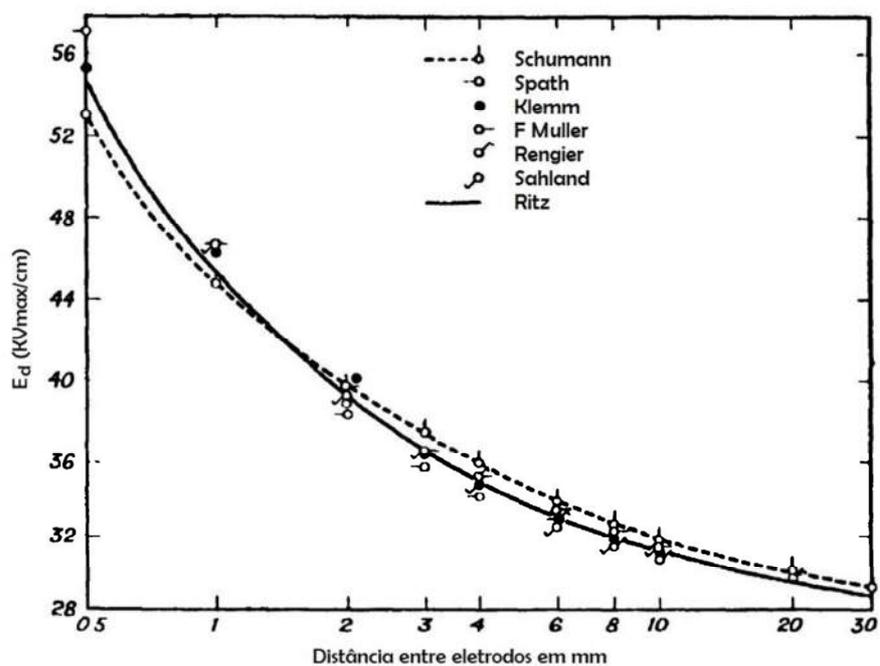


Figura 3.8 – Estresse de ruptura no ar atmosférico a 1 atm como função da distância entre eletrodos paralelos. Fonte: (MEEK; CRAGGS, 1953).

No capítulo 4 serão apresentadas as distribuições do estresse elétrico, aplicada ao isolador e a cavidade, e o resultado da reclassificação baseada na curva de Paschen para o ar atmosférico.

4

RESULTADO DAS SIMULAÇÕES E SUAS ANÁLISES

Depois de realizadas as simulações no COMSOL Multiphysics® (2012), a distribuição do campo elétrico para algumas das unidades poliméricas são apresentadas, Figura 4.1 a Figura 4.7, as demais figuras encontram-se no Apêndice 1. Para melhor visualização dos estresses aplicados são apresentadas duas figuras para as simulações em 2D, mostrando a distribuição de campo elétrico sobre o isolador e a distribuição de campo apenas sobre a cavidade. Para as simulações em 3D é apresentada apenas uma figura, distribuição de campo elétrico sobre a cavidade.

4.1 DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO ELÉTRICO

Os níveis de campo elétrico, nas diversas figuras apresentadas, estão expressos em kV/cm e suas distribuições estão quantificadas através de escala de cores. Os níveis de tensão aplicada foram registrados no capítulo 2, item 2.3, lembrando que foi considerado apenas a tensão (pico) de 3 pu.

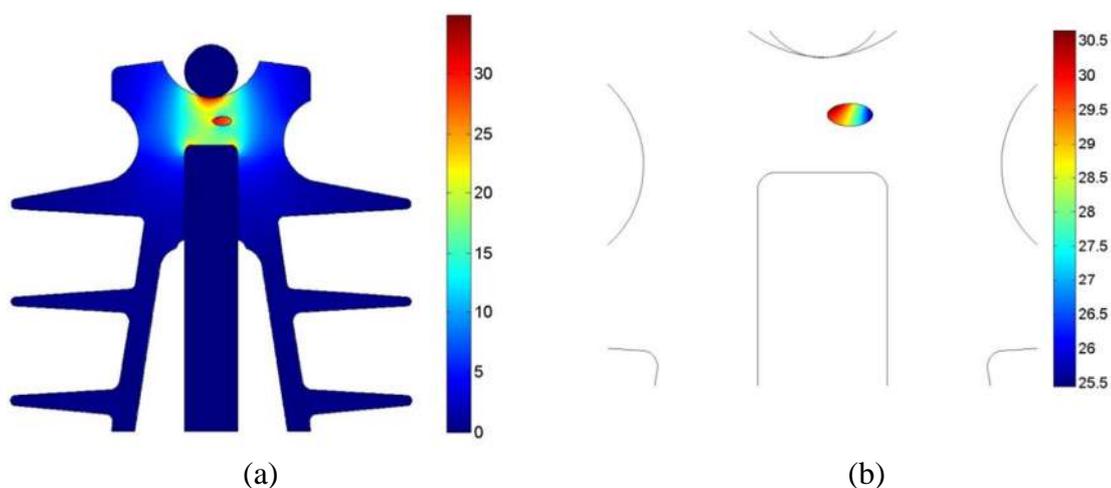


Figura 4.1 – Isolador X003 - *Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.*

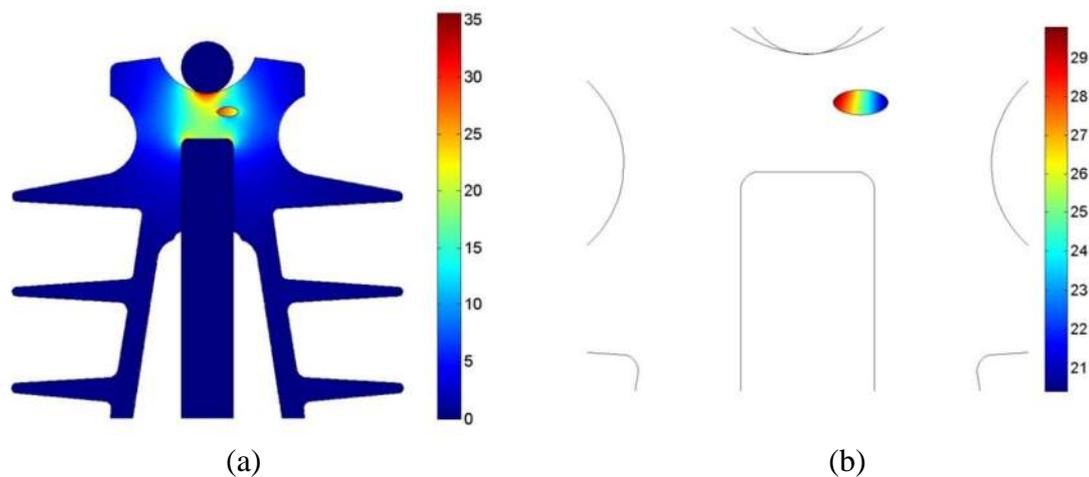


Figura 4.2 – Isolador X004 - *Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.*

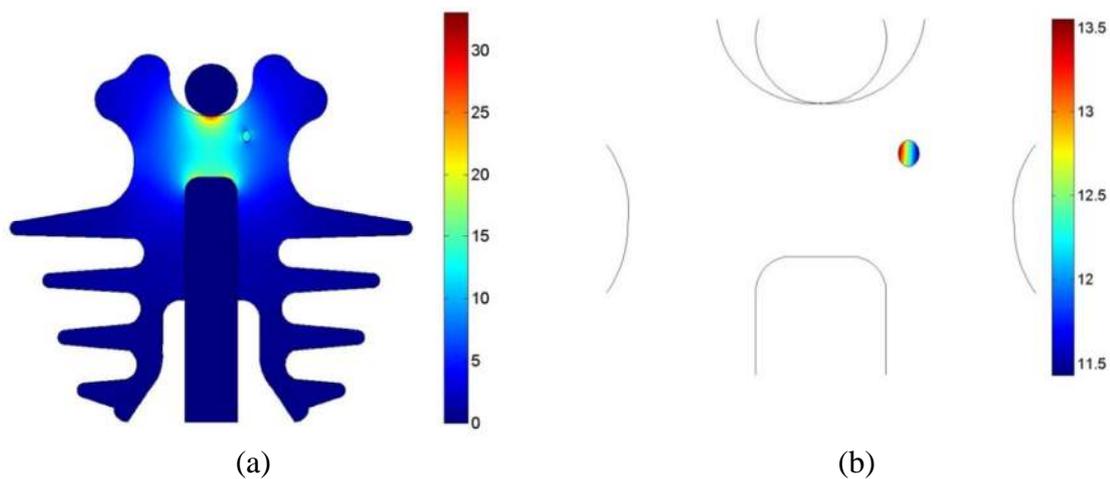


Figura 4.3 – Isolador Y002 - *Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.*

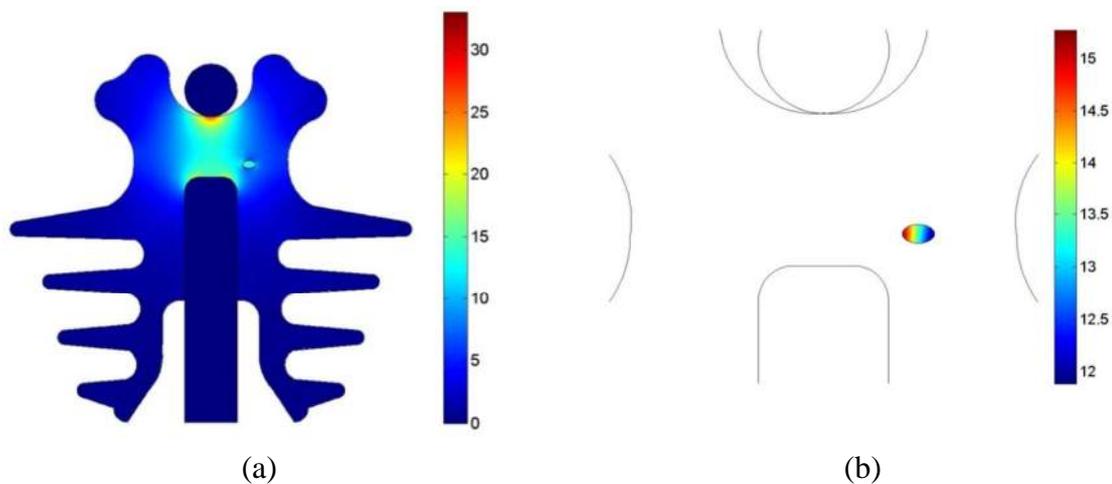


Figura 4.4 – Isolador Y013 - *Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.*

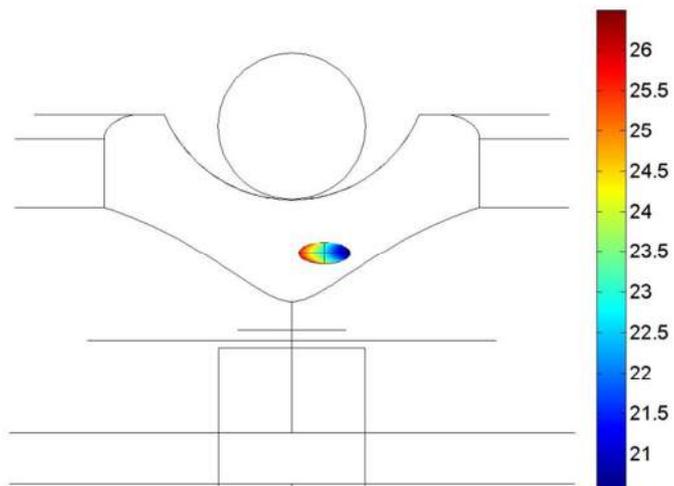


Figura 4.5 – Isolador X014 - *Campo elétrico na cavidade.*

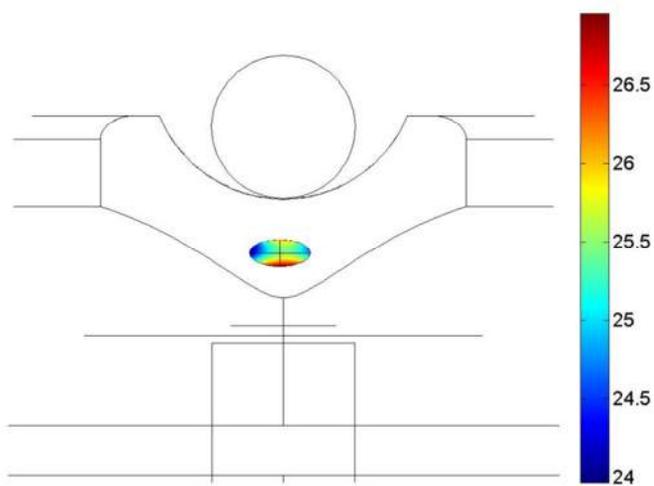


Figura 4.6 – Isolador X015 - *Campo elétrico na cavidade.*

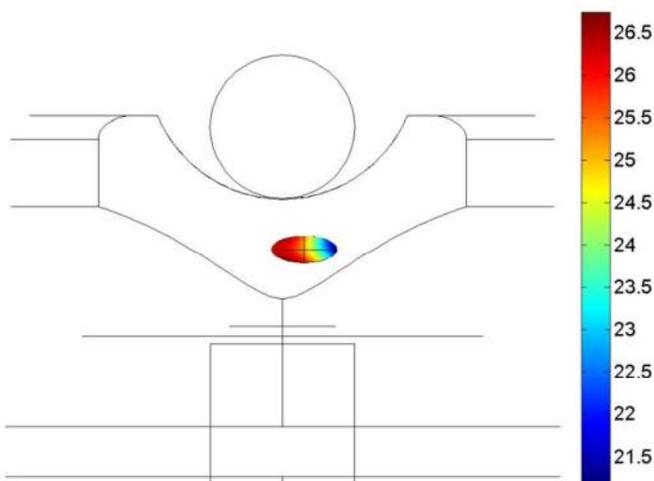


Figura 4.7 – Isolador X016 - *Campo elétrico na cavidade.*

4.2 RECLASSIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS ESTUDADAS

Para analisar a possibilidade de reclassificação das amostras foram utilizados três critérios. O primeiro critério utiliza a equação (3.26). O segundo critério utiliza a equação (3.25) com as constantes de Schumann e o terceiro critério utiliza a mesma equação substituindo as constantes de Schumann pelas de Bruce. Para que a cavidade apresente condições propícias ao surgimento de descargas, o campo médio (calculado pelo COMSOL Multiphysics® (2012)) deve ser maior ou igual ao campo calculado pela curva de Paschen (critérios 1, 2, e 3). Os resultados são apresentados na Tabela 4.1. Onde,

E_{max} → campo elétrico máximo aplicado sobre a cavidade;

E_{med} → campo elétrico médio aplicado sobre a cavidade;

Campo → tipo de campo aplicado (uniforme ou não uniforme);

C1 → classificação pelo critério 1 (0 – indica que NÃO apresenta condições propícias ao surgimento de descargas; 1 – indica que apresenta condições propícias ao surgimento de descarga);

C2 → classificação pelo critério 2 (0 – indica que NÃO apresenta condições propícias ao surgimento de descargas; 1 – indica que apresenta condições propícias ao surgimento de descarga);

C3 → classificação pelo critério 3 (0 – indica que NÃO apresenta condições propícias ao surgimento de descargas; 1 – indica que apresenta condições propícias ao surgimento de descarga).

Os valores do campo elétrico médio na cavidade foram obtidos através da ferramenta *Volume Average* (para simulações em 3D) e *Surface Average* do COMSOL Multiphysics® (2012), a qual fornece tais valores em função da região volumétrica (para simulações em 3D) ou superficial (simulações em 2D) associadas à cavidade analisada. Já o campo elétrico máximo foi calculado com a ferramenta *Maximum Surface* (para simulações em 2D) e *Maximum Volume* (para simulações em 3D). Apesar dos estresses encontrados nas unidades poliméricas serem não uniformes, o valor do campo máximo encontrado na cavidade é inferior a cinco vezes o valor do campo médio naquela região, esses campos podem ser considerados uniformes, essa condição foi apresentada por ABDEL-SALAM et al. (apud WATERS, 1978). Logo as formulações apresentadas no Capítulo 3 podem ser aplicadas com boa margem de aproximação.

Tabela 4.1 – Resultados das simulações.*(continua)*

<i>Identificação das amostras</i>	<i>E_{max} [kV/cm]</i>	<i>E_{med} [kV/cm]</i>	<i>Campo</i>	<i>Critério 1 [kV/cm]</i>	<i>Critério2 [kV/cm]</i>	<i>Critério 3 [kV/cm]</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>
X003	30,645	28,479	uniforme	41,492	40,486	38,724	0	0	0
X004	29,822	25,255	uniforme	40,932	39,844	38,143	0	0	0
V014	26,567	24,010	uniforme	42,912	42,075	40,162	0	0	0
V015	26,976	25,755	uniforme	40,932	39,844	38,143	0	0	0
V016	26,756	24,988	uniforme	40,932	39,844	38,143	0	0	0
V020	27,526	26,117	uniforme	42,134	41,211	39,380	0	0	0
V021	20,538	16,483	uniforme	40,932	39,844	38,143	0	0	0
V023	27,203	24,912	uniforme	40,932	39,844	38,143	0	0	0
V026	27,225	26,390	uniforme	42,912	42,075	40,162	0	0	0
V027	25,543	24,590	uniforme	42,912	42,075	40,162	0	0	0
V034	24,878	23,112	uniforme	42,161	41,241	39,407	0	0	0
X036	26,206	22,712	uniforme	40,932	39,844	38,143	0	0	0
X037	26,207	24,589	uniforme	41,492	40,486	38,724	0	0	0
X039	23,357	21,584	uniforme	42,161	41,241	39,407	0	0	0
X040	24,985	23,929	uniforme	41,492	40,486	38,724	0	0	0
X042	25,351	24,142	uniforme	43,834	43,082	41,073	0	0	0
X044	25,027	24,133	uniforme	43,834	43,082	41,073	0	0	0
X066	26,072	25,223	uniforme	41,492	40,486	38,724	0	0	0
X072	27,457	24,770	uniforme	40,438	39,271	37,625	0	0	0
X074	25,260	24,023	uniforme	41,492	40,486	38,724	0	0	0
X084	28,240	25,630	uniforme	40,438	39,271	37,625	0	0	0
X087	26,237	24,086	uniforme	40,932	39,844	38,143	0	0	0
X089	26,273	25,017	uniforme	42,161	41,241	39,407	0	0	0
X090	26,692	25,588	uniforme	41,492	40,486	38,724	0	0	0
X093	27,157	25,308	uniforme	40,438	39,271	37,625	0	0	0
X095	26,825	23,178	uniforme	40,932	39,844	38,143	0	0	0
X097	25,952	23,445	uniforme	42,912	42,075	40,162	0	0	0
X098	26,882	23,921	uniforme	40,438	39,271	37,625	0	0	0
X100	26,609	24,266	uniforme	40,932	39,844	38,143	0	0	0
X106	20,793	18,987	uniforme	43,834	43,082	41,073	0	0	0
X107	25,720	24,680	uniforme	42,161	41,241	39,407	0	0	0
X114	28,733	27,364	uniforme	42,912	42,075	40,162	0	0	0
X123	24,782	23,574	uniforme	42,912	42,075	40,162	0	0	0
X128	25,486	24,497	uniforme	40,932	39,844	38,143	0	0	0
X131	24,419	23,155	uniforme	43,834	43,082	41,073	0	0	0
X133	25,589	22,677	uniforme	42,161	41,241	39,407	0	0	0
X137	26,308	25,207	uniforme	42,912	42,075	40,162	0	0	0
X139	27,712	25,580	uniforme	43,834	43,082	41,073	0	0	0
X140	24,184	22,257	uniforme	40,932	39,844	38,143	0	0	0
X142	26,682	23,935	uniforme	42,108	41,182	39,353	0	0	0

Tabela 4.1 – Resultados das simulações.*(continuação)*

<i>Identificação das amostras</i>	<i>E_{max} [kV/cm]</i>	<i>E_{med} [kV/cm]</i>	<i>Campo</i>	<i>Critério 1 [kV/cm]</i>	<i>Critério2 [kV/cm]</i>	<i>Critério 3 [kV/cm]</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>
X145	27,501	26,643	uniforme	42,912	42,075	40,162	0	0	0
X147	23,974	20,973	uniforme	42,912	42,075	40,162	0	0	0
X149	25,887	24,626	uniforme	42,912	42,075	40,162	0	0	0
X158	24,784	23,863	uniforme	44,905	44,229	42,110	0	0	0
X165	26,547	25,225	uniforme	41,492	40,486	38,724	0	0	0
X167	26,394	24,990	uniforme	40,438	39,271	37,625	0	0	0
X168	24,736	24,187	uniforme	44,905	44,229	42,110	0	0	0
X173	27,429	25,820	uniforme	42,161	41,241	39,407	0	0	0
X181	28,105	26,596	uniforme	43,797	43,042	41,037	0	0	0
X183	25,906	22,320	uniforme	40,350	39,168	37,531	0	0	0
X186	25,756	24,834	uniforme	42,912	42,075	40,162	0	0	0
X187	27,813	26,169	uniforme	41,492	40,486	38,724	0	0	0
X189	26,900	25,003	uniforme	46,277	45,667	43,411	0	0	0
X190	26,219	25,135	uniforme	42,161	41,241	39,407	0	0	0
X193	25,884	24,311	uniforme	41,492	40,486	38,724	0	0	0
X194	25,297	24,459	uniforme	43,834	43,082	41,073	0	0	0
X196	25,796	24,914	uniforme	44,905	44,229	42,110	0	0	0
X199	27,654	26,153	uniforme	42,912	42,075	40,162	0	0	0
Y02	13,560	12,456	uniforme	40,438	39,271	37,625	0	0	0
Y13	15,286	13,448	uniforme	42,912	42,075	40,162	0	0	0
Y20	22,963	20,446	uniforme	42,912	42,075	40,162	0	0	0
Y22	16,801	14,920	uniforme	40,932	39,844	38,143	0	0	0
Y29	14,019	13,113	uniforme	42,912	42,075	40,162	0	0	0
Y30	13,053	12,134	uniforme	40,420	39,250	37,606	0	0	0
Y31	17,710	16,168	uniforme	42,912	42,075	40,162	0	0	0
Y32	13,540	12,395	uniforme	39,984	38,737	37,141	0	0	0
Y33	23,146	21,732	uniforme	46,221	45,608	43,358	0	0	0
Y35	13,956	12,827	uniforme	42,161	41,241	39,407	0	0	0
Y36	12,549	11,900	uniforme	43,834	43,082	41,073	0	0	0
Y37	13,426	12,392	uniforme	41,492	40,486	38,724	0	0	0
Y38	15,849	14,933	uniforme	47,960	47,384	44,965	0	0	0
Y39	11,654	11,223	uniforme	44,905	44,229	42,110	0	0	0
Y40	13,086	12,174	uniforme	40,932	39,844	38,143	0	0	0
Y41	14,400	13,169	uniforme	41,492	40,486	38,724	0	0	0
Y42	12,690	11,626	uniforme	41,423	40,408	38,653	0	0	0
Y43	17,272	16,038	uniforme	47,960	47,384	44,965	0	0	0
Y44	13,709	12,981	uniforme	44,859	44,181	42,067	0	0	0
Y45	14,963	14,058	uniforme	43,834	43,082	41,073	0	0	0
Y47	14,932	13,849	uniforme	42,134	41,211	39,380	0	0	0
Y49	14,482	13,338	uniforme	42,134	41,211	39,380	0	0	0

Tabela 4.1 – Resultados das simulações.

Identificação das amostras	E _{max} [kV/cm]	E _{med} [kV/cm]	Campo	Critério 1 [kV/cm]	Critério 2 [kV/cm]	Critério 3 [kV/cm]	(conclusão)		
							C1	C2	C3
Y50	14,203	13,475	uniforme	46,221	45,608	43,358	0	0	0
Y51	16,240	15,071	uniforme	42,912	42,075	40,162	0	0	0
Y52	12,508	11,654	uniforme	42,880	42,041	40,131	0	0	0
Y53	13,792	12,829	uniforme	42,912	42,075	40,162	0	0	0
Y54	13,046	11,881	uniforme	40,403	39,229	37,587	0	0	0

O foco na cavidade foi buscado tendo em vista que a possível ruptura se daria sempre que o campo elétrico superasse a sua rigidez dielétrica

4.1 COMENTÁRIOS

Os resultados encontrados indicam que nenhuma das unidades poliméricas analisadas seria propícia ao surgimento de descargas internas em suas cavidades. Nesse caso, os estresses aplicados aos isoladores, mesmo a 3 p.u., não conseguiram atingir o estresse indicado pela curva de Paschen para o início das descargas. Na Tabela 4.1 observa-se que mesmo os valores de campo elétrico máximo (E_{max}) obtidos não levariam a níveis superiores aos registrados para os critérios 1, 2 e 3.

Com o objetivo de comprovar os resultados encontrados nesta dissertação são apresentados os resultados de três estudos realizados:

- na Figura 4.8 está ilustrada a distribuição de campo elétrico feita por FAGUNDES (2008) em um isolador polimérico de classe de tensão 15 kV a 1 pu. É possível observar nesta figura que a distribuição de campo elétrico é semelhante à apresentada nesta dissertação, bem como a sua intensidade.
- FORMIGA et al. (2006), utilizando outra linha de pesquisa, chegaram à conclusão que quando os isoladores estão submetidos a uma tensão usual de operação as descargas internas não são ativadas no interior das cavidades. Os autores retiraram de operação alguns isoladores de regiões diferentes (litoral, zona da mata e sertão) para avaliar seus níveis de degradação. Uma das etapas foi a obtenção de imagens de raio X dessas unidades, onde se constatou a presença de cavidades internas em 6 das amostras analisadas. Três unidades foram submetidas à análise de descarga

parcial, sendo uma unidade nova e dois isoladores envelhecidos por dois anos em campo. Utilizando amarrações poliméricas, nenhuma das unidades apresentou descarga parcial quando submetidos à tensão fase-terra de 8 e 12 kV.

- em inspeções realizadas com o auxílio de um termovisor, na Linha de Distribuição Experimental montada na UFPE, os isoladores não apresentaram características que indicassem a ocorrência de descargas em seu interior (VASCONCELOS, 2013).

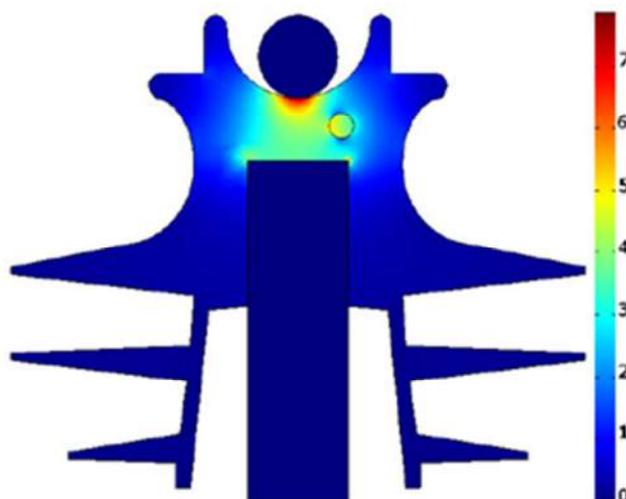


Figura 4.8 – Distribuição de campo elétrico a 1 pu (kV/cm). Fonte: (FAGUNDES, 2008).

5

CONCLUSÕES

A pesquisa realizada e descrita nesta dissertação aponta que a construção de um processo de diagnóstico do estado de isoladores poliméricos, a partir dos sinais coletados nos ensaios realizados na UFCG, apresenta aspectos não promissores. Esta conclusão ficou evidenciada a partir das seguintes constatações:

- os níveis de tensão elétrica que surgem nas cavidades analisadas não apresentaram valores que ativassem as descargas;
- as evidências da não ativação dessas possíveis descargas foram alcançadas a partir de diferentes critérios;
- nenhuma falha operacional foi observada na linha experimental associada a possíveis desgastes, ao longo de 21 meses de observação;
- apesar de não se esperar variações térmicas na superfície do isolador advindas de possíveis descargas internas, foram realizadas inspeções com termovisor na linha experimental, as quais não acusaram aquecimentos pontuais nas superfícies que indicassem a existência de tal fenômeno;
- inspeções com sensor de ultrassom realizadas na mesma linha experimental também não indicaram níveis anormais de geração de ruídos.

As constatações feitas indicam que as cavidades aferidas não apresentam a possibilidade de geração de descargas parciais. Diante das conclusões alcançadas é possível levantar as seguintes suposições que podem ter levado unidades de isoladores poliméricos instalados no setor elétrico a apresentarem desgastes precoces e colapsos em seus dielétricos:

- possíveis fissuras prévias oriundas de esforços impostos a unidades específicas durante o processo de fabricação ou transporte;

- dimensões e posições específicas das cavidades que possam ser objeto de descargas parciais;
- eventual folga do pino em relação ao isolador que gere vazios internos que possam dar origem às descargas;
- processo de fixação dos isoladores ao condutor que possam dar partida a descargas superficiais e venham cumulativamente danificar toda a unidade isolante;

O motivo dos falsos diagnósticos observados no processo de diagnóstico desenvolvido durante o projeto de P&D UFPE/CELPE pode estar associado a manifestações de ruídos de ultrassom oriundos da geração de descargas corona, as quais, apesar de todos os cuidados para evitá-las, ainda se faziam presentes.

5.1 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

A preocupação quanto a desgastes precoces em isoladores poliméricos ainda persiste, conduzindo a necessidade de que pesquisas adicionais sejam desenvolvidas. São sugeridos os seguintes temas futuros:

- análise da degradação do dielétrico, o qual contenha eventuais cavidades em seu interior, ao longo do tempo, nas condições nominais;
- aferir a influência de fragilizações ou desgastes mecânicos no surgimento de fissuras e na geração de descargas elétricas e consequente colapso do dielétrico;
- desenvolvimento de pesquisas laboratoriais no sentido de avaliar as tensões elétricas que podem dar início as descargas parciais internas nas cavidades analisadas;
- análise de diferentes dimensões e localizações de cavidades no interior do isolador;
- investigações quanto a possíveis folgas entre o isolador e o pino que possam dar origem a descargas em vazios introduzidos na própria massa que procura evitar tais situações.

6 APÊNDICE

6.1 Figuras - simulação em 2D:

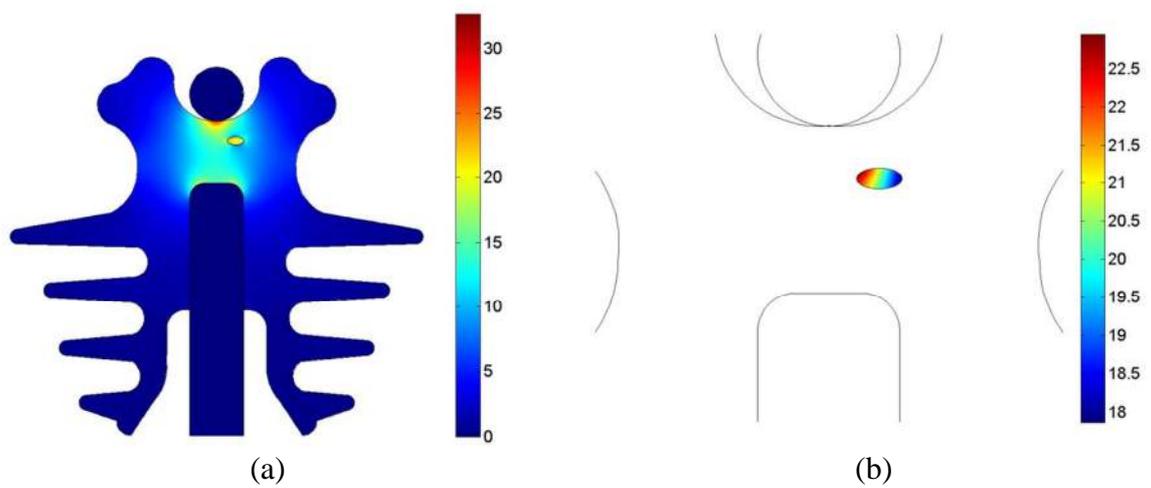


Figura 6.1 – Isolador Y020 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.

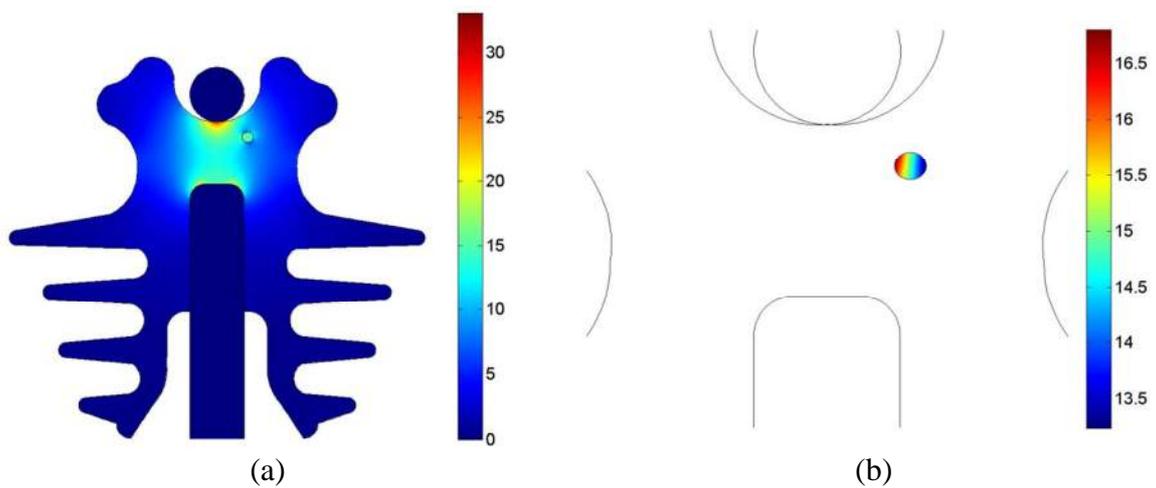


Figura 6.2 – Isolador Y022 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.

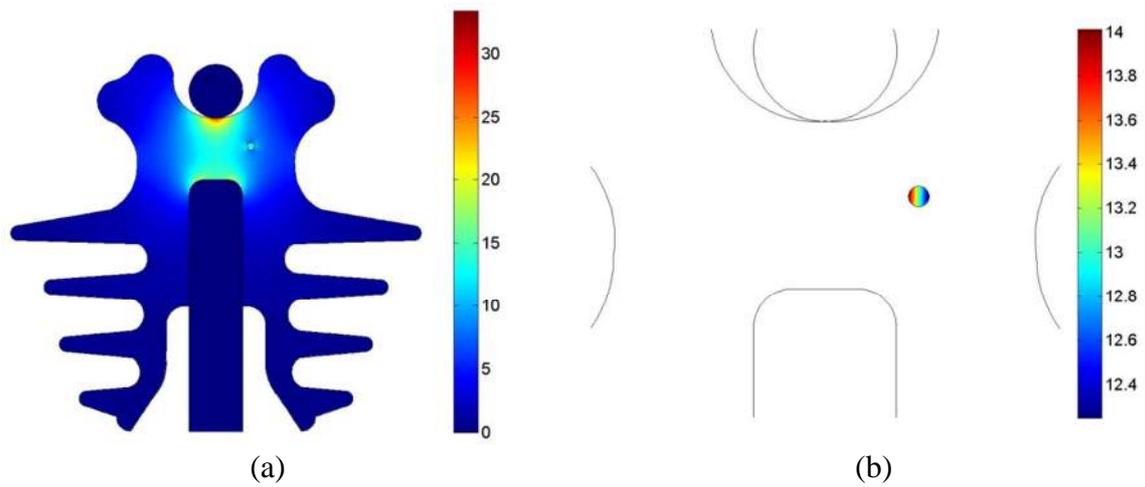


Figura 6.3 – Isolador Y029 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.

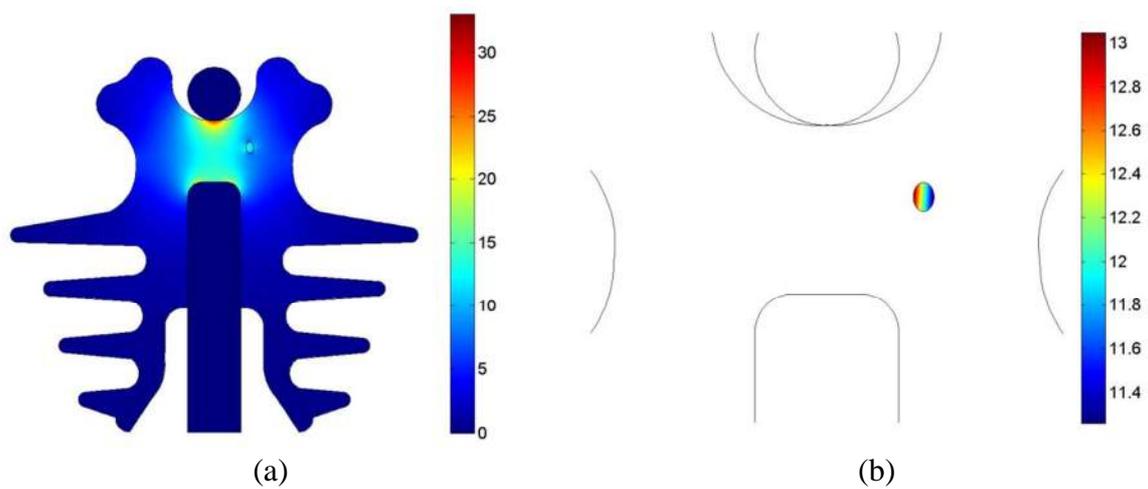


Figura 6.4 – Isolador Y030 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.

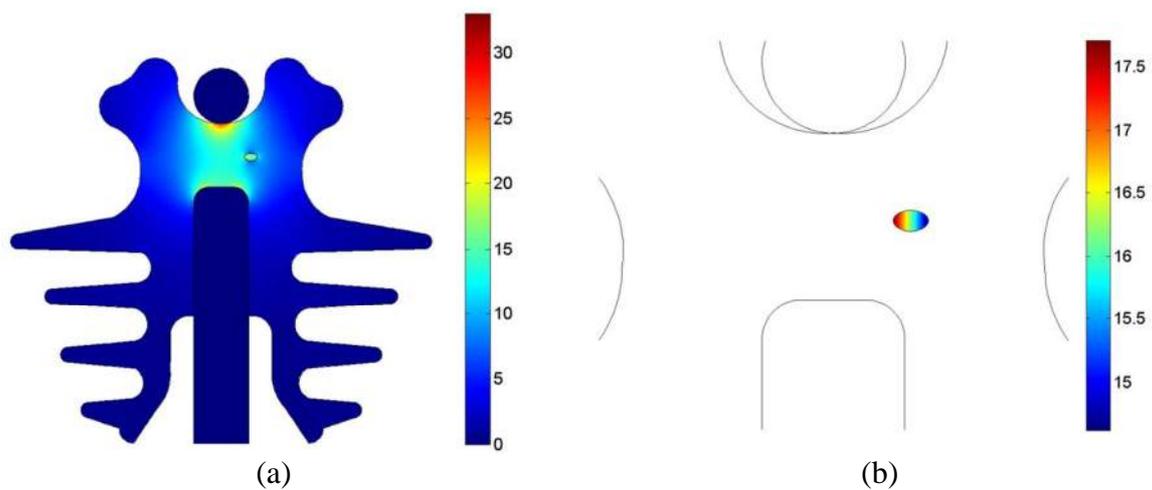


Figura 6.5 – Isolador Y031 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.

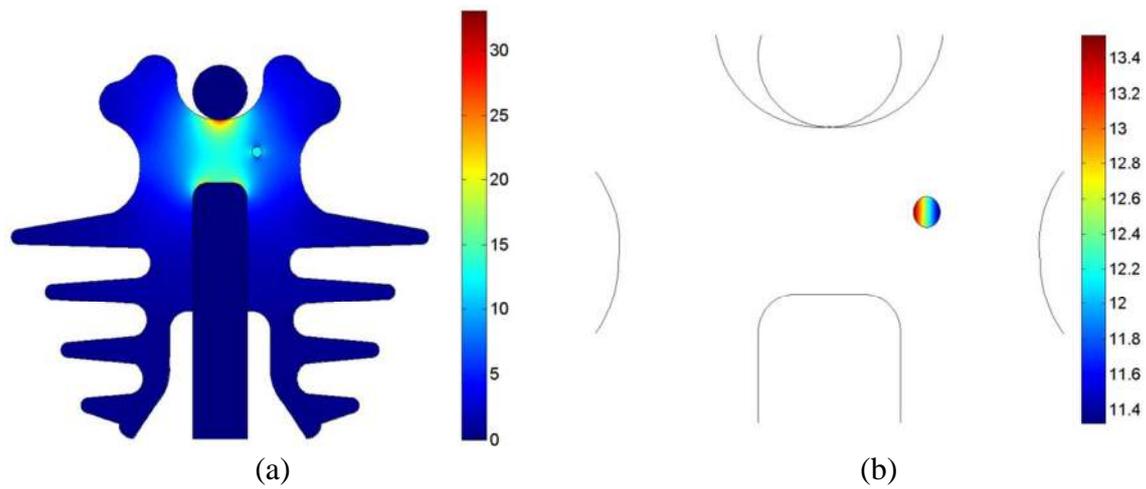


Figura 6.6 – Isolador Y032 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.

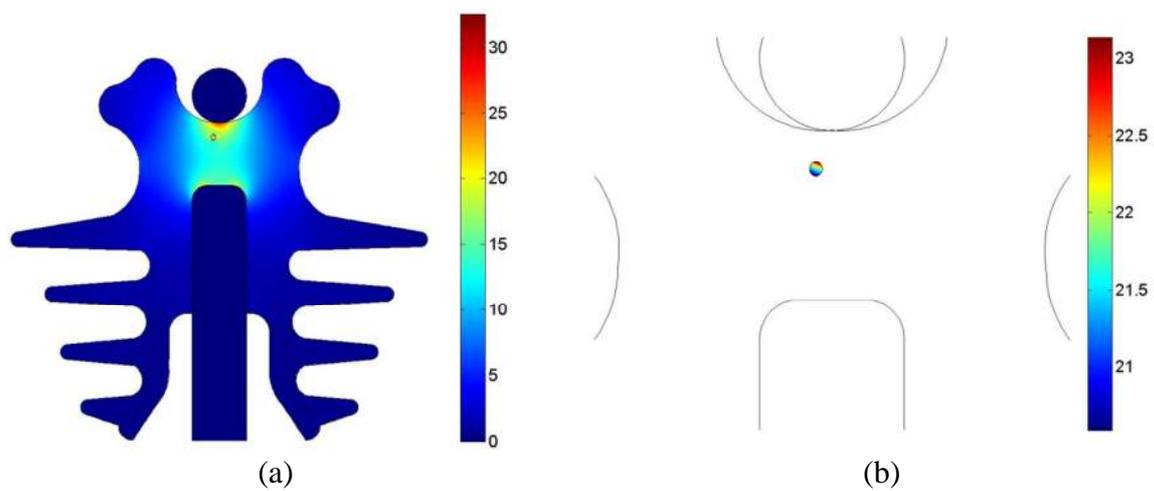


Figura 6.7 – Isolador Y033 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.

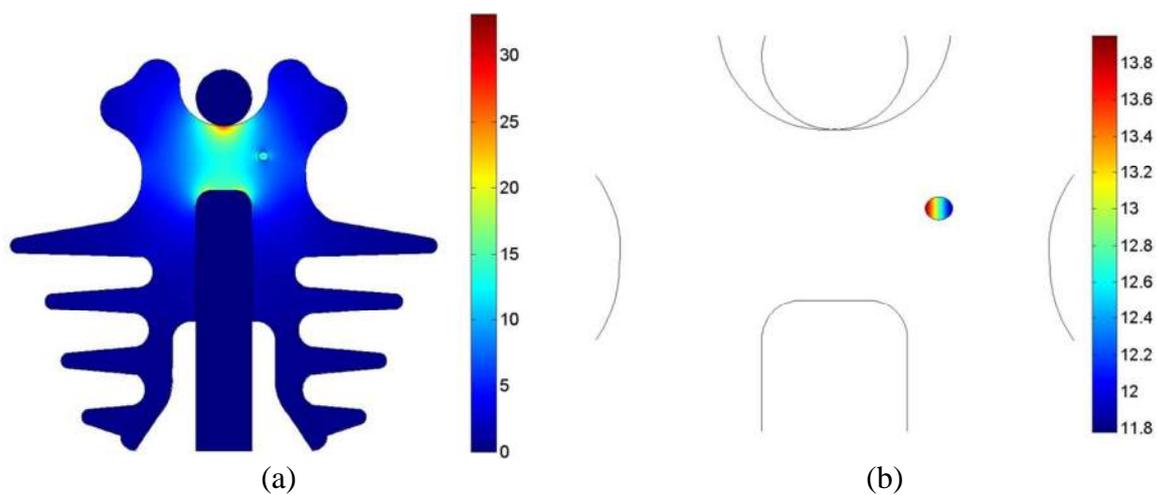


Figura 6.8 – Isolador Y035 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.

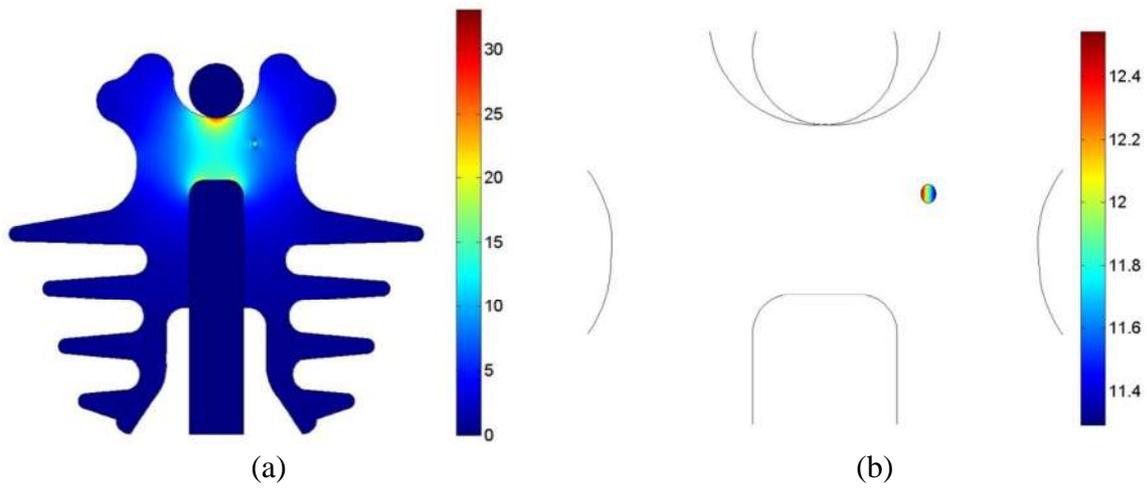


Figura 6.9 – Isolador Y036 - *Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.*

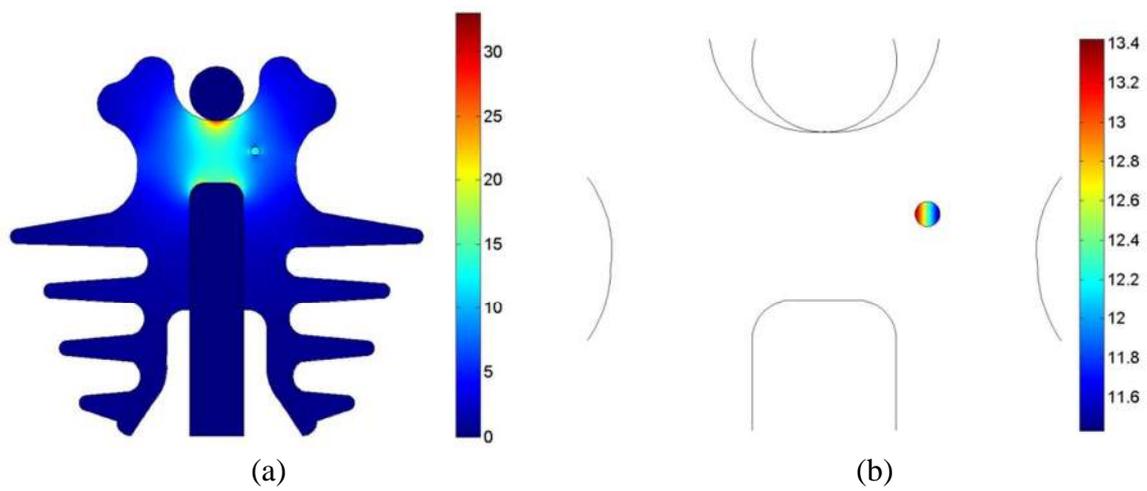


Figura 6.10 – Isolador Y037 - *Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.*

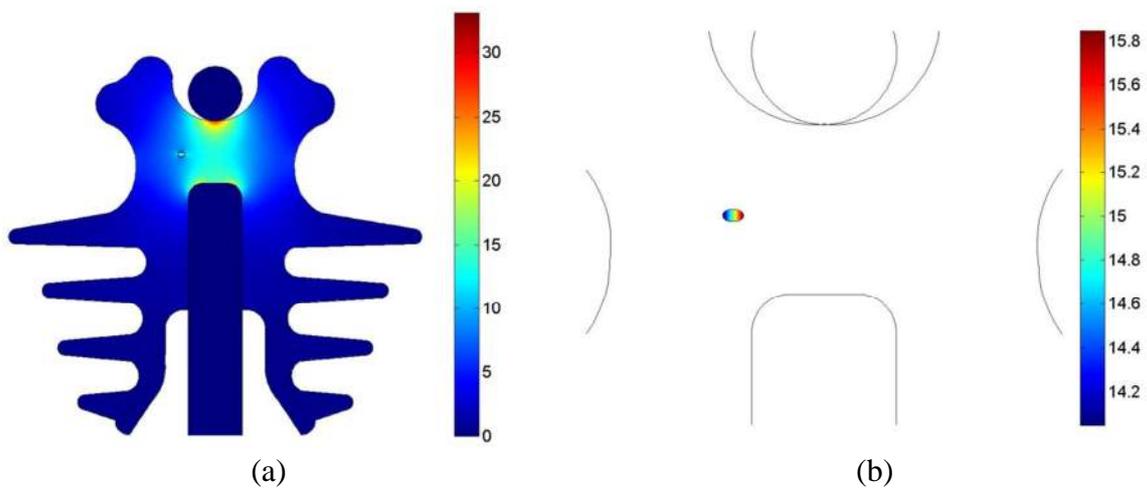


Figura 6.11 – Isolador Y038 - *Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.*

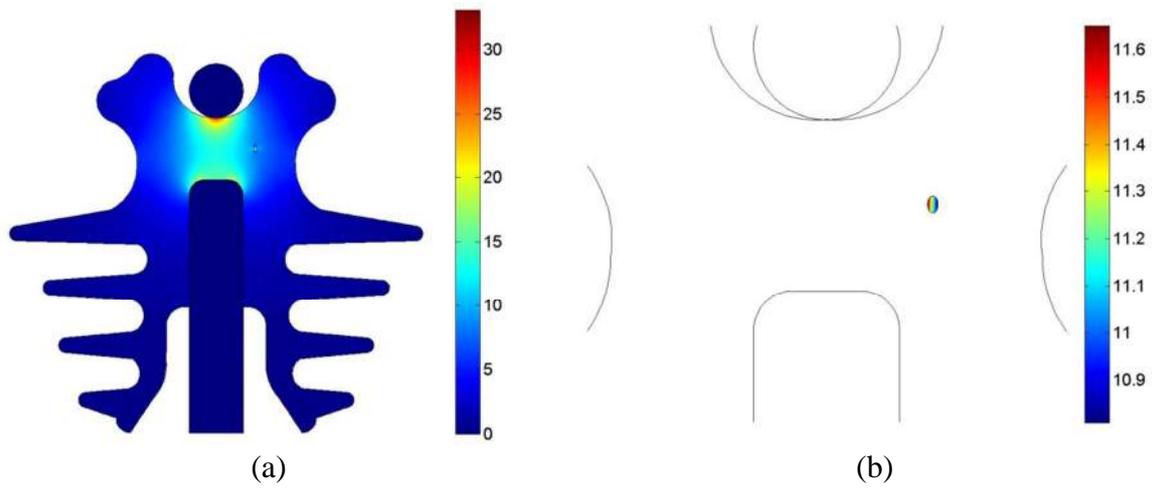


Figura 6.12 – Isolador Y039 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.

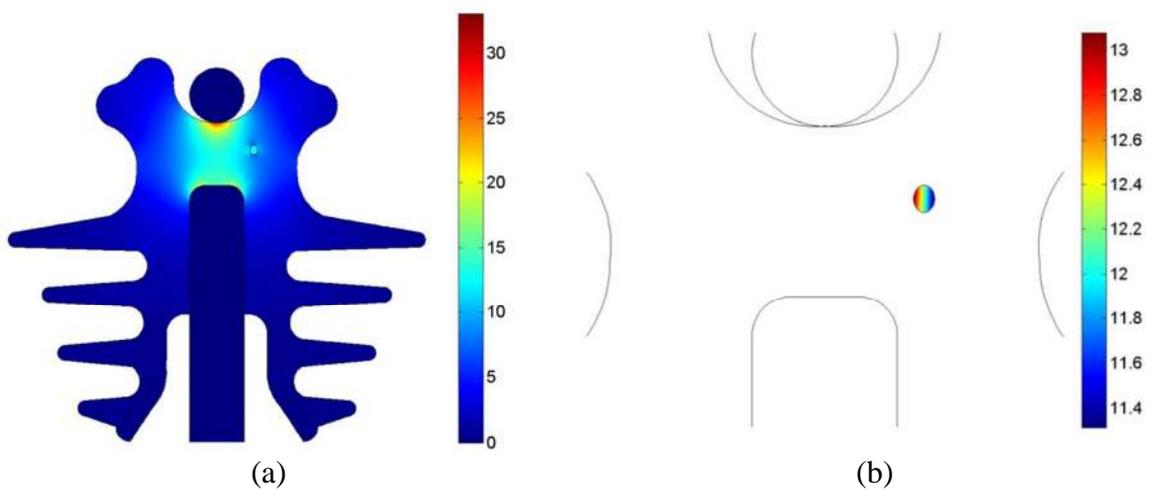


Figura 6.13 – Isolador Y040 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.

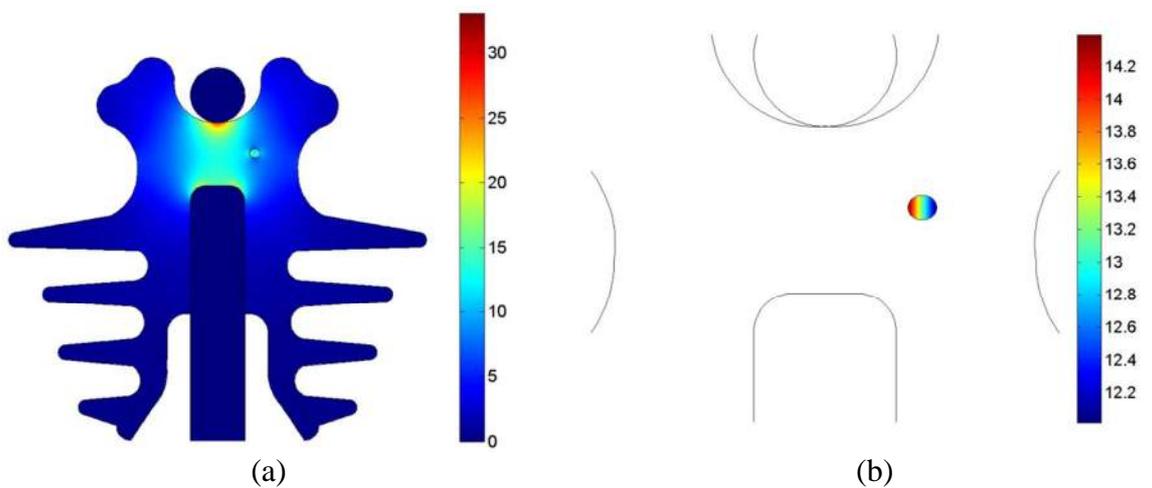


Figura 6.14 – Isolador Y041 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.

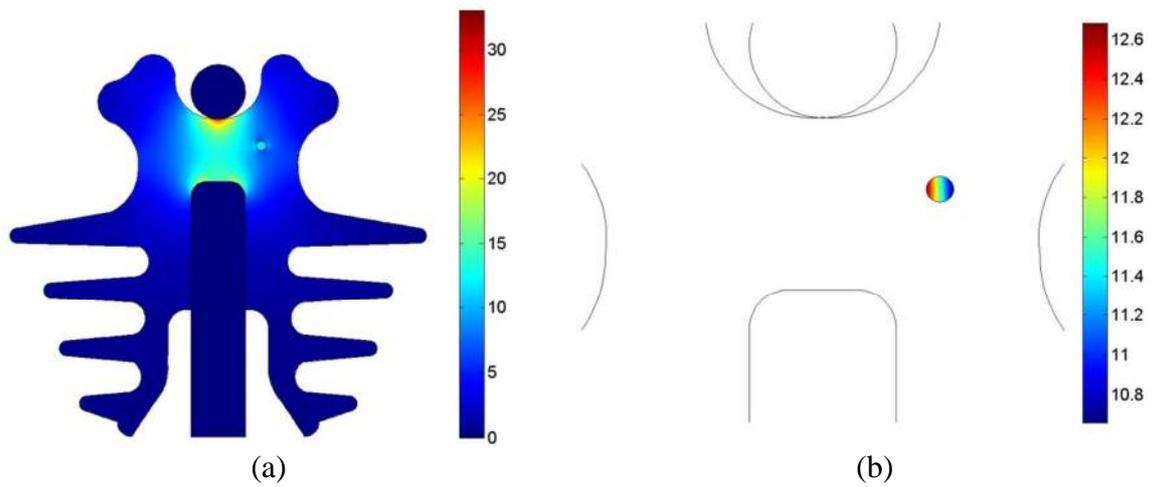


Figura 6.15 – Isolador Y042 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.

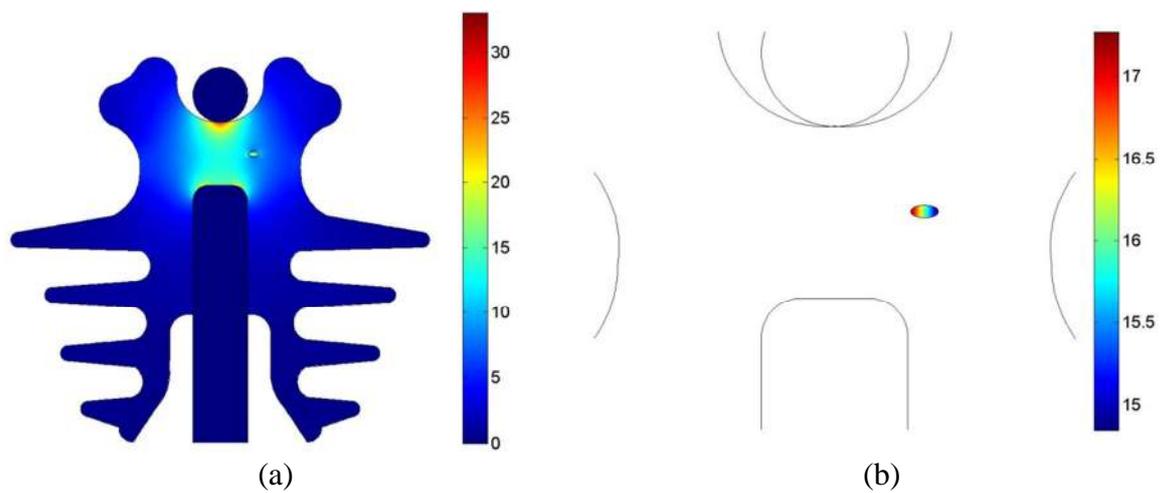


Figura 6.16 – Isolador Y043 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.

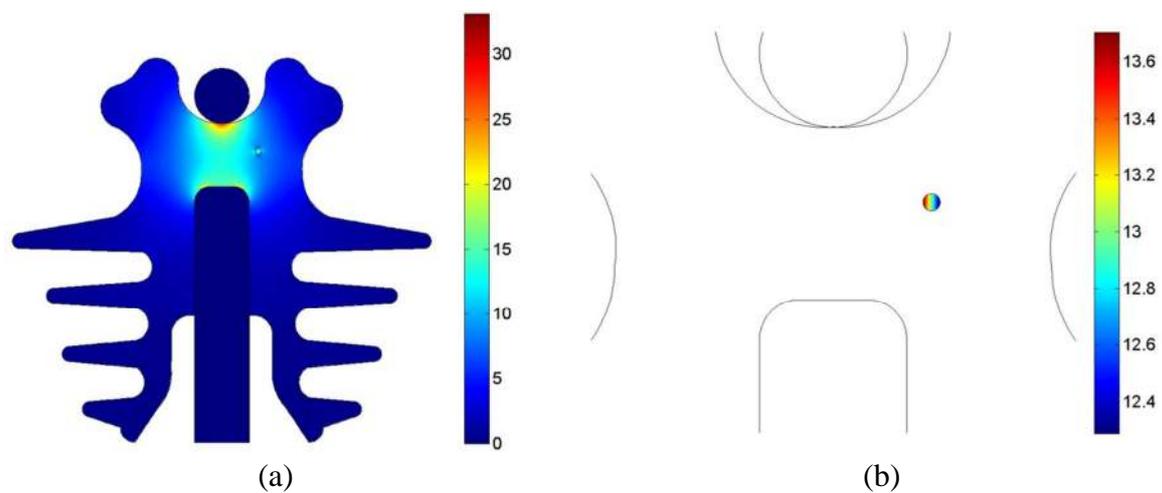


Figura 6.17 – Isolador Y044 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.

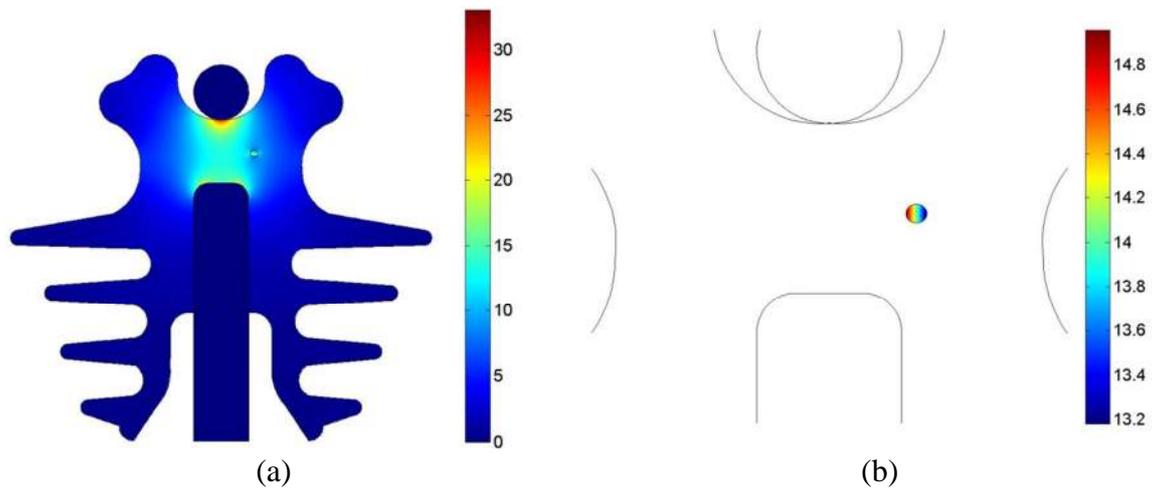


Figura 6.18 – Isolador Y045 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.

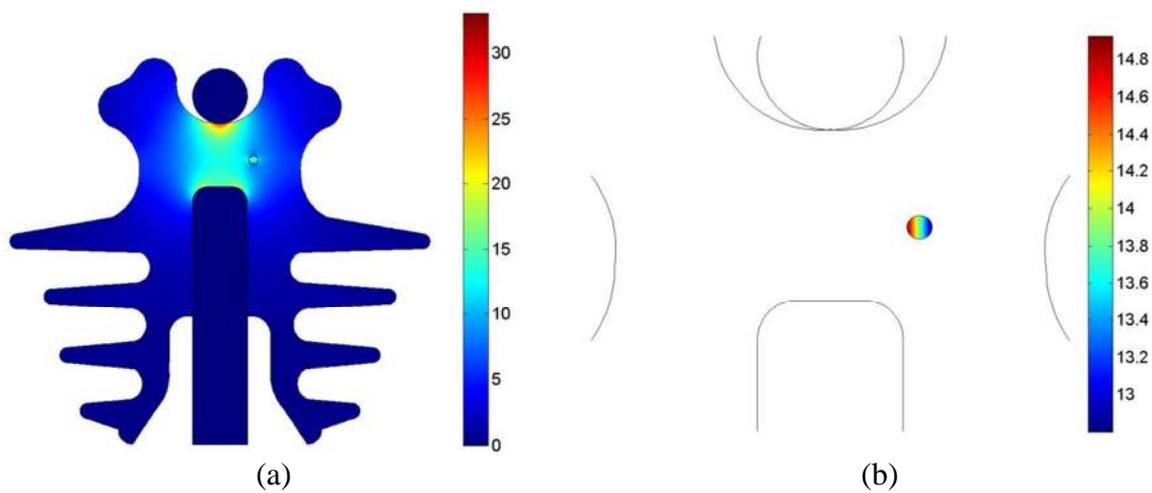


Figura 6.19 – Isolador Y047 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.

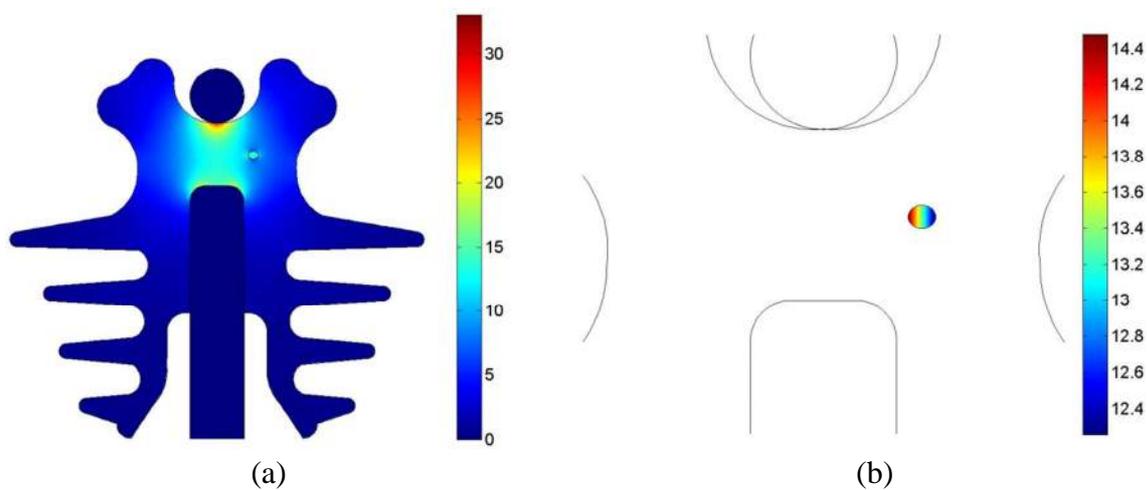


Figura 6.20 – Isolador Y049 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.

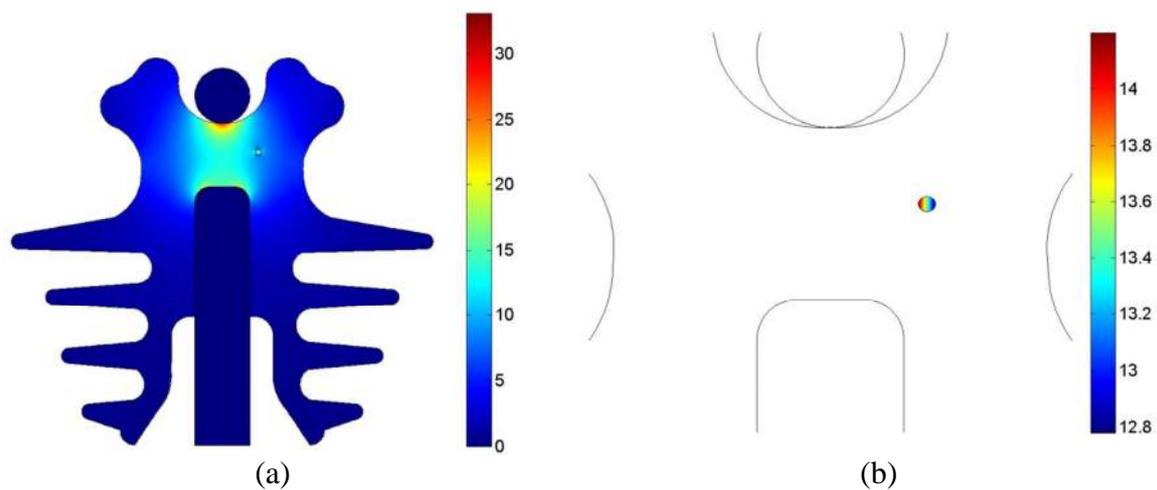


Figura 6.21 – Isolador Y050 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.

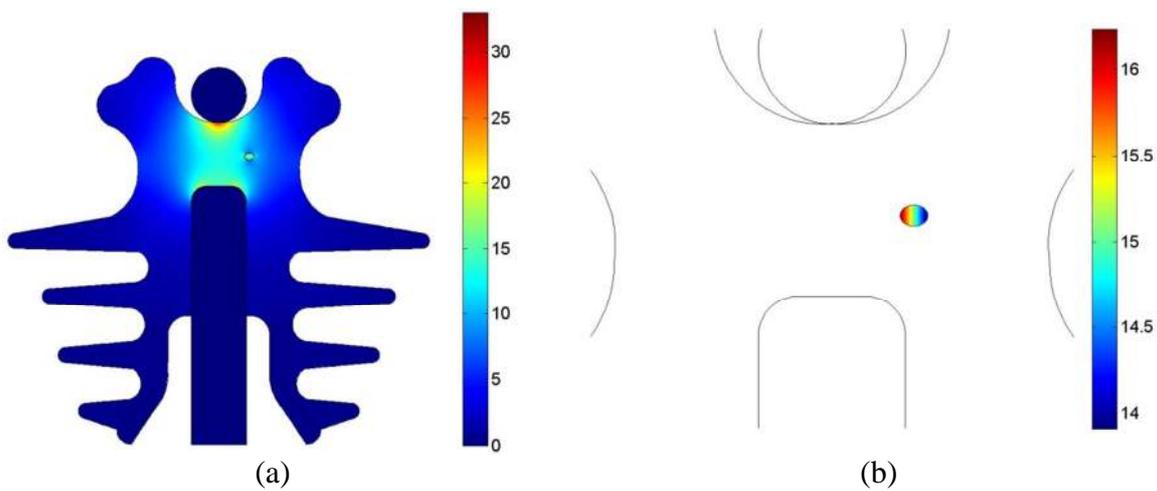


Figura 6.22 – Isolador Y051 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.

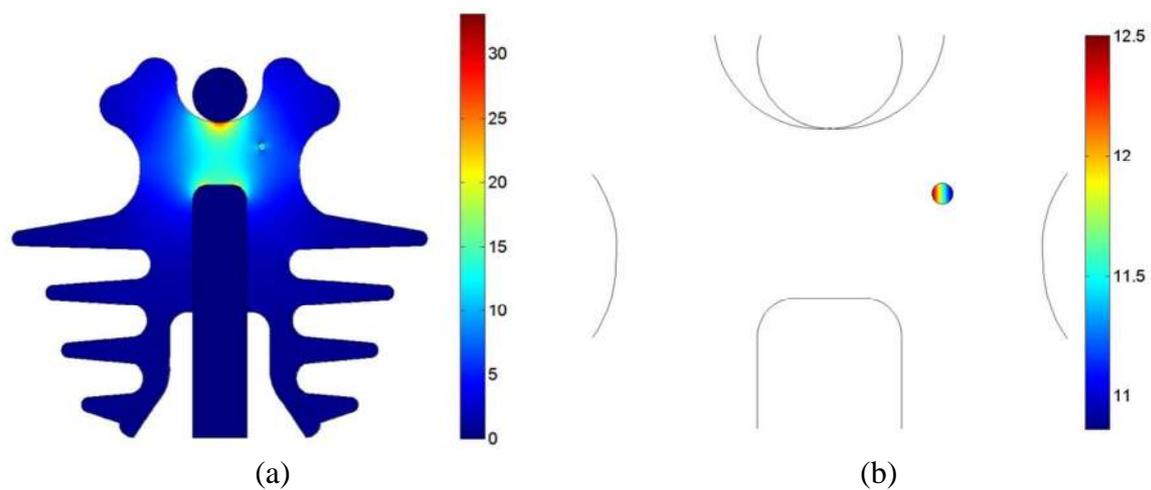


Figura 6.23 – Isolador Y052 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.

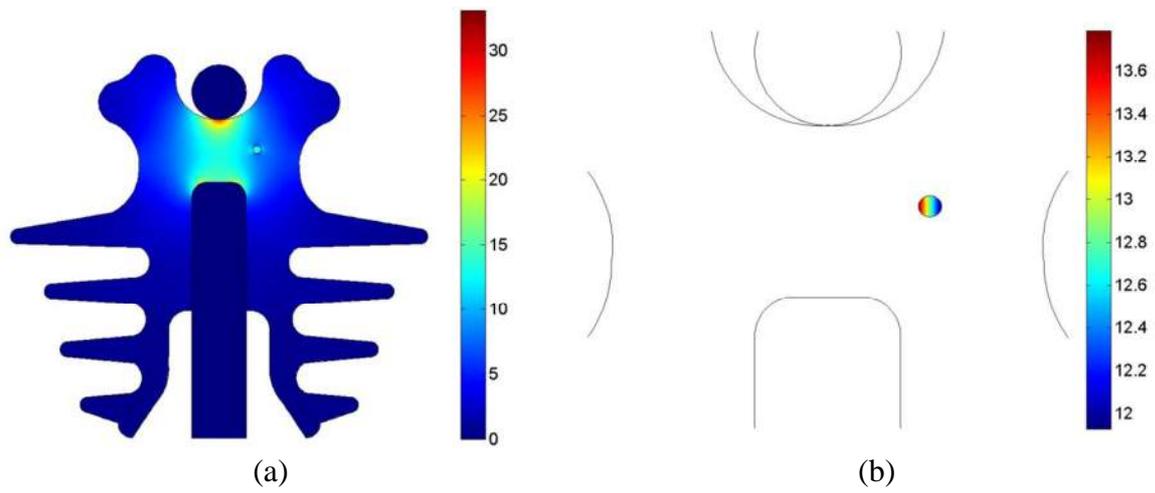


Figura 6.24 – Isolador Y053 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.

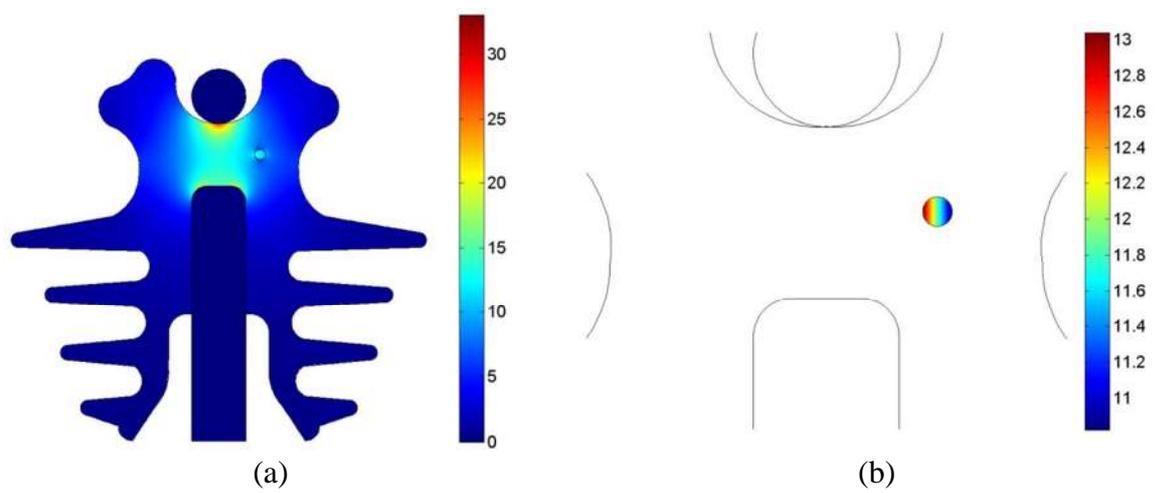


Figura 6.25 – Isolador Y054 - Campo elétrico: (a) no isolador; (b) na cavidade.

6.2 Figuras - simulação em 3D:

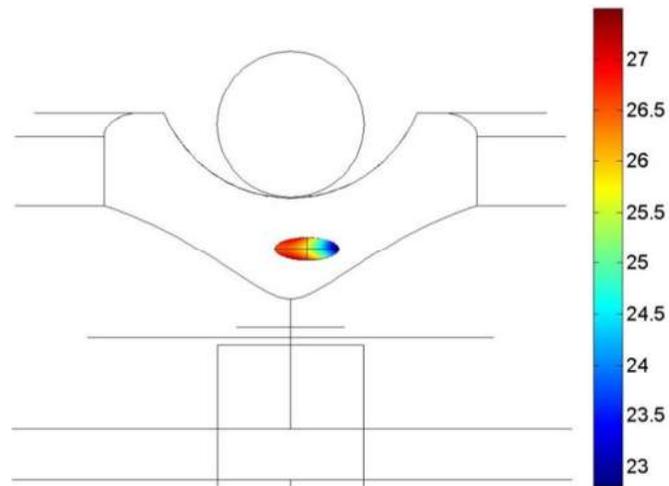


Figura 6.26 – Isolador X020 - Campo elétrico na cavidade.

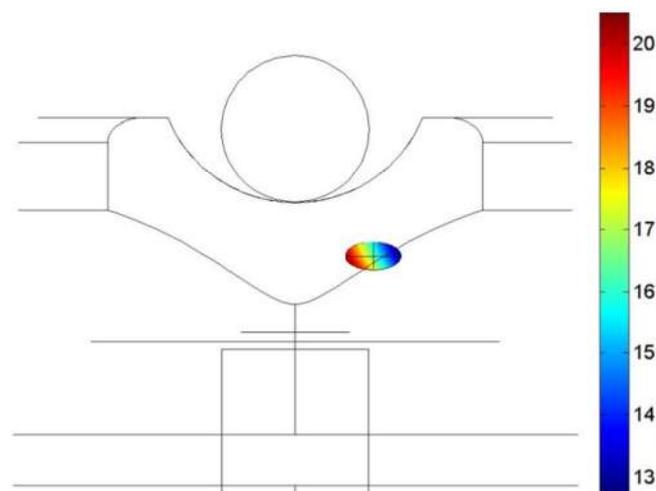


Figura 6.27 – Isolador X021 - Campo elétrico na cavidade.

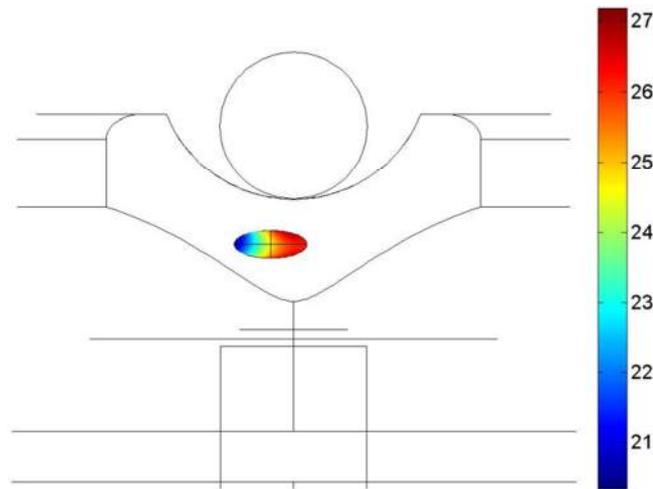


Figura 6.28 – Isolador X023 - Campo elétrico na cavidade.

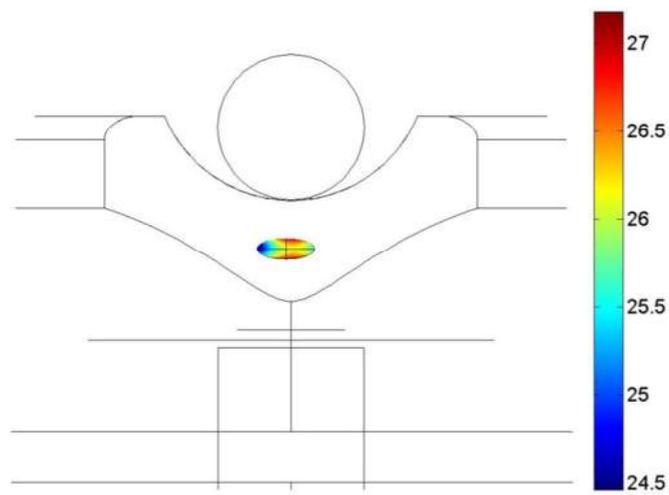


Figura 6.29 – Isolador X026 - Campo elétrico na cavidade.

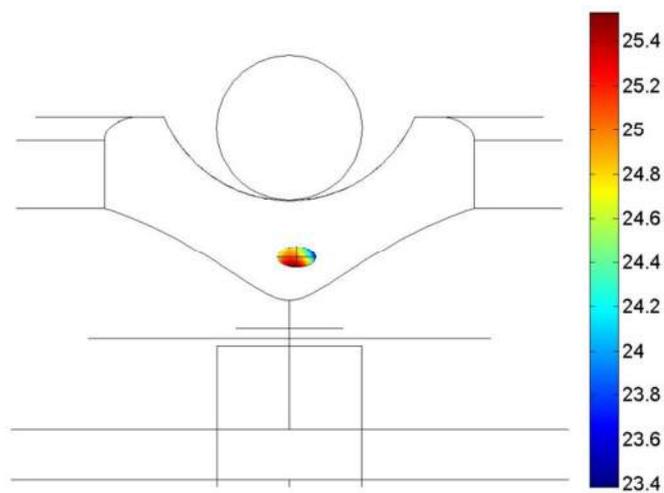


Figura 6.30 – Isolador X027 - Campo elétrico na cavidade.

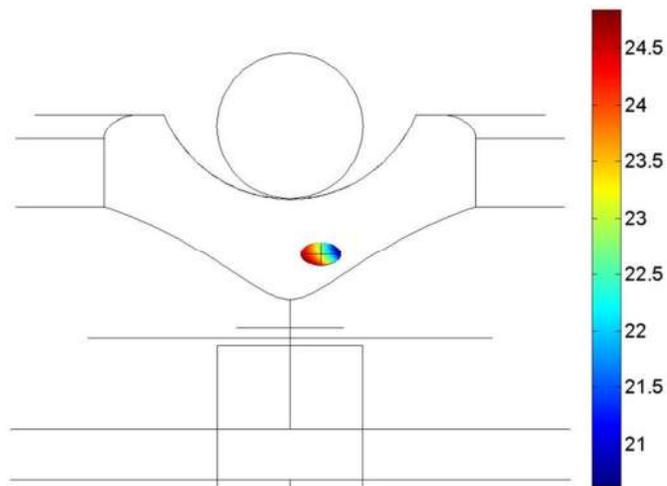


Figura 6.31 – Isolador X034 - Campo elétrico na cavidade.

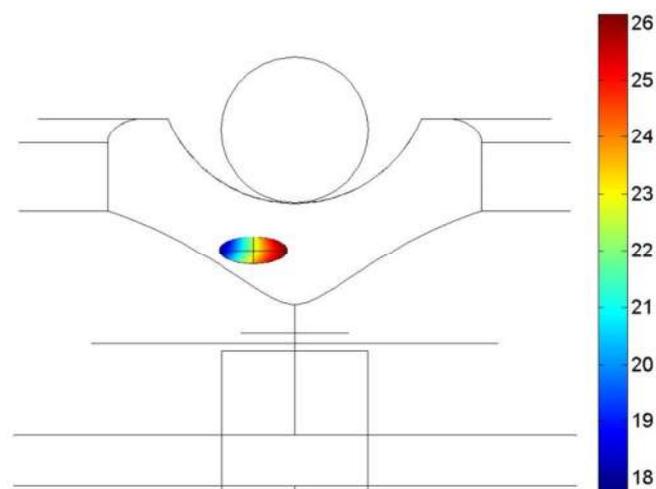


Figura 6.32 – Isolador X036 - Campo elétrico na cavidade.

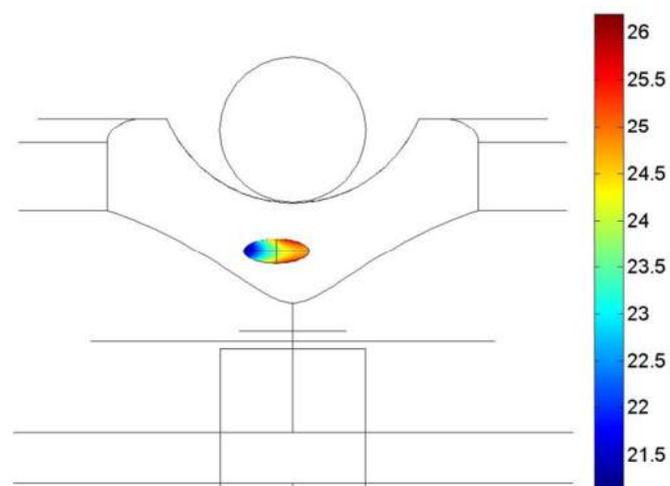


Figura 6.33 – Isolador X037 - Campo elétrico na cavidade.

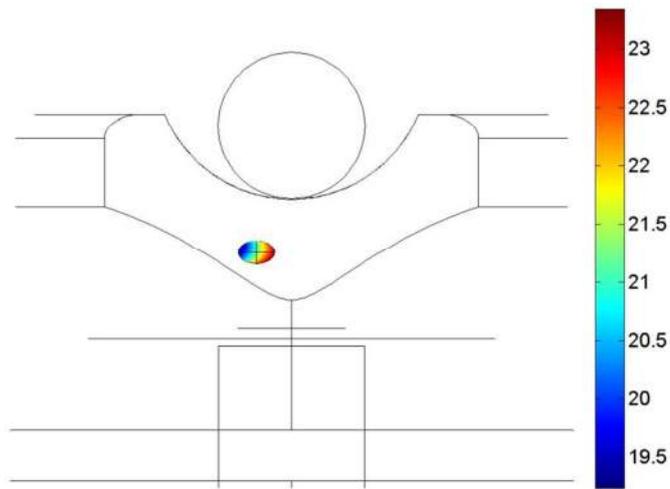


Figura 6.34 – Isolador X039 - Campo elétrico na cavidade.

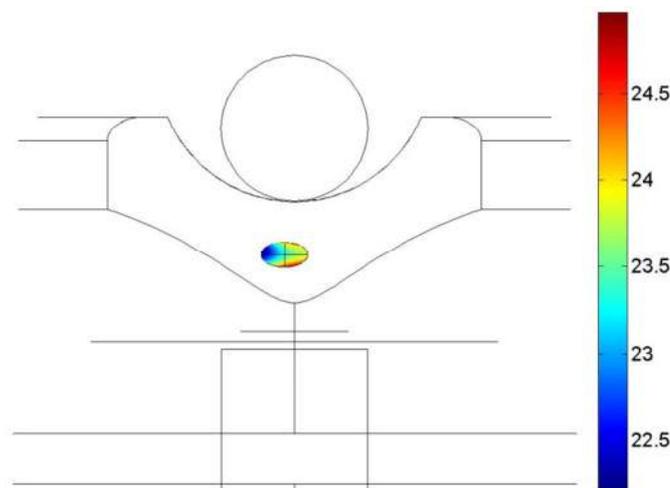


Figura 6.35 – Isolador X040 - Campo elétrico na cavidade.

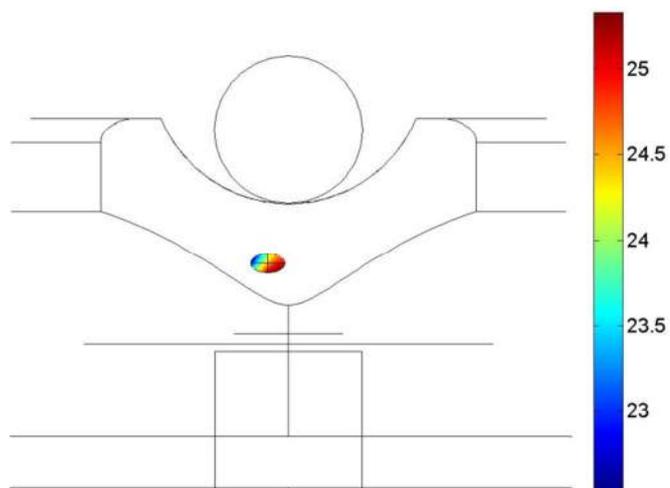


Figura 6.36 – Isolador X042 - Campo elétrico na cavidade.

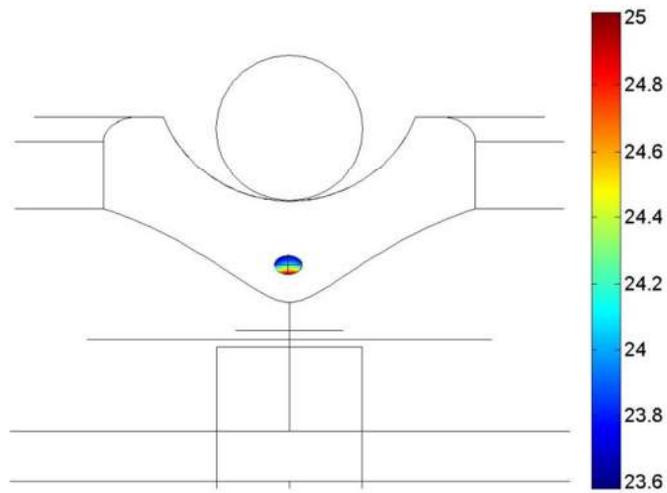


Figura 6.37 – Isolador X044 - Campo elétrico na cavidade.

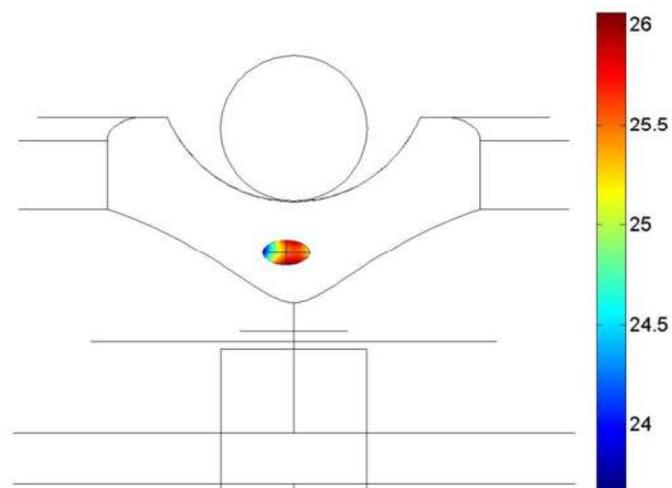


Figura 6.38 – Isolador X066 - Campo elétrico na cavidade.

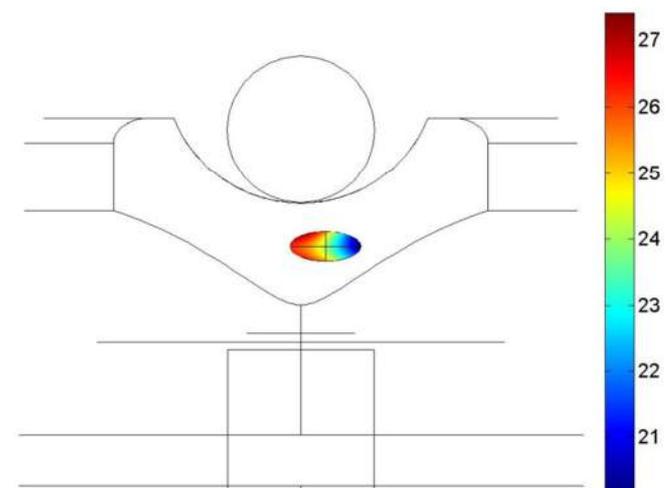


Figura 6.39 – Isolador X072 - Campo elétrico na cavidade.

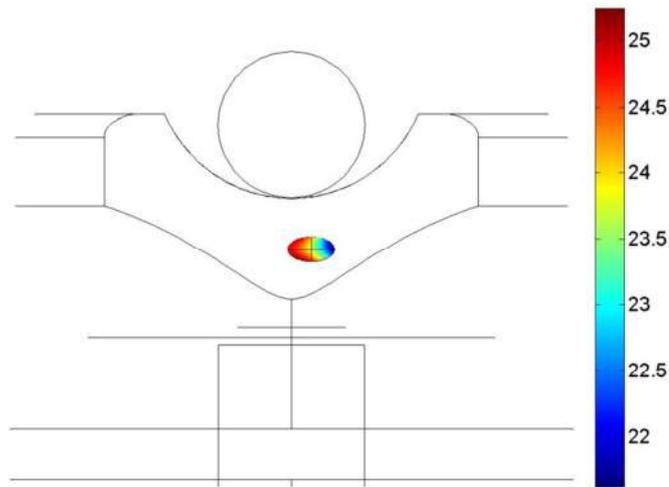


Figura 6.40 – Isolador X074 - Campo elétrico na cavidade.

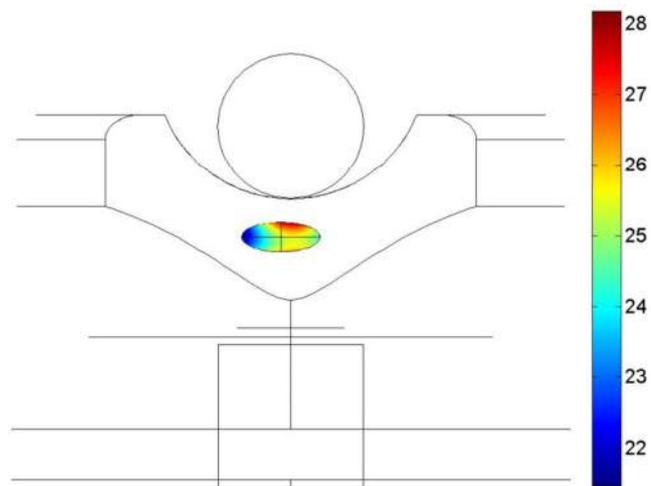


Figura 6.41 – Isolador X084 - Campo elétrico na cavidade.

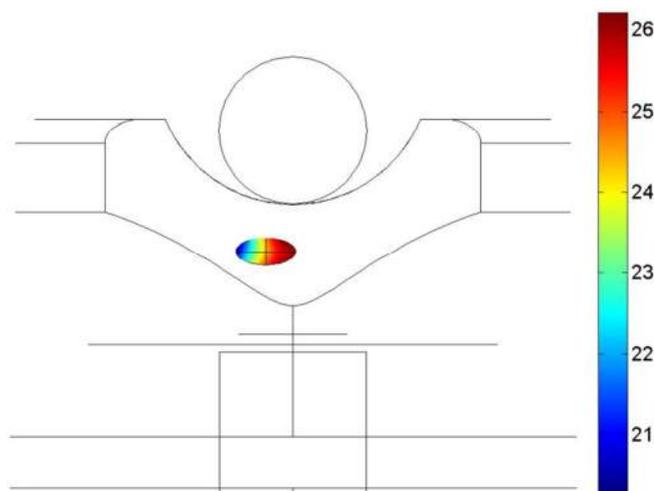


Figura 6.42 – Isolador X087 - Campo elétrico na cavidade.

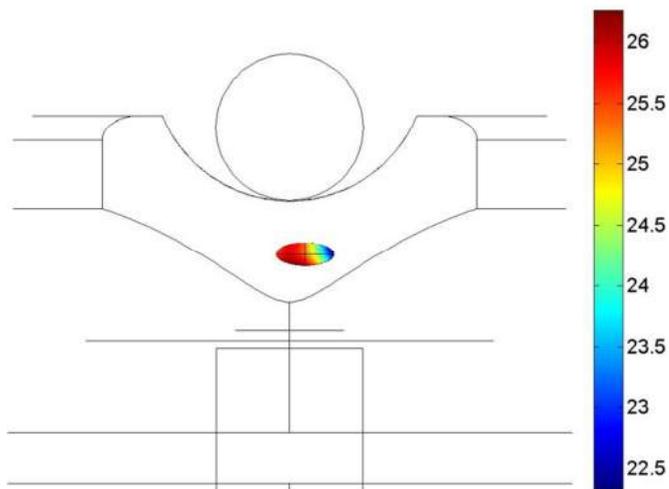


Figura 6.43 – Isolador X089 - Campo elétrico na cavidade.

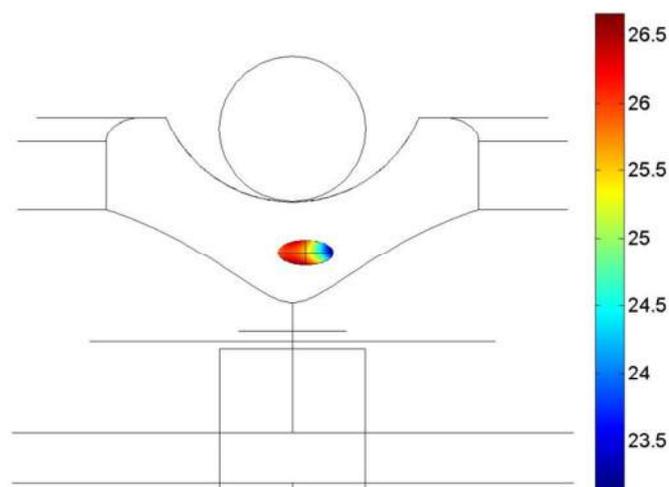


Figura 6.44 – Isolador X090 - Campo elétrico na cavidade.

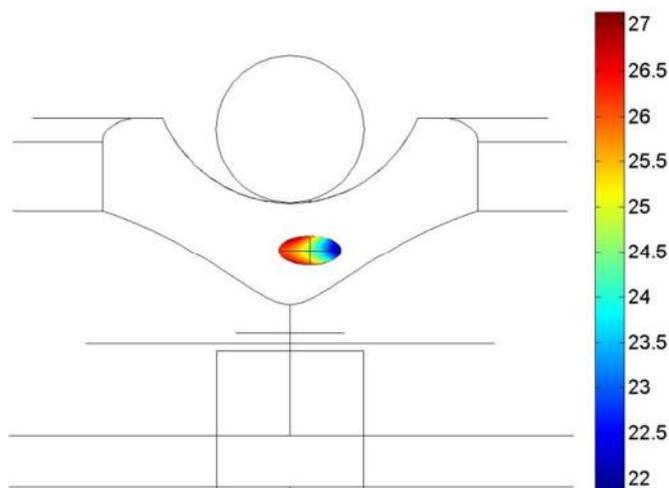


Figura 6.45 – Isolador X093 - Campo elétrico na cavidade.

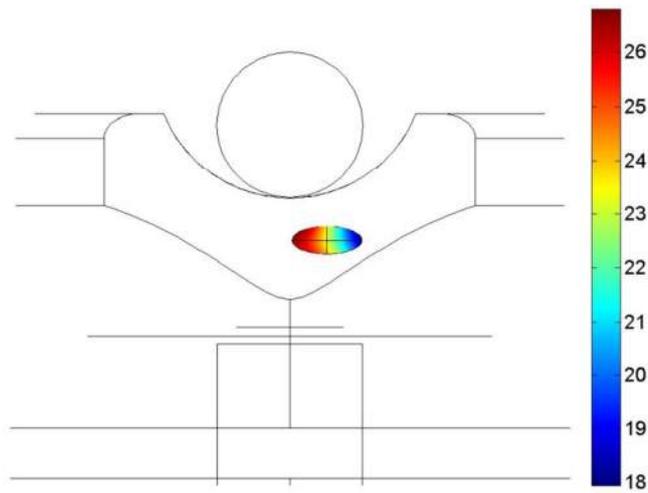


Figura 6.46 – Isolador X095 - Campo elétrico na cavidade.

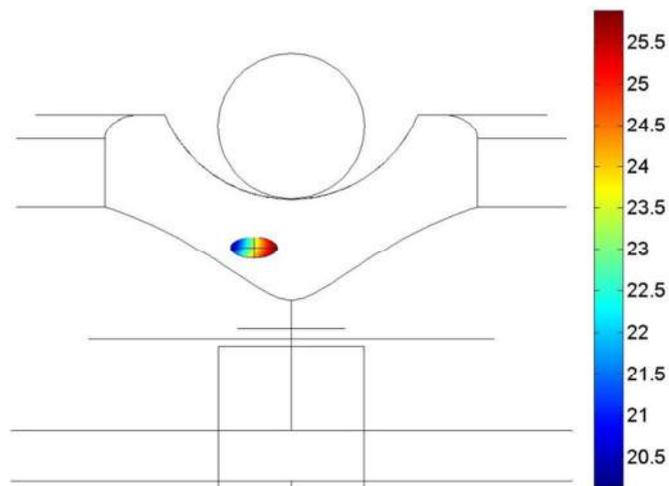


Figura 6.47 – Isolador X097 - Campo elétrico na cavidade.

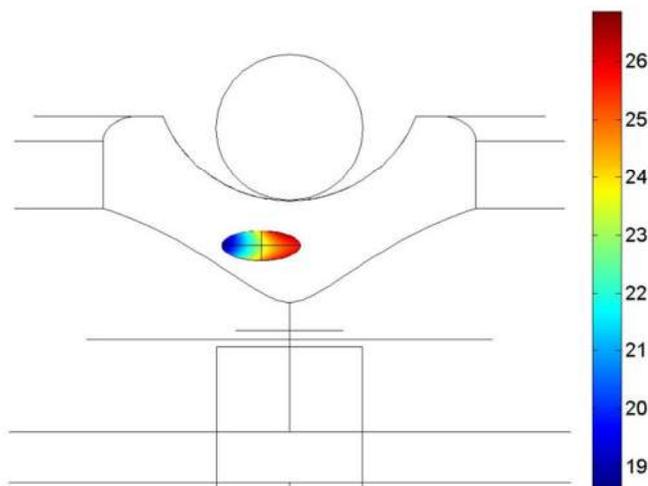


Figura 6.48 – Isolador X098 - Campo elétrico na cavidade.

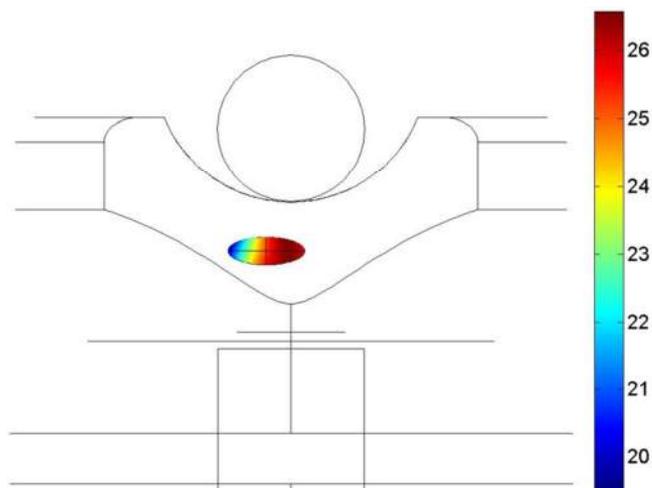


Figura 6.49 – Isolador X100 - Campo elétrico na cavidade.

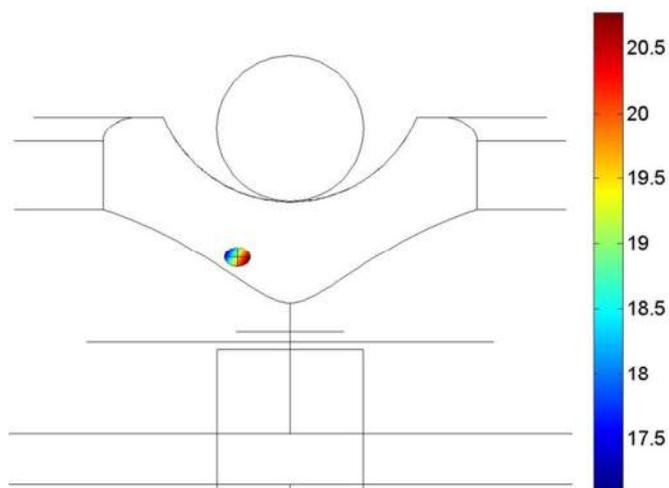


Figura 6.50 – Isolador X106 - Campo elétrico na cavidade.

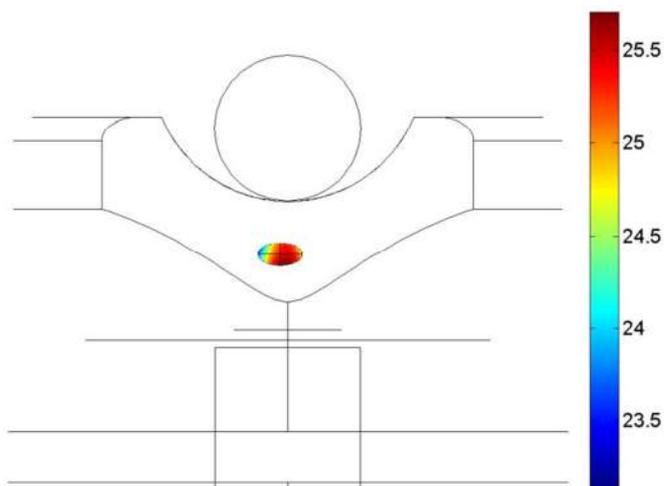


Figura 6.51 – Isolador X107 - Campo elétrico na cavidade.

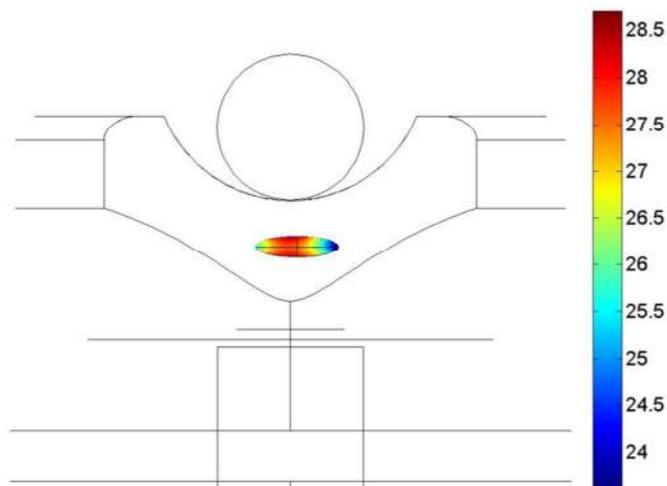


Figura 6.52 – Isolador X114 - Campo elétrico na cavidade.

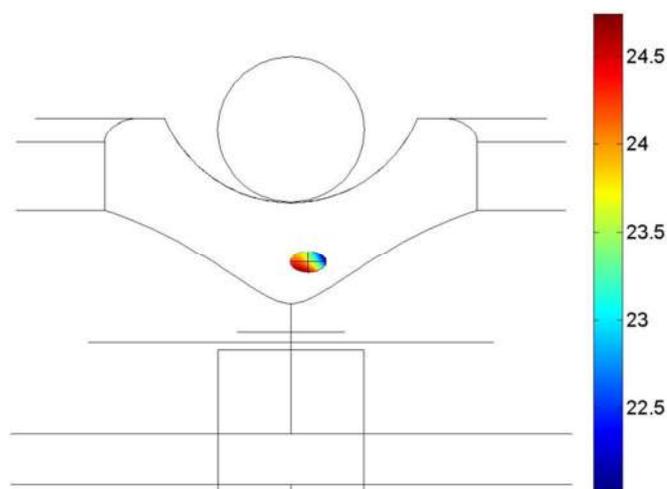


Figura 6.53 – Isolador X123 - Campo elétrico na cavidade.

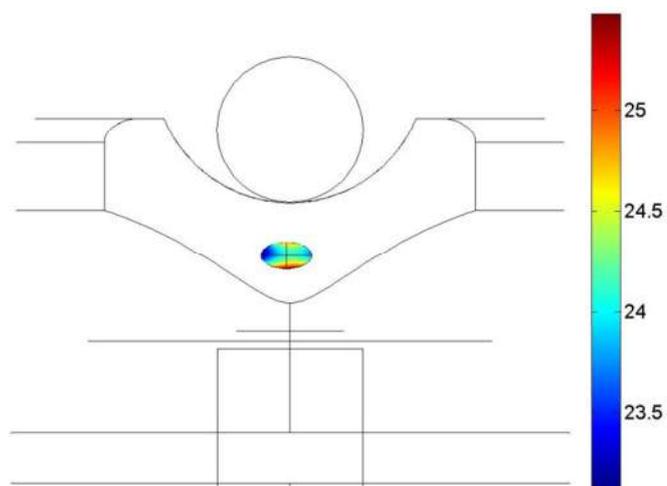


Figura 6.54 – Isolador X128 - Campo elétrico na cavidade.

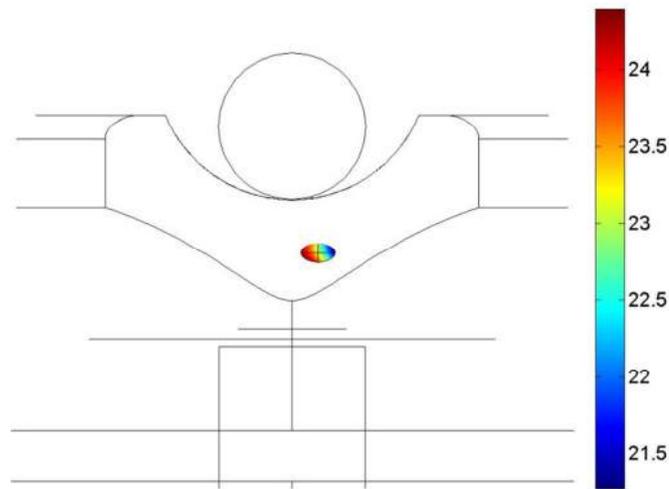


Figura 6.55 – Isolador X131 - Campo elétrico na cavidade.

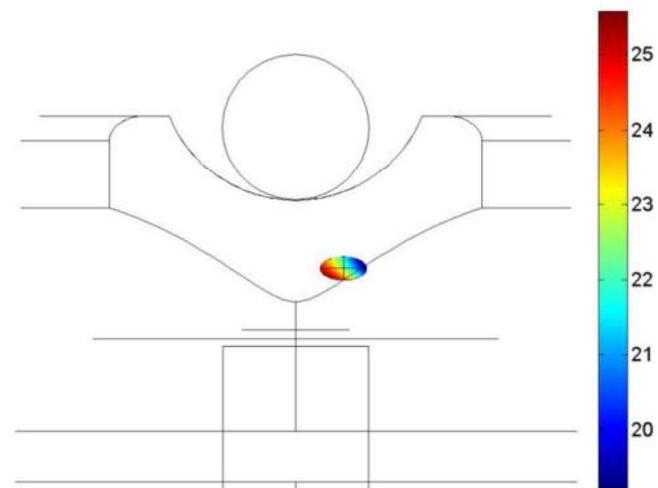


Figura 6.56 – Isolador X133 - Campo elétrico na cavidade.

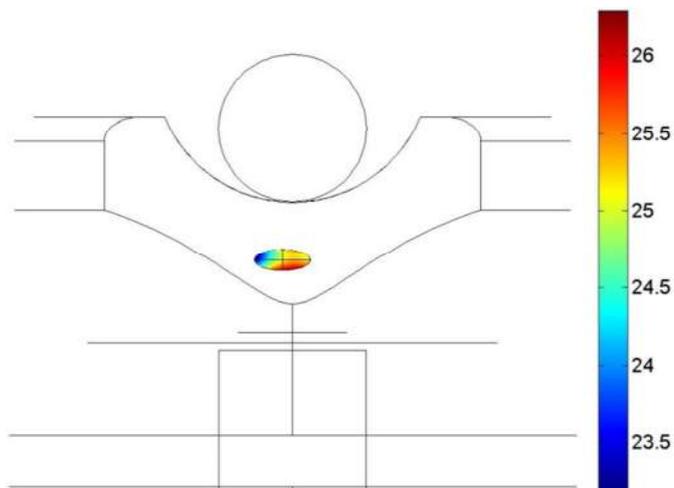


Figura 6.57 – Isolador X137 - Campo elétrico na cavidade.

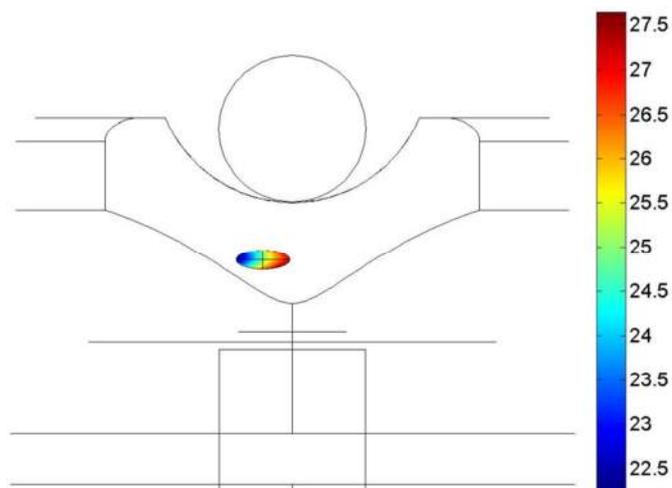


Figura 6.58 – Isolador X139 - Campo elétrico na cavidade.

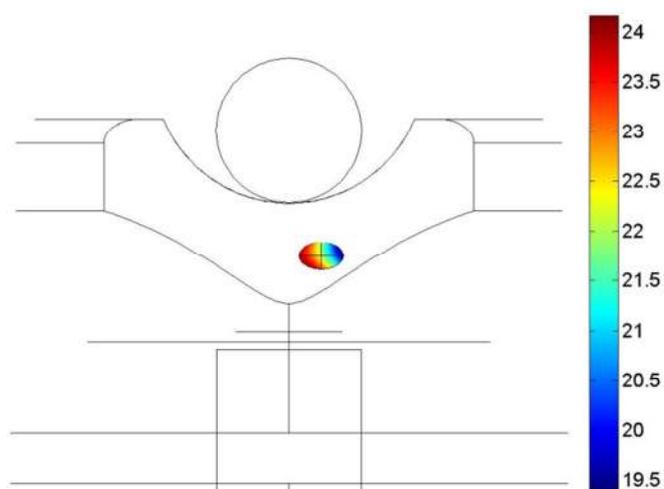


Figura 6.59 – Isolador X140 - Campo elétrico na cavidade.

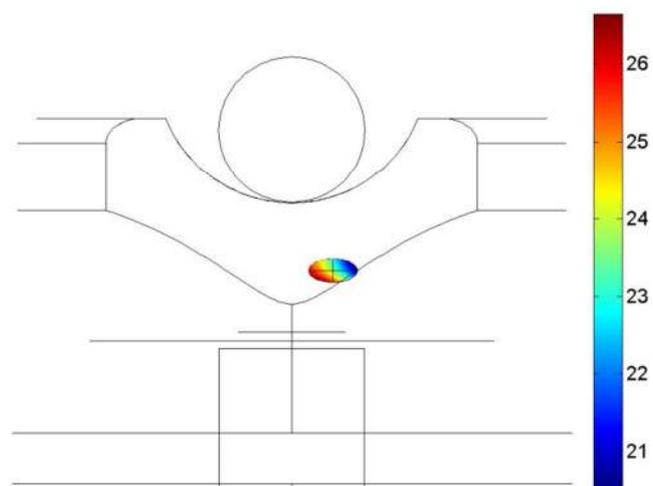


Figura 6.60 – Isolador X142 - Campo elétrico na cavidade.

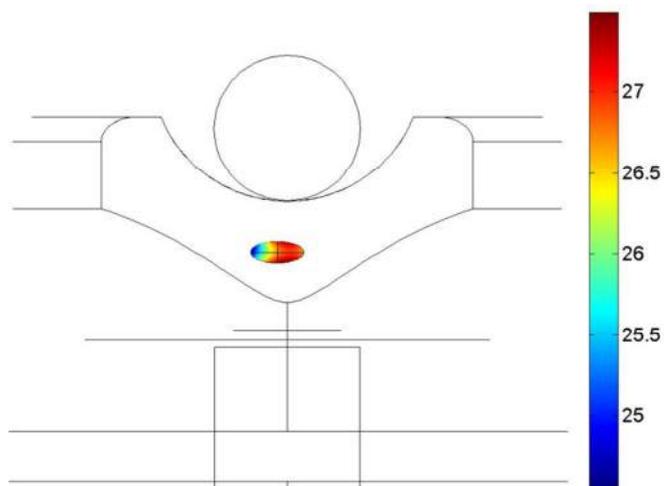


Figura 6.61 – Isolador X145 - Campo elétrico na cavidade.

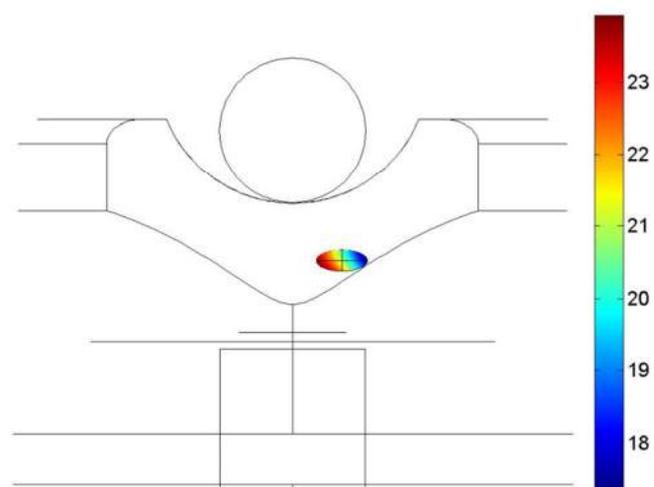


Figura 6.62 – Isolador X147 - Campo elétrico na cavidade.

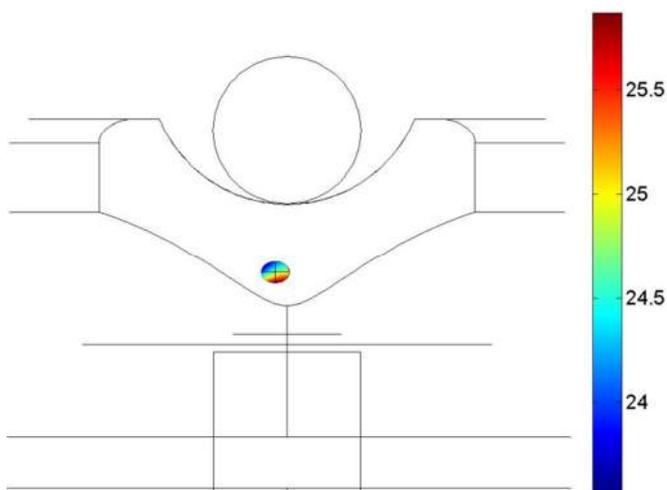


Figura 6.63 – Isolador X149 - Campo elétrico na cavidade.

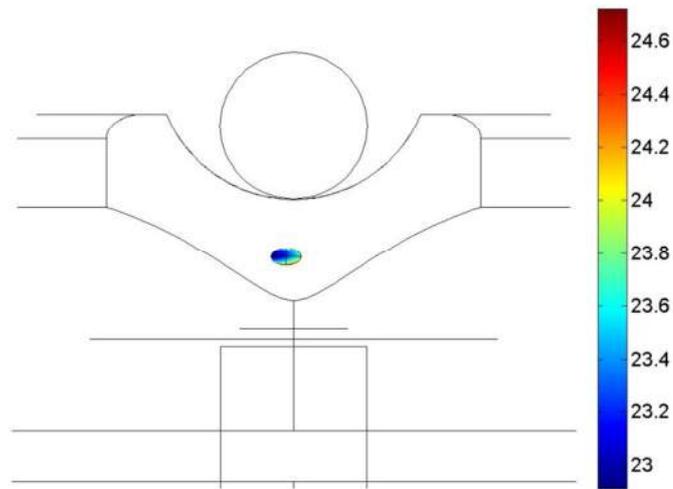


Figura 6.64 – Isolador X158 - Campo elétrico na cavidade.

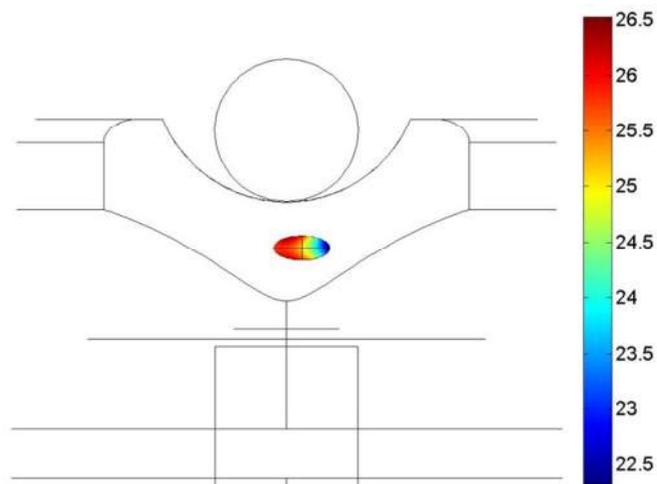


Figura 6.65 – Isolador X165 - Campo elétrico na cavidade.

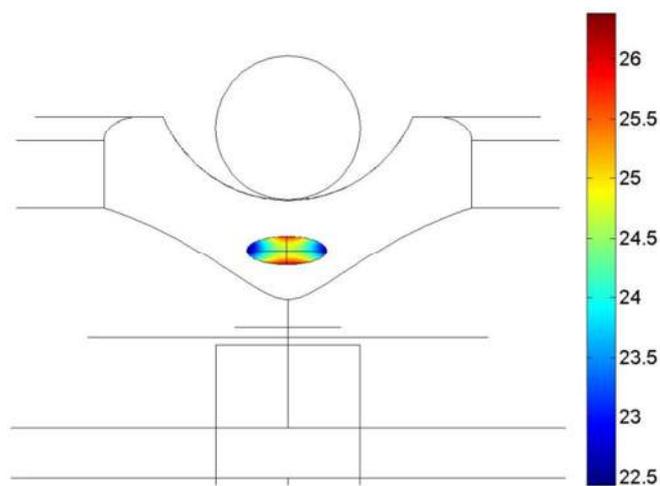


Figura 6.66 – Isolador X167 - Campo elétrico na cavidade.

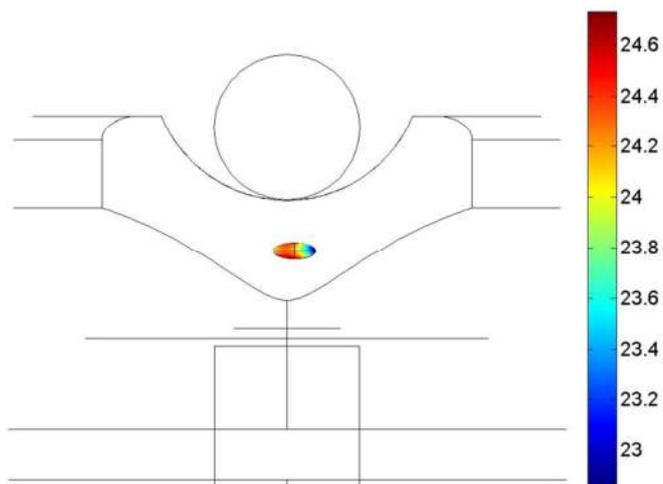


Figura 6.67 – Isolador X168 - Campo elétrico na cavidade.

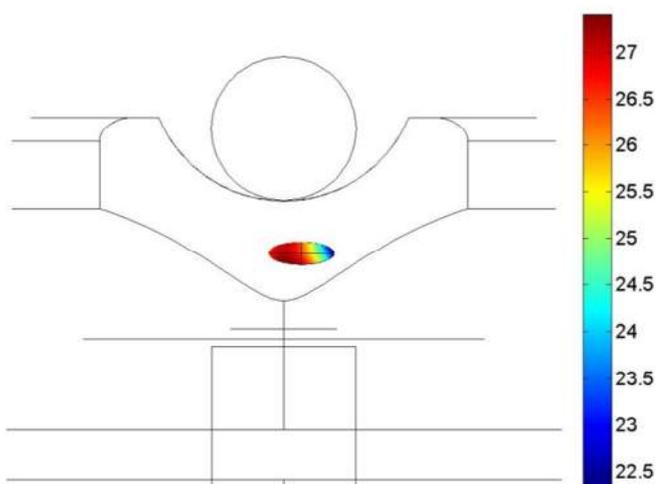


Figura 6.68 – Isolador X173 - Campo elétrico na cavidade.

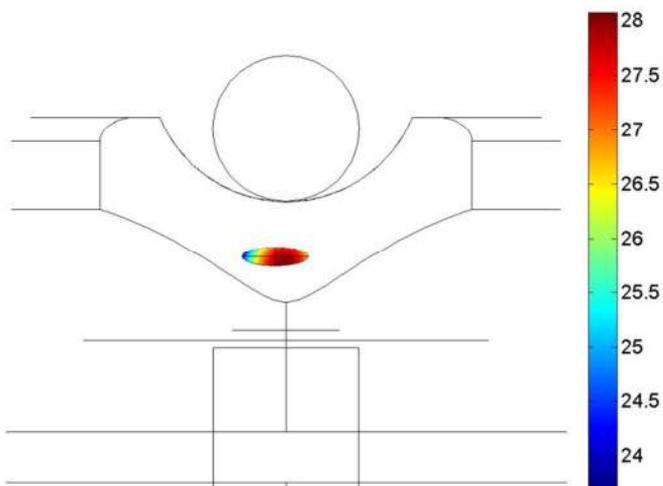


Figura 6.69 – Isolador X181 - Campo elétrico na cavidade.

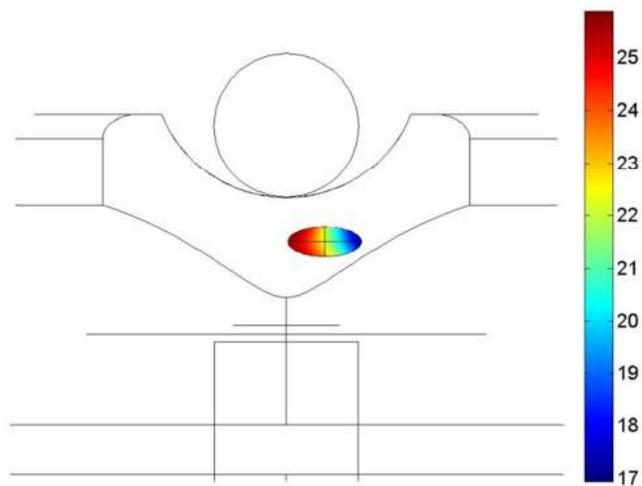


Figura 6.70 – Isolador X183 - Campo elétrico na cavidade.

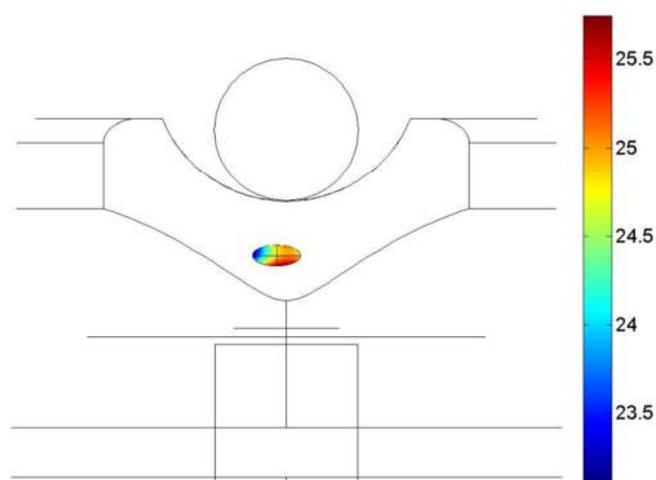


Figura 6.71 – Isolador X186 - Campo elétrico na cavidade.

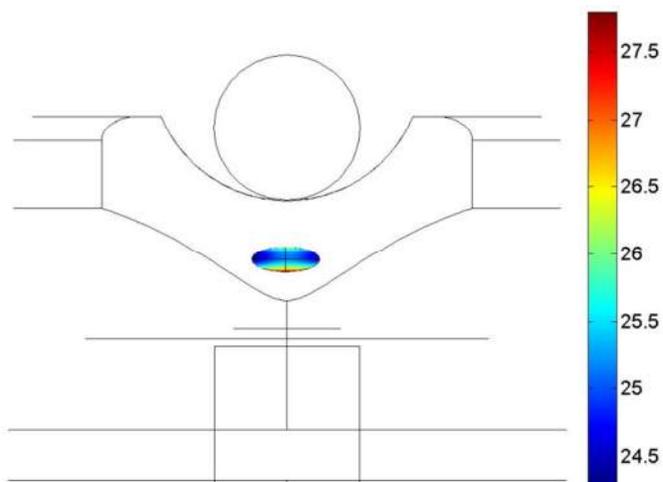


Figura 6.72 – Isolador X187 - Campo elétrico na cavidade.

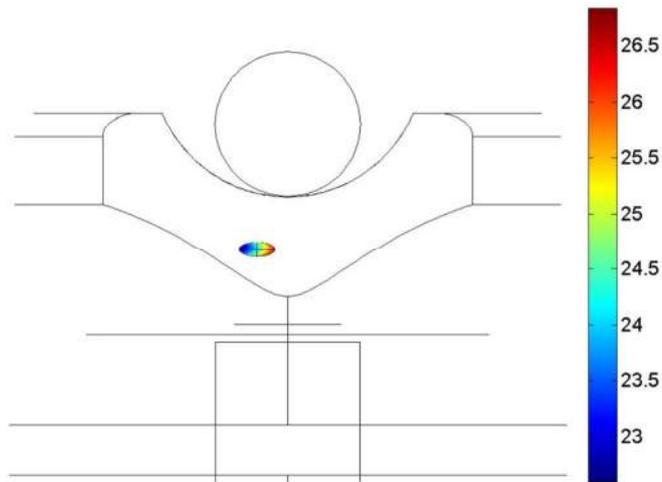


Figura 6.73 – Isolador X189 - Campo elétrico na cavidade.

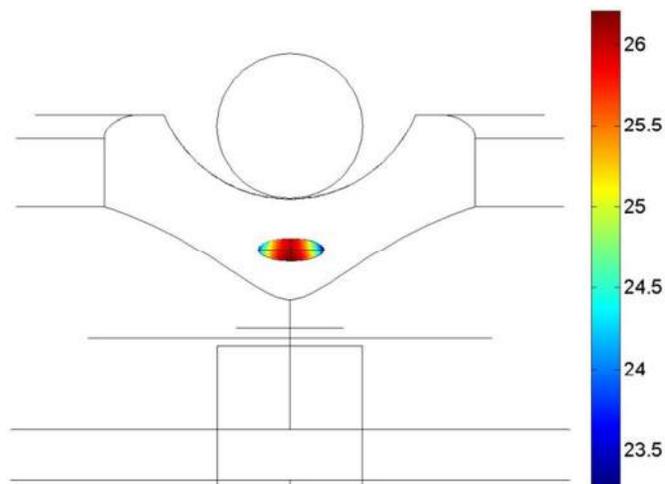


Figura 6.74 – Isolador X190 - Campo elétrico na cavidade.

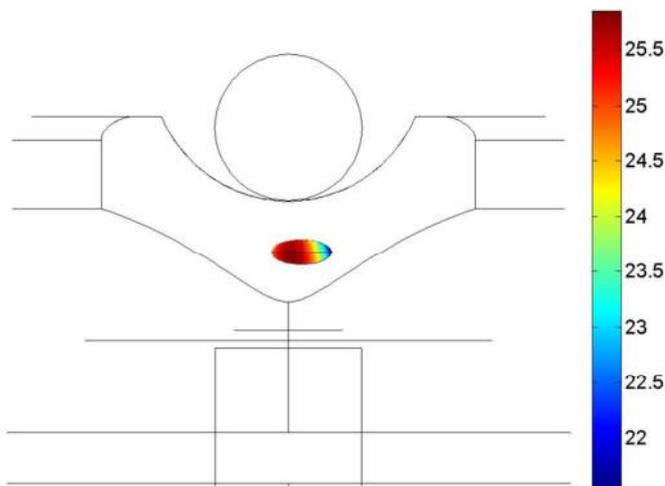


Figura 6.75 – Isolador X193 - Campo elétrico na cavidade.

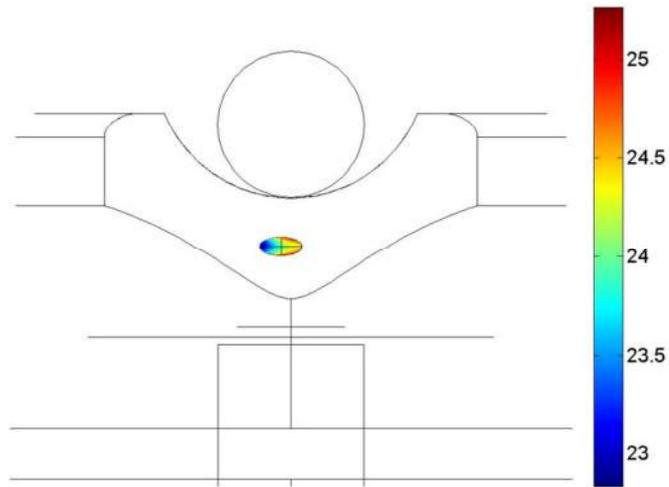


Figura 6.76 – Isolador X194 - Campo elétrico na cavidade.

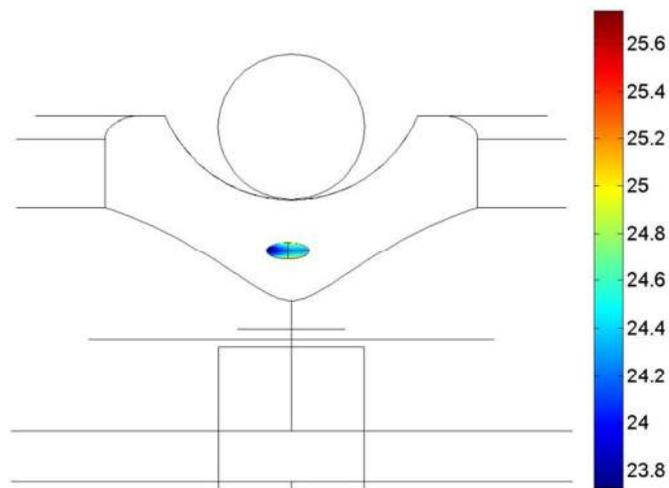


Figura 6.77 – Isolador X196 - Campo elétrico na cavidade.

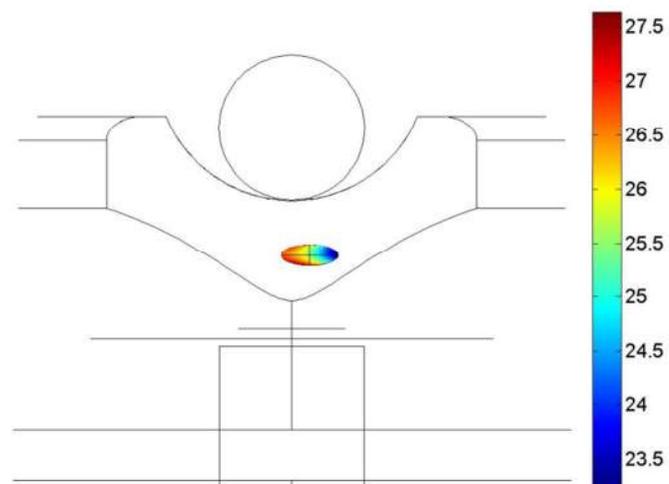


Figura 6.78 – Isolador X199 - Campo elétrico na cavidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-SALAM, M.; HUSSEIN, A., EL_MORSHEDY, A.; RADWAN, R.; 2000. *High-Voltage Engineering: Theory and Practice*. New York: CRC Press.
- ABDEL-SALAM, M.; STANEK, E. K.; 1988. On the calculation of breakdown voltages for uniform electric fields in compressed air and SF₆. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.24, no.6 (nov. – dec.), p.1025-1030.
- ALSTON, L. L.; 1968. *High Voltage Technology*. Oxford: Oxford Univ. Press.
- AUTOCAD.EXE; 2011. E.49.0.0 . Programa que se enquadra no conceito de tecnologia CAD utilizado mundialmente para criação de projetos em computador. Autodesk Inc.
- BARTINIKAS, R.; McMAHON, E. J.; 1979. *Engineering Dielectrics: Corona Measurement and Interpretation*, vol. 1. 1. ed. Baltimore: ASTM (American Society for testing and Materials).
- BARTINIKAS, R.; 2002. Partial Discharges Their Mechanis, Detection and Measurement. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 9, no.5 (out.), p.763-808.
- BASTOS, J. P.; SADOWSKI, N.; 2003. *Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods*. 1. ed. New York: Marcel Dekker, Inc.
- BEZERRA, J. M. B.; AQUINO, R. R. B.; OLIVEIRA, J. B.; NÓBREGA NETO, O.; SILVEIRA, T. M. A.; COSTA, E. G.; NÉRI, M. G. G.; FERREIRA, T. V.; DANTAS, J. L. P.; MENDONÇA, P. L.; 2009. Avaliação de Sensor de Ultra-Som como Técnica Preditiva na Manutenção de Subestações e Linhas de Transmissão e Distribuição. P&D: Revista Pesquisa e Desenvolvimento da Aneel, Brasília, n. 3 (jun.), p. 107-109.
- BEZERRA, J. M. B.; SILVA, A. A. P.; NETO, E.M.S.; SILVA, S. H. M.; LINS, Z.D.; 2012. An experimental distribution line to develop a polymeric insulator monitoring system. In: 2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). vol., no., pp.798,802, 14-17 Oct. 2012.
- BEZERRA, R. C.; TOSTES, J. A. S.; TEIXEIRA JR., J. M. T.; LEITE, R. C.; 2010. Estudo para Aumento da Confiabilidade de Isoladores Poliméricos nas Linhas de Transmissão da Eletronorte. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (III. : maio 2010: Belém, Pará). *Anais eletrônicos*, Belém: UFPA, 2010. Disponível em: <http://www.labplan.ufsc.br/congressos/III%20SBSE%20-%202010/PDF/SBSE2010-0220.PDF>. Acesso em: 08 maio 2013.
- BOGGS, S. A. Partial Discharge – Part III: Cavity-Induced PD in Solid Dielectrics. *IEEE EIM*, v. 6, n. 6, p. 11-20, Nov./Dec. 1990.

- CHANG, D. D.; SUDARSHAN, T. S.; THOMPSON, J. E.; 1986. Analysis of Electric Stress Distribution in Cavities embedded within Dielectric Structures. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-21, no.2 (abr.), p.213-219.
- COMSOL.EXE; 2012. Versão 4.3.0.151. Programa para modelagens e simulações multifísicas. COMSOL AB.
- COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C.; 2003. Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 13, n. 1, p. 1-13.
- DAKIN, T. W.; GERHOLD, J.; KRASUCKI, Z.; LUXA, G.; OPPERMAN, G.; VIGREUX, J. WIND, G.; INKELNKEMPER, H.; 1974. Breakdown of gases in uniform fields, Paschen's curves for air, nitrogen and sulphur hexafluoride. *Electra*, n. 32, p. 64-74.
- DISSADO, L. A.; FOTHERGILL, J. C.; 1992. *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*. London: Peter Peregrinus Ltd.
- FAGUNDES, R. C.; 2008. Avaliação de acessórios poliméricos de redes compactas protegidas por meio de ensaio de multiestressamento e simulação computacional. Curitiba. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Federal de Paraná.
- FORMIGA, A. M.; SANTOS, A. F.; INONE, P. C.; MUNARO, M.; FERRACIN, R. J.; FILHO, V. S.; 2006. Avaliação do desempenho em campo de isoladores em polietileno tipo pino em redes de cabos nus de 15 KV. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (I. : jul. 2006 : Campina Grande, Paraíba). Anais. Paraíba, 2006.
- GODOI, W. C.; SILVA, R. R.; SWINKA FILHO, V.; LODDI, T.; 2005. Detecção de Defeitos em Isoladores Poliméricos por meio da Radiografia Digital e Reconhecimento de padrões. *Espaço Energia*, Curitiba, n. 02 (abr.), p. 5-11.
- GORUR, R. S.; CHERNEY E. A.; BURNHAM, J. T.; 1999. *Outdoor Insulators*. 1. ed. Phoenix: Ravi S. Gorur, Inc.
- GUTFLEISCH, F.; NIEMEYER, L.; 1995. Measurement and Simulation of PD in Epoxy Voids. *IEEE TDEI*, v. 2, n. 5, p. 729-743, Oct. 1995.
- HACKAM, R.; 1999. Outdoor HV Composite Polymeric Insulators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. vol. 6. no. 5 pp 557-585.
- HAYT JR., W. H.; BUCK, J. A.; 2003. *Eletromagnetismo*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC.
- HUSAIN, E.; NEMA, R. S.; 1982. Analysis of Paschen Curve for Air, N₂ and SF₆ Using Townsend Breakdown Equation. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol.EI-17, no.4 (aug.), p.350-353.

- ISEE.EXE; 2010. Versão 1.10.2. Programa para análise de imagem radiográfica. Oleksandr Alekseychuk. Federal Institute for Materials Research and Testing. Maio. 2010.
- KREUGER, F. H.; 1989. *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment*. 1. ed. London: Butterworths & co Ltd.
- KUFFEL, E.; ZAENGL, W.S.; KUFFEL, J.; 2002. *High Voltage Engineering Fundamentals*. 2. ed. Oxford: Oxford Newnes.
- LUCAS, J.R.; 2001. *High Voltage Engineering*. Sri Lanka: J R Lucas.
- MALIK, N. H.; AL-ARAINY, A. A.; KAILANI, A. M.; KHAN, M. J.; 1987. Discharge Inception Voltage Due To Voids In Power Cables. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol.EI-22, no.6 (dec.), p.787-793.
- MEEK J. M.; CRAGGS J.D.; 1953. *Electrical breakdown of gases*. Oxford (Clarendon Press).
- MENDONÇA, P. L.; DANTAS, J. L. P.; BEZERRA, J. M. B.; AQUINO, R. R. B.; 2008. Aplicação de Sensor de Ultra-som na Manutenção de Subestações e Linhas de Transmissão e Distribuição a partir de redes inteligentes. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE DISTRIBUCION ELECTRICA (setembro 2008: Mar del Plata, Argentina). *Anais eletrônicos*, 2010. Disponível em: [http://www.labplan.ufsc.br/congressos/Clade% 20-%202008/Trabajos/016.pdf](http://www.labplan.ufsc.br/congressos/Clade%20-%202008/Trabajos/016.pdf). Acesso em: 07 junho 2013.
- MEUNIER, G.; 2008. *The finite element method for electromagnetic modeling*. 1. ed. United States: Wiley-ISTE.
- MORSHUIS, P. H. F. *Partial Discharge Mechanisms*. Netherlands, 1993. PhD Thesis in Electrical Engineering. Delft University.
- MORSHUIS, P. H. F.; 1995. Assessment of Dielectric Degradation by Ultrawide-band PD Detection. *IEEE TDEI*, v. 2, n. 5, p. 744-760, Oct. 1995.
- NAIDU, M. S.; KAMARAJU, V.; 1995. *High Voltage Engineering*. 2. ed. McGraw-Hill.
- NERI, M. G. G.; COSTA, E. G.; GARCIA, R. W. S.; PAIVA, O. L. S.; 2005. Avaliação de Técnicas de Monitoramento de Isoladores Poliméricos. In: ENCUESTRO DE POTÊNCIA, INSTRUMENTATIONS Y MEDIDAS (6. : nov. 2005 : Montevideu). Anais. Montevideu, 2005. Disponível em: <http://epim2005.fing.edu.uy/trabajos/p42.pdf>. Acesso em: 08 maio 2013.
- REDDY, J. N.; 1993. *An Introduction to the Finite Element Method*. 2. ed. New York: McGraw-Hill Inc.
- SADIKU, M. N. O.; 2001. *Elements of Electromagnetics*. 3. ed. New York: Oxford University Press.

- SADIKU, M. N. O.; 2000. *Numerical Techniques in Electromagnetics*. 2. ed. Florida: CRC Press.
- SANDIA NATIONAL LABORATORIES; 2003. *Ionization Coefficient Approach to Modeling Breakdown in Nonuniform Geometries*. New Mexico.
- SILI, E.; KOLIATENE, F.; CAMBRONNE, J. P.; 2011. Pressure and Temperature effects on the Paschen curve. *In: Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena – CEIDP*, pp.464-467.
- UFPE; CELPE; 2008. Estudo para aplicação de sensor de ultra-som como técnica preditiva na manutenção de subestações e linhas de transmissão e distribuição. Recife.
- VASCONCELOS, J. M.; 2013. Verificação do Desempenho Térmico de Isoladores Poliméricos com Cavidade Gasosas. Recife. Relatório de estágio (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco.
- WADHWA, C. L.; 2007. *High Voltage Engineering*. 2. ed. New Delhi: New Age International.