



João Parreira Simões

Licenciado em Ciências de
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Melhoria do projeto e fabricação de dispositivos capacitivos de AT

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Mário Fernando da Silva Ventim Neves,
Professor Auxiliar,
DEE, FCT, Universidade Nova de Lisboa

Co-orientador: David José Rocha Domingues,
Professor Adjunto,
ISEC,IPC

Júri

Presidente: Prof. Doutor Luís Filipe Lourenço Bernardo
Arguente: Prof. Doutor João Miguel Murta Pina
Vogal: Prof. Doutor Mário Fernando da Silva Ventim Neves



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2018

Melhoria do projeto e fabricação de dispositivos capacitivos de AT

Copyright © João Parreira Simões, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

À minha família e amigos

AGRADECIMENTOS

Gostava de começar por agradecer ao Professor Mário Ventim não só pelo apoio dado durante esta dissertação, mas também por toda a confiança que depositou em mim durante todo o seu desenvolvimento. Agradeço ainda ao Professor David Domingues pela boa receção na Indisol e por toda a ajuda que me facultou quando lá me desloquei.

Um especial agradecimento ao Eng. Luís Gomes, engenheiro da Indisol, por toda a ajuda e apoio que me deu durante a dissertação, sem ele a mesma não teria sido possível de concretizar.

Agradeço a todos os docentes do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores por todo o conhecimento que me transmitiram durante estes anos.

Agradeço especialmente ao Nuno Vilhena e à Carla Borges por todos os ensinamentos que me deram no programa de elementos finitos utilizado para a realização desta dissertação. Gostava também de agradecer à Professora Carla Machado por se ter disponibilizado para me ensinar a trabalhar num programa de desenho, apesar de não ter sido necessário.

De todas as pessoas que entraram comigo neste curso gostava de dar um especial agradecimento ao António Bernardino, Carlos Loura, David Fouto, Francisco Soares, Hugo Sousa e Ricardo Mateus. Tornaram-se grandes amigos com que sempre pude e poderei contar em todos os momentos.

Aos meus colegas e amigos da 3.5, Miguel Lopes, Pedro Lopes, Rodrigo Francisco, Ricardo Ferreira, Andreia Ribeiro e João Duarte um especial agradecimento por todos os bons momentos de trabalho e descontração, não só durante a dissertação, mas também nas largas horas de estudo.

Um obrigado ao João Batista por me ter acompanhado à Indisol e por me acompanhar na dissertação, partilhando conhecimento que obtivemos na utilização do programa de elementos finitos.

Gostava ainda de agradecer a todos os meus amigos, em especial ao João Figueiroa-Rêgo, Rita Carvalho, António Pinheiro, Beatriz Saramago, Maria Marmourières, Catarina Veredas, Afonso Moreira Pires, Rodrigo Simões e Gonçalo Serra por toda a descontração e todos os conselhos que me deram. Fizeram-me crescer muito quanto pessoa e ajudaram-me a tomar grandes decisões a nível pessoal.

Um especial agradecimento à Ana Cordeiro por todo o apoio incondicional que me dá, por toda a ajuda em decisões a tomar, sejam elas fáceis, difíceis, a nível académico, profissional ou pessoal e toda a calma que me transmite nos momentos de maior stress e

incerteza.

Por fim o maior agradecimento a toda a minha família, em especial aos meus pais, irmã, António, Raquel e Teresa por todo o acompanhamento que me deram em todo o curso, por todos os ensinamentos que me deram durante toda a vida, e não-de continuar a dar e por me darem sempre os melhores conselhos, por mais duros que eles sejam de ouvir.

Um grande obrigado a todos, cada um contribuiu para me tornar a pessoa que sou hoje e certamente irão contribuir que cresça ainda mais. Espero nunca vos decepcionar.

RESUMO

Nesta dissertação foi estudado o comportamento de vários condensadores de baixa tensão encomendados pela Indisol num programa de elementos finitos em 2D. Estes estudos foram feitos em diversas circunstâncias, não só no seu perfeito estado, sem qualquer anomalia, mas também com várias anomalias para se perceber o seu efeito nos condensadores. Tal estudo serviu para se observar as descargas parciais presentes no condensador de baixa tensão em diferentes circunstâncias.

Após várias simulações foi feito um estudo intensivo de vários condensadores de filme. Este estudo teve não só em conta a tensão que cada condensador de baixa tensão é sujeito, mas também o custo de cada condensador e a possibilidade de haver uma redução do preço dos condensadores de baixa tensão para compras de quantidade.

Ao se encontrar um condensador que suporta a tensão a que vai ser sujeito e não tem um preço demasiado elevado, tratou-se de encomendar o mesmo para a fábrica. Abriu-se o condensador para se tirarem medidas e poder simular no mesmo programa de elementos finitos.

Passando este condensador nas simulações efetuadas no programa de elementos finitos foi construído um condensador de alta tensão com vários condensadores de baixa tensão em série. O condensador de alta tensão foi submetido a vários ensaios na fábrica estando sempre a baixo dos valores máximos admissíveis.

Palavras-chave: Condensador, Descargas parciais, Elementos finitos, Alta tensão

ABSTRACT

One of the goals of this master thesis was to study the behavior of several low voltage capacitors ordered by Indisol, in a finite element program, in 2D perspective. These simulations were made in several working conditions, not only without irregularities but also with anomalies to understand that effect in the capacitor. From those simulations we could observe the partial discharges present in a low voltage capacitor with different conditions.

After many simulations, an intensive market study of film capacitors was made. This study was not only about the voltage level that a low voltage capacitor is able to tolerate, but also the market price of the low voltage capacitor and the possibility of a quantity purchase discount.

We ordered a capacitor from the factory, after finding one that tolerates the supposed voltage and was within our price range. The capacitor was disassembled to take some measures and simulate in the finite element program.

After obtaining a positive result in the finite elements program, the final version of the high voltage capacitor was built with several low voltage capacitors in series. The high voltage capacitor was subject to several tests at the factory where it successfully passed.

Keywords: Capacitor, Partial discharge, Finite elements, High voltage

ÍNDICE

Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xix
Siglas	xxi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivos	2
1.3 Organização da Dissertação	2
2 Condensadores	5
2.1 Condensadores de Cerâmica	5
2.2 Condensadores de Filme	7
3 Descargas Parciais	17
3.1 Classificação das Descargas Parciais	17
3.1.1 Descarga Parcial Interna	17
3.1.2 Descarga Parcial Superficial	18
3.1.3 Descarga Parcial Efeito de Coroa	18
3.2 Teoria das Descargas Parciais	18
3.3 Causas e Consequências	20
3.4 Detecção e Observação de Descargas Parciais	21
4 Simulação em Programa de Elementos Finitos de Condensadores Utilizados Anteriormente	25
4.1 Condensador de 470 nF	30
4.1.1 Falhas em Ar	30
4.1.2 Falhas em Óleo	36
4.2 Condensador de 560 nF	41
4.2.1 Falhas em Ar	41
4.2.2 Falhas em Óleo	49
4.3 Condensador de 680 nF	54
4.3.1 Falhas em Ar	54

4.3.2	Falhas em Óleo	61
4.4	Medidas Alternativas Condensador de 470 nF	67
4.4.1	Polipropileno com Medidas Superiores às Originais	67
4.4.2	Polipropileno com Medidas Inferiores às Originais	68
4.5	Efeito da Solda no Condensador de 470nF	69
5	Escolha, Simulação e Ensaio do Condensador Escolhido	73
5.1	Escolha do Condensador	73
5.2	Simulação do Condensador num Programa de Elementos Finitos	76
5.3	Ensaio do Condensador de 10 nF	79
5.3.1	Condensador de 9,76 nF	79
5.3.2	Condensador de 10,23 nF	82
6	Conclusão e Trabalho Futuro	85
6.1	Conclusão	85
6.2	Trabalho Futuro	86
	Bibliografia	87
I	Datasheet do Condensador Utilizado	89
II	Tensões de Ensaio e Respetivas Descargas Parciais	91
III	Condensadores Abertos	95
IV	Circuito de Ensaio	97
V	Peça Final	99

LISTA DE FIGURAS

2.1	Condensador de Cerâmica de Disco	6
2.2	Condensador de Cerâmica de Bloco	6
2.3	Condensador de Filme Metalizado	9
2.4	Condensador de Filme	9
2.5	Combinação de Condensadores	10
2.6	Efeito de Autorreparação	11
2.7	Variação da Capacidade em função da Temperatura	13
2.8	Variação da Capacidade em função da Frequência	14
2.9	Condensadores X e Y	15
3.1	Classificação de DP	18
3.2	Avalanche de Townsend	19
3.3	Curva de Paschen	21
3.4	Equivalente Elétrico para Medição de Descargas Parciais	22
3.5	Observação de Descargas Parciais com Resolução de Fase	23
4.1	Corte do Condensador de Filme	25
4.2	Anomalias Simuladas	26
4.3	Ampliações Feitas ao Condensador	27
4.4	Exemplo de uma Malha de Elementos Finitos	27
4.5	Medidas dos Condensadores	29
4.6	Potencial Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Sem Anomalias	30
4.7	Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Sem Anomalias	31
4.8	Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Bolhas Após a Metalização	32
4.9	Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Bolhas no Dielétrico	33
4.10	Potencial Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Falha na Metalização de Baixo	34
4.11	Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Falha na Metalização de Baixo	35
4.12	Potencial Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Falhas nos Elétrodos	36
4.13	Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Falhas nos Elétrodos	36
4.14	Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Óleo, Sem Anomalias	37
4.15	Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Óleo, Bolhas Após a Metalização	38
4.16	Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Óleo, Bolhas no Dielétrico	39
4.17	Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Óleo, Falhas na Metalização de Baixo	40

4.18 Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Óleo, Falhas nos Eléttodos	41
4.19 Potencial Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Sem Anomalias	42
4.20 Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Sem Anomalias	42
4.21 Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Bolhas Após a Metalização . . .	43
4.22 Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Bolhas no Dielétrico	45
4.23 Potencial Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Falha na Metalização de baixo	46
4.24 Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Falha na Metalização de Baixo .	47
4.25 Potencial Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Falhas nos Eléttodos	48
4.26 Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Falhas nos Eléttodos	48
4.27 Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Óleo, Sem Anomalias	49
4.28 Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Óleo, Bolhas Após a Metalização .	50
4.29 Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Óleo, Bolhas no Dielétrico	51
4.30 Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Óleo, Falhas na Metalização de Baixo	53
4.31 Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Óleo, Falhas nos Eléttodos	54
4.32 Potencial Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Sem Anomalias	55
4.33 Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Sem Anomalias	55
4.34 Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Bolhas Após a Metalização . . .	56
4.35 Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Bolhas no Dielétrico	58
4.36 Potencial Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Falhas na Metalização de Baixo	59
4.37 Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Falhas na Metalização de Baixo	60
4.38 Potencial Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Falhas nos Eléttodos	61
4.39 Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Falhas nos Eléttodos	61
4.40 Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Óleo, Sem Anomalias	62
4.41 Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Óleo, Bolhas Após a Metalização .	63
4.42 Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Óleo, Bolhas no Dielétrico	64
4.43 Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Óleo, Falhas na Metalização de Baixo	66
4.44 Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Óleo, Falhas nos Eléttodos	67
4.45 Campo Elétrico, Condensador com Medidas Superiores às Originais, Óleo, Sem Anomalias	68
4.46 Campo Elétrico, Condensador com Medidas Inferiores às Originais, Óleo, Sem Anomalias	69
4.47 Potencial Elétrico, Efeitos da Solda no Condensador de 470 nF, Óleo, Sem Anomalias	70
4.48 Campo Elétrico, Efeitos da Solda no Condensador de 470 nF, Óleo, Sem Ano- malias	70
5.1 Medidas do Condensador Utilizado	76
5.2 Potencial Elétrico do Condensador Utilizado	78
5.3 Campo Elétrico do Condensador Utilizado	78
5.4 Campo Elétrico do Condensador Utilizado, 407 nF	79
5.5 Descargas Parciais à Tensão de 50 kV, Peça de 9,76 nF	80

5.6	Descargas Parciais à Tensão de 28,8 kV, Peça de 9,76 nF	81
5.7	Descargas Parciais à Tensão de 16,6 kV, Peça de 9,76 nF	81
5.8	Descargas Parciais à Tensão de 28,8 kV, Peça de 10,23 nF	83
5.9	Descargas Parciais à Tensão de 22 kV, Peça de 10,23 nF	83
II.1	Descargas Parciais à Tensão de 5 kV na Subida de Tensão, 6,1 pC	91
II.2	Descargas Parciais à Tensão de 24,8 kV na Subida de Tensão, 8,3 pC	92
II.3	Descargas Parciais à Tensão de 26,8 kV na Subida de Tensão, 13,9 pC	92
II.4	Descargas Parciais à Tensão de 36 kV na Subida de Tensão, 118 pC	93
II.5	Descargas Parciais à Tensão de 36 kV na Descida de Tensão, 122 pC	93
II.6	Descargas Parciais à Tensão de 32 kV na Descida de Tensão, 78,8 pC	94
II.7	Descargas Parciais à Tensão de 30 kV na Descida de Tensão, 43,6 pC	94
III.1	Condensador de 470 nF Utilizado Anteriormente	95
III.2	Condensador de 470 nF Utilizado	96
IV.1	Circuito de Ensaio	97
V.1	Peça Final em Ar	99
V.2	Peça Final em Silicone	100

LISTA DE TABELAS

2.1	Características dos Metais	12
2.2	Comparação entre Condensadores	14
2.3	Subclasses de Condensadores do tipo X	15
2.4	Subclasses de Condensadores do tipo Y	15
4.1	Teste de Condensadores	25
4.2	Constante Dielétrica e Campo de Disrupção	28
4.3	Número de Condensadores e Tensão a que está Sujeito	29
4.4	Medidas dos Condensadores	29
4.5	Medidas para uma Espessura Superior do Polipropileno	67
4.6	Comparação de Valores dos Diversos Campos Elétricos	71
5.1	Condensadores Pesquisados	75
5.2	Medidas do Condensador Utilizado	76
5.3	Possibilidades do Condensador Final	79
5.4	Tensões de Descida e Respetivas Descargas Parciais	80
5.5	Tensões de Subida e Respetivas Descargas Parciais	80
6.1	Comparação dos Três Condensadores	86

SIGLAS

AC Corrente Alternada (*Alternate Current*).

AT Alta Tensão.

DC Corrente Contínua (*Direct Current*).

DP Descargas Parciais.

PEN Naftalato de Polietileno (*Polyethylene Naphthalene*).

PET Tereftalato de Polietileno (*Polyethylene Terephthalene*).

PP Polipropileno.

PPS Sulfureto de Polifenileno (*Polyphenylene Sulfide*).

CAPÍTULO

INTRODUÇÃO

Os dispositivos capacitivos de Alta Tensão (AT) podem, em geral, ser constituídos com dielétrico cerâmicos ou por empilhamento de elementos em filme poliédrico, havendo vantagens e inconvenientes numa e noutra solução.

Na presente dissertação são estudados os condensadores de cerâmica e de filme, de modo a perceber como estes funcionam e as suas características.

É também abordado o problema das Descargas Parciais (DP's), as diferentes classificações consoante o sítio onde ocorrem, o motivo de acontecerem, as causas e consequências que têm nos materiais e o seu método de observação.

Com estes dois estudos tenciona-se perceber porque existem DP's nos condensadores usados e tentar diminuir as descargas parciais para as várias tensões a que o condensador irá estar sujeito. Para isso serão estudados vários condensadores de baixa tensão e várias capacidades para o condensador de alta tensão por estes composto, desde 8,5 nF até 10 nF, sendo que ao alterar a capacidade final do condensador irá estar-se a diminuir ou aumentar a tensão a que cada condensador de baixa tensão é sujeito.

Por imposição da Indisol o condensador terá de passar no ensaio de descargas parciais. Este ensaio baseia-se em sujeitar o condensador a diversas tensões e observar se as descargas parciais têm um valor inferior ao permitido. Neste teste os resultados mais importantes são os da tensão de descida, sendo assim, o condensador a uma tensão de 50 kV terá apenas de não sofrer danos físicos, à tensão de 28,8 kV terá de aguentar cerca de 15 s com descargas parciais inferiores a 50 pC e por fim terá de aguentar novamente cerca de 15 s a uma tensão de 16,6 kV com descargas parciais inferiores a 20 pC.

1.1 Motivação

Foi proposta a melhoria e fabricação de um dispositivo capacitivo de AT, condensador, pela empresa Indisol.

O condensador em questão é de 8,5 nF. Este é conseguido utilizando uma ligação em série de 48 condensadores de 410 nF. O condensador final está submetido a uma tensão de 28,8 kV, o que faz com que os condensadores pelo qual é constituído estejam a uma elevada tensão, sofrendo DP's.

Sendo que o condensador está com problemas de descargas parciais, e sabendo que é utilizado indiretamente para o bem-estar de todos nós, neste caso é utilizado como divisor de tensão para a monitorização das tensões da rede e para comunicação PLC, foi dado o contributo para o fabrico de um novo condensador de alta tensão para que esta monitorização e comunicação possa ser efetuada com um condensador mais fiável e com uma duração superior.

1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação é diminuir o máximo possível as DP's que ocorrem nos condensadores. Para tal será utilizado um programa de elementos finitos para simular diversos condensadores que a Indisol já tinha comprado para a construção de uma peça final que não cumpriu com os requisitos.

Após esta simulação irão ser pesquisados condensadores que suportem a tensão à qual vão estar sujeitos e que não tenham um preço demasiado elevado.

Como já referido, para se diminuir a tensão em cada condensador poderão ser associados mais condensadores em série, diminuindo assim a capacidade do condensador final até no mínimo 8,5 nF.

Quando o novo condensador de baixa tensão chegar à fábrica este irá ser aberto e serão retiradas algumas medições para a sua simulação num programa de elementos finitos. O condensador será também ensaiado para se retirar a sua real capacidade e a tensão máxima suportada.

Caso se observe que os resultados do condensador de baixa tensão escolhido são melhores que os já existentes, será feita uma peça final, condensador de alta tensão, com estes condensadores em série e testada para se concluir se passa nos ensaios a que esta é sujeita.

1.3 Organização da Dissertação

No segundo capítulo abordam-se dois tipos de condensadores, os de cerâmica e os de filme. Neste capítulo pode-se perceber um pouco melhor como estes funcionam.

O terceiro capítulo baseia-se no tema das descargas parciais (DP). Aqui podemos perceber como estas se classificam, os motivos para ocorrerem, as suas causas e consequências e como estas se podem detetar e observar.

O quarto capítulo reflete as simulações efetuadas num programa de elementos finitos. Neste capítulo é possível perceber um pouco como o condensador se comporta tanto no seu perfeito estado como com alguns defeitos.

No quinto capítulo existe a escolha do condensador que irá ser utilizado para o fabrico da peça final, a simulação do mesmo num programa de elementos finitos e o ensaio da peça final.

No sexto capítulo pode-se encontrar não só a conclusão de toda a dissertação, assim como algumas sugestões de trabalho futuro.

CAPÍTULO 2

CONDENSADORES

Os condensadores são peças fulcrais quando se trata de qualquer circuito elétrico. Estes armazenam a carga para uma futura descarga, lenta ou rápida.

Apesar de haver diversos tipos de condensadores, neste capítulo é feito um estudo um pouco mais profundo de apenas dois dos existentes. Este estudo tem em consideração a sua composição:

- Cerâmica;
- Filme;
- Alumínio Eletrolítico;
- Tântalo;
- Vidro;
- Mica.

2.1 Condensadores de Cerâmica

Existe um tipo de condensadores de cerâmica muito parecido com os convencionais de placas paralelas. É feita uma forma circular ou quadrada de cerâmica e em faces opostas revestida com material condutor, como se pode observar na figura 2.1. Após este processo o condensador é submetido a altas temperaturas, formando assim uma estrutura densa. Por fim são soldadas à estrutura condutora os terminais de metal. Estes são dos condensadores mais baratos existentes [1].

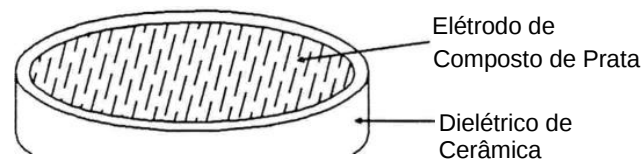


Figura 2.1: Condensador de Cerâmica de Disco. Adaptado de [1]

Outro tipo de condensadores de cerâmica, conhecido hoje em dia como a construção típica, é conhecido por ter uma maior capacidade por volume. São constituídos por várias camadas de elétrodos de metal num bloco de cerâmica, os elétrodos apenas saem nas pontas onde encaixam numa terminação também metálica, como se pode observar na figura 2.2.

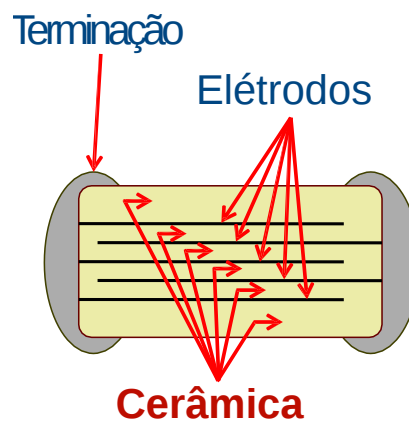


Figura 2.2: Condensador de Cerâmica de Bloco. Adaptado de [2]

Neste caso é possível calcular a capacidade do condensador através da equação 2.1.

$$C = (8,85 \times 10^{-12}) \times \epsilon_r \times \frac{A}{D} \times N \quad (2.1)$$

Em que:

C - Capacidade do condensador (medida em Farad, F);

ϵ_r - Constante dielétrica relativa;

A - Área que fica entre elétrodos opostos (medida em metros quadrados, m^2);

D - Espessura da cerâmica entre elétrodos (medida em metros, m);

N - Número de elétrodos;

Os condensadores deste tipo são mais caros, isto deve-se a terem que ser utilizados materiais preciosos como platina paládio ou ouro. Estes materiais são necessários uma vez que o seu processo de fabrico passa por uma parte onde os materiais são submetidos a uma temperatura acima dos 1000 °C. O primeiro processo de altas temperaturas serve

para unir uma placa de eletrodo e uma de dielétrico (cerâmica). Após esta fase são unidas várias placas e sofre outro processo de altas temperaturas para unir as várias placas já criadas, formando assim um bloco sólido.

Os condensadores de cerâmica estão divididos em duas classes: Classe 1 e classe 2.

Classe 1 - Têm um coeficiente de temperatura previsível, são os mais estáveis para diversas temperaturas.

Classe 2 - São os mais conhecidos devido à elevada capacidade por unidade de valor. Os condensadores de classe 2 são influenciados por:

- Tensão - A tensão DC reduz tanto a capacidade do condensador como o seu fator de dissipação. A tensão AC tende a aumentar tanto a capacidade como o fator de dissipação do condensador. Para elevadas tensões AC ambas as características tendem a baixar, como na tensão DC.
- Frequência - A variação da tensão influencia também tanto a capacidade do condensador, como o seu fator de dissipação.
- Tempo - Tal como acontece com a tensão, frequência e temperatura, também com o passar do tempo o condensador perde capacidade e o seu fator de dissipação. O envelhecimento é causado devido ao realinhamento dos cristais da cerâmica, causando uma perda de capacidade e fator de dissipação exponencial. Após um período sem uso do condensador este volta à sua estrutura inicial, tanto de capacidade como de fator de dissipação.

O fator de dissipação que se pode encontrar na equação 2.2 e 2.3, é a relação entre o comportamento capacitivo e resistivo do condensador, este último porque um condensador tem sempre uma parte resistiva, salvo se for ideal. Quanto menor for o fator de dissipação melhor [1].

$$FD = \frac{R}{X_C} \quad (2.2)$$

$$FD = 2\pi fCR \quad (2.3)$$

2.2 Condensadores de Filme

Inicialmente os condensadores de filme eram feitos de papel molhado em produtos químicos com propriedades dielétricas. Apesar de ser um método antigo este continua a ser utilizado, pois tem vantagens em relação aos condensadores de filme de plástico. Normalmente apenas é usado um tipo de plástico por condensador, apesar de ser possível uma

diversa combinação de compostos, dois tipos de plástico, plástico e papel ou até plástico e papel molhado em produtos químicos com propriedades dielétricas.

A grande vantagem dos dielétricos de filme de plástico, por serem sintéticos, é que estes podem ser construídos de modo a cumprir mais rigorosamente as especificações requeridas, tais como a espessura do dielétrico ou a elevada resistência ao calor.

Nestes condensadores utilizam-se vários tipos de plásticos:

- Polipropileno;
- Tereftalato de polietileno;
- Naftalato de polietileno;
- Sulfureto de polifenileno;

Com os condensadores de filme de plástico consegue-se uma grande redução de tamanho comparando com os de papel. Para a mesma capacidade é capaz de se reduzir o tamanho até duas vezes. A grande vantagem destes condensadores é o seu maior isolamento para uma gama de temperaturas mais alargada. Este isolamento diminui quando os condensadores são impregnados.

Existem ainda condensadores de filme metalizado, como se pode observar nas figuras 2.3 e 2.4a. Estes, em vez de serem compostos por uma camada de plástico e uma de metal, é impressa uma fina camada de metal no plástico, ficando assim o plástico metalizado. Com este método é possível poupar ainda mais espaço do que nos condensadores de plástico [1].

São utilizadas também combinações de filme metalizado com camadas de plástico e metal, tal como se pode observar na figura 2.4b.

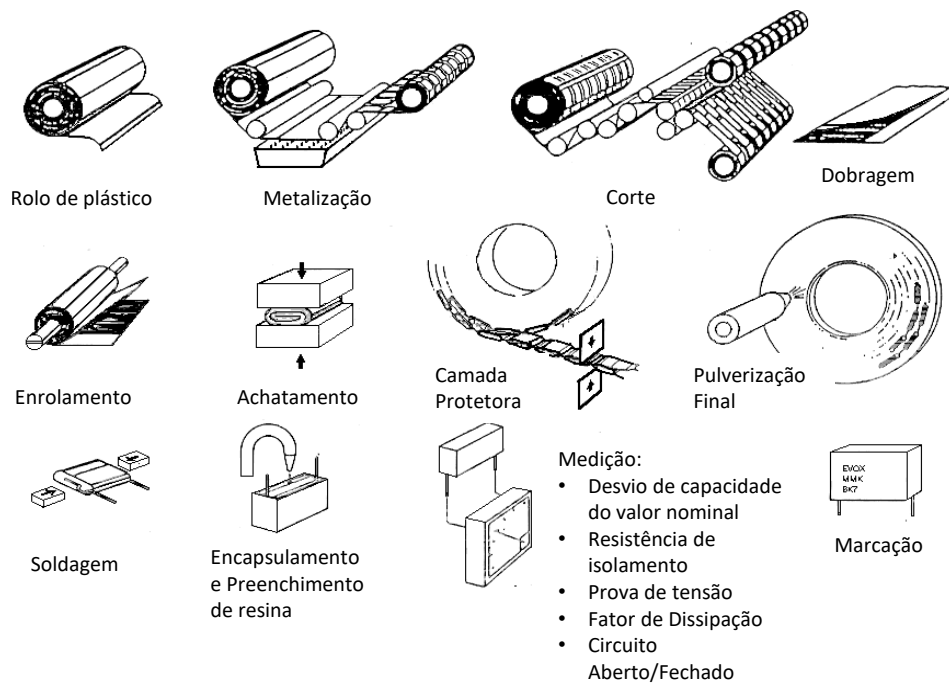


Figura 2.3: Condensador de Filme Metalizado, Fabrico. Adaptado de [3]

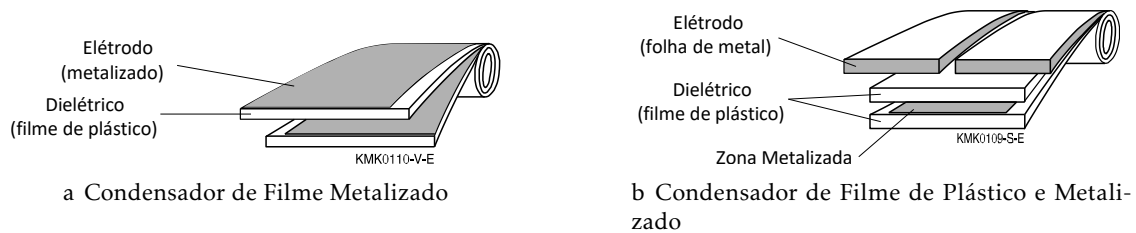


Figura 2.4: Condensador de Filme. Adaptado de [4]

Existem várias combinações possíveis de condensadores de filme, sendo eles de filme metalizado ou combinação de plástico metalizado e plástico com metal, como se pode observar na figura 2.5.

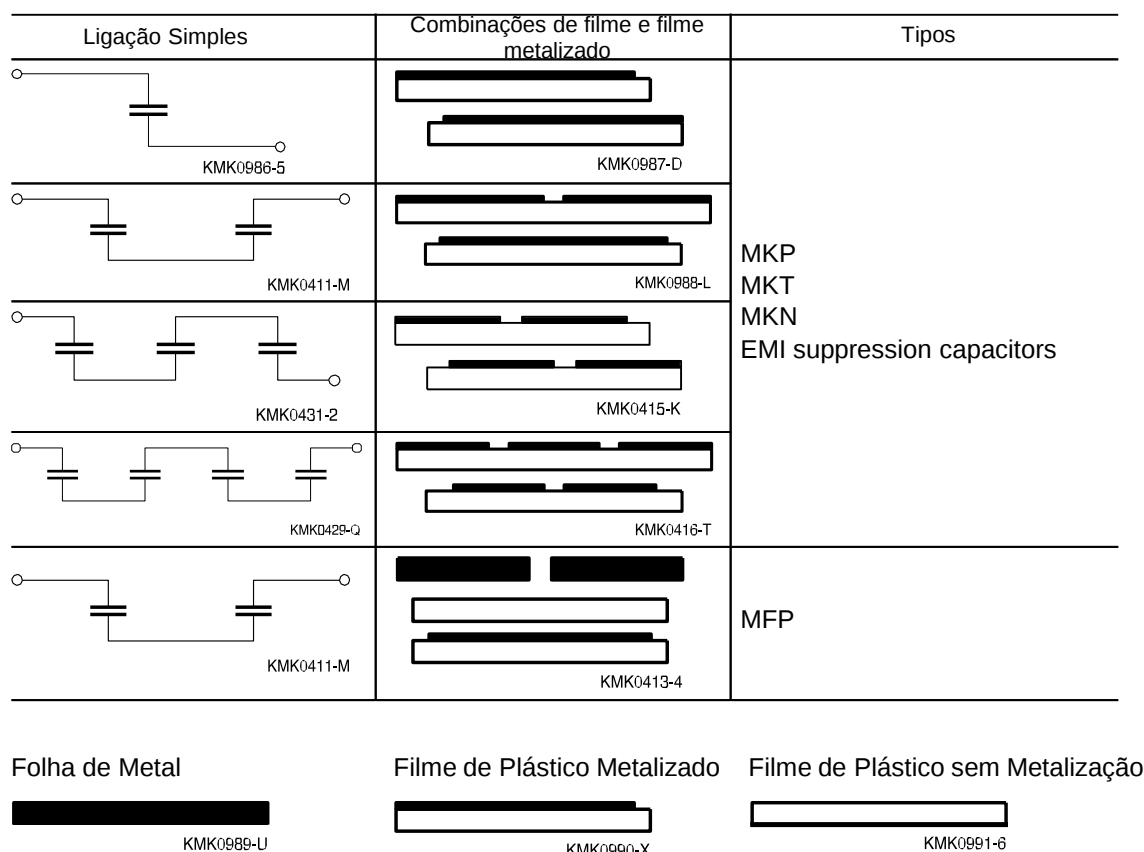


Figura 2.5: Combinação de Condensadores. Adaptado de [4]

Os condensadores de filme têm ainda uma grande vantagem, estes têm a capacidade de autorreparação (utilizado na literatura inglesa como *Self-healing*), tal como se pode observar na figura 2.6. A camada de metal é muito fina, no caso de falha uma pequena área à volta chega a temperaturas de 6000 K, transformando o dielétrico em plasma e evaporando a fina camada de metal. A rápida expansão do plasma faz com que passado alguns microssegundos arrefeça, extinguindo assim a descarga antes que ocorra perda de tensão, o que faz com que apesar de reduzir um pouco a capacidade do condensador este continue operacional.

No caso dos condensadores de plástico, ao haver falha o mesmo pode não ficar operacional. Não devem ser utilizados em circuitos com elevada impedância e baixa tensão.

Para os diferentes materiais o efeito de autorreparação é melhor ou pior, sendo que o condensador com melhor autorreparação é o polipropileno, seguido do tereftalato de polietileno e por último o naftalato de polietileno.

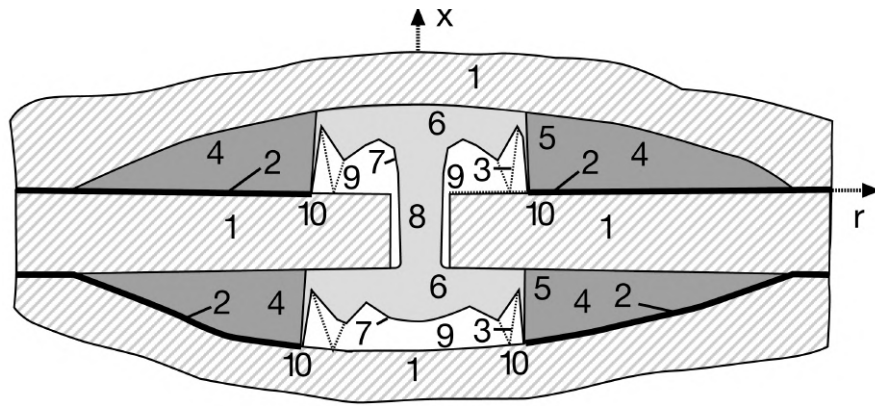


Figura 2.6: Efeito de Autorreparação [4]

Na figura 2.6 pode-se ver o processo de autorreparação detalhado durante uma falha:

1. Dielétrico;
2. Eléttrodo metalizado;
3. Material que desloca a onda de choque;
4. Bolha de Ar;
5. Zona de Plasma;
6. Zona de Plasma;
7. Fronteira entre o dielétrico em estado de gás e o plasma;
8. Falha;
9. Dielétrico em fase de gás;
10. Zona metalizada e do dielétrico deslocada.

Uma desvantagem dos condensadores de filme é o seu comportamento indutivo. Este fenómeno acontece devido ao campo magnético criado pela corrente a passar pelo filme metalizado e pelas conexões. É determinado pelo enrolamento da estrutura, pela sua geometria e pelo comprimento e espessura dos terminais de ligação. Uma regra geral da impedância é que esta deve ser inferior a 1 nH por cada mm de comprimento de condensador. Pode ser calculada também através da frequência de ressonância [4]:

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi \times \sqrt{C \times L_S}} \quad (2.4)$$

O ar que pode ficar entre, ou à volta, das camadas de filme, mais especificamente nos extremos do condensador, tem mais probabilidade de se ionizar gerando o chamado efeito de coroa abordado no capítulo 3.

Este efeito ocorre quando a intensidade do campo elétrico excede a rigidez dielétrica do ar, o que leva a duas consequências:

- A película metalizada é removida do topo do condensador reduzindo drasticamente a capacidade do condensador;
- Pode haver um bombardeamento da estrutura por iões e eletrões, o que leva a uma quebra da tensão e conseqüentemente pode levar a um curto-circuito.

A tensão a que este fenómeno ocorre depende da construção interna do condensador e da espessura do dielétrico. Esta tensão pode ser aumentada utilizando condensadores em série. A probabilidade de acontecer efeito de coroa pode ainda ser diminuída utilizando condensadores impregnados, apesar de diminuir o isolamento do condensador, ou utilizando em vez de líquido gás com uma certa pressão [5].

Para baixas frequências a tensão V_{RMS} não deve exceder a tensão constante V_{CD} , tensão a que começa o efeito coroa.

$$V_{RMS} \leq V_{CD} \quad (2.5)$$

Em que:

V_{RMS} - Tensão do raiz do valor quadrático médio (Root-mean-square voltage);

V_{CD} - Tensão entre o ânodo e o cátodo.

Como dito anteriormente neste capítulo, existem vários tipos de plástico utilizado tanto nos condensadores de plástico como nos de filme metalizado. Devido à sua diferente composição estes têm diferentes características, como se pode observar na tabela 2.1. Mais à frente é feita uma comparação de dois tipos de condensadores de filme com o de cerâmica, tal como se pode observar na tabela 2.2.

Tabela 2.1: Características dos Metais. Adaptado de [2]

Tipo de Plástico	Código	$\Delta C(\%)$ -25°C a 85°C	Envelhecimento (%/Ano)	Máxima Temperatura (°C)
Polipropileno	PP(MKP,MFP)	3	0,2	105
Tereftalato de polietileno	PET(MKT)	5	0,4	140
Naftalato de polietileno	PEN(MKN)	5	0,4	155
Sulfureto de polifenileno	PPS	0,5	0,3	260

Os condensadores de PP apesar de terem uma melhor tolerância à temperatura e não perderem tanta capacidade com o tempo, não resistem a temperaturas tão elevadas, por outro lado, os PET não têm tão boa tolerância à temperatura e a sua capacidade varia um pouco mais com o tempo, mas resistem a temperaturas mais elevadas. Os PEN são muito semelhantes aos PET, mas aguentam ainda temperaturas mais elevadas, tal como se observa na figura 2.7.

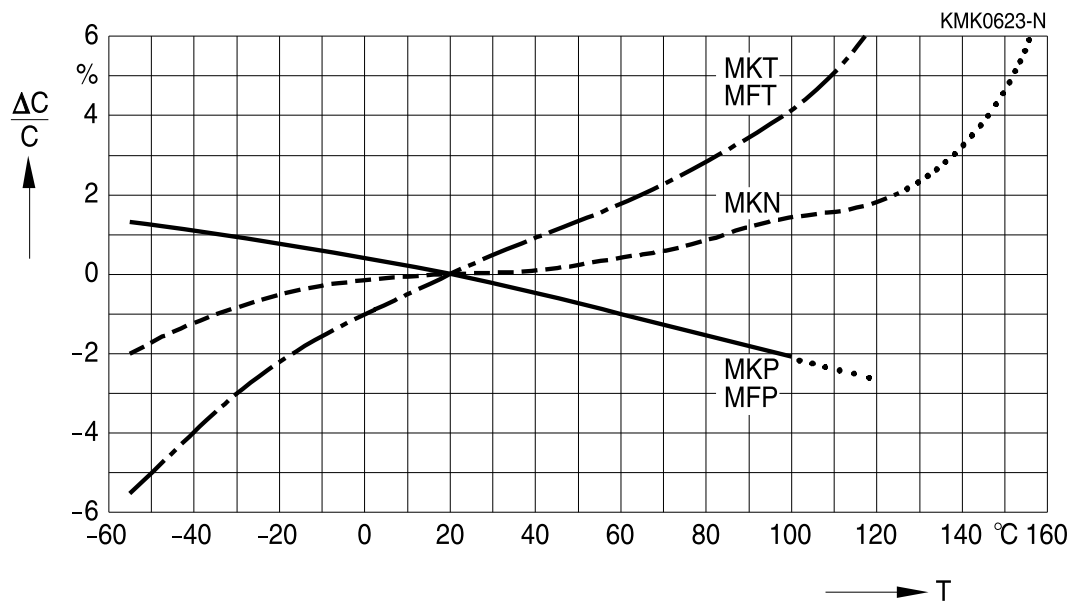


Figura 2.7: Variação da Capacidade em função da Temperatura [4]

Em relação à frequência os condensadores PP não têm grande variação da sua capacidade com a frequência, os PET têm uma diminuição da sua capacidade para frequências mais elevadas enquanto que os PEN tem um decréscimo da sua capacidade até sensivelmente 0,2 MHz, a partir desta frequência o valor da sua capacidade aumenta abruptamente, tal como se pode observar na figura 2.8.

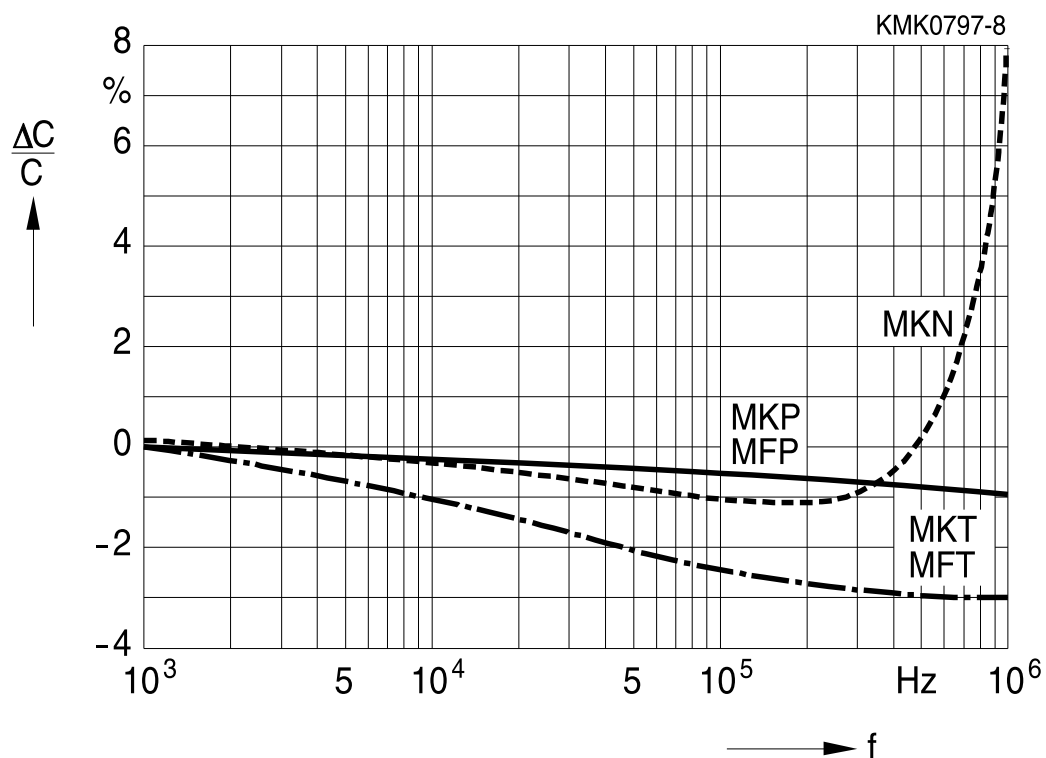


Figura 2.8: Variação da Capacidade em função da Frequência [4]

Tabela 2.2: Comparação entre Condensadores. Adaptado de [2]

	Cerâmica	PP Filme	PET Filme
Capacidade máxima (μF)	0,022	40	2,2
Constante dielétrica relativa	Alta	2,2	3,3
Fator de dissipação (% , 1kHz)	3	0,05	0,5
Dependência da temperatura e tensão	Alta	Baixa	Baixa

Este tipo de condensadores é dividido em duas subclasses, X e Y. Apesar de servirem o mesmo pressuposto diferenciam-se quanto ao seu nível de segurança.

Os condensadores do tipo X são montados com um pino na fase e o outro ao neutro. No caso de haver curto-circuito existe a possibilidade do condensador pegar fogo.

Por outro lado, nos condensadores do tipo Y um dos pinos é ligado à fase e o outro é ligado à terra. Em caso de curto-circuito, neste caso, existe o perigo de choque para o utilizador [2], como se pode observar na figura 2.9.

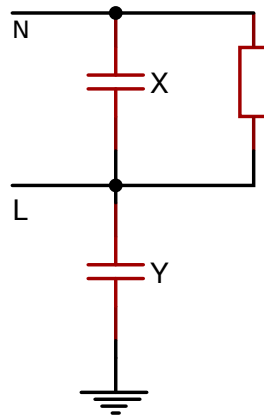


Figura 2.9: Condensadores X e Y. Adaptado de [6]

Dentro de cada uma destas subclasses dividem-se ainda consoante a tensão máxima de pico no caso dos condensadores do tipo X, como se pode observar na tabela 2.3 e consoante a tensão nominal no caso dos condensadores do tipo Y, tal como se pode observar através da tabela 2.4.

Tabela 2.3: Subclasses de Condensadores do tipo X. Adaptado de [7]

Subclasse	Tensão de Pico em Serviço (kV)	Tensão de Pico antes do teste de resistência (kV)		Aplicação
		$C \leq 1\mu\text{F}$	$C \geq 1\mu\text{F}$	
X1	$> 2,5; \leq 4,0$	4	$\frac{4}{\sqrt{C}}$	Pulsos elevados
X2	$\leq 2,5$	2.5	$\frac{2,5}{\sqrt{C}}$	Utilização Geral
X3	$\leq 1,2$	Nenhuma		Utilização Geral

Tabela 2.4: Subclasses de Condensadores do tipo Y. Adaptado de [7]

Subclasse	Tensão Nominal (U_{AC})	Tensão de Pico antes do teste de resistência (kV)	Aplicação
Y1	≤ 500	8	Isolação Dupla ou reforçada
Y2	$\geq 150; \leq 300$	5	Isolação Básica ou Suplementar
Y3	$\geq 150; \leq 250$	Nenhuma	Isolação Básica ou Suplementar
Y4	< 150	2,5	Isolação Básica ou Suplementar

DESCARGAS PARCIAIS

Uma descarga parcial é uma descarga que apenas envolve uma parte do dielétrico e não chega ao eletrodo oposto [8]. Podem acontecer numa cavidade, num material sólido liso ou num sólido pontiagudo. Um objeto sujeito a uma descarga parcial tem um envelhecimento acelerado.

Num isolante as DP são o primeiro sintoma de que algo não está a funcionar de acordo com o ideal, a sua antecipada identificação permite prever possíveis falhas que possam vir a acontecer no futuro.

3.1 Classificação das Descargas Parciais

Dependendo da sua localização as DP's pode ser classificada em três níveis:

- Interna;
- Superficial;
- Efeito de Coroa.

3.1.1 Descarga Parcial Interna

Uma DP interna ocorre numa inclusão ou numa cavidade. No fabrico, por exemplo, das peças com várias camadas de dielétrico podem ficar pequenas cavidades, bolhas de ar, entre os dielétricos fazendo com que haja probabilidade de ocorrer uma DP, como se pode observar na figura 3.1a. No caso de blocos únicos pode haver algum defeito no fabrico da peça que faça com que existam cavidades no meio do mesmo, não ficando este um bloco sólido.

3.1.2 Descarga Parcial Superficial

As DP's superficiais ocorrem à superfície do dielétrico. Podem ocorrer em meios líquidos ou gasosos, sendo que a probabilidade de acontecer em meios gasosos é maior devido à sua permissividade [9]. Na utilização de líquidos a envolver o dielétrico podem ser formadas pequenas bolhas de ar, tornando o líquido mais predisposto ao acontecimento de uma DP, tal como se observa na figura 3.1b.

3.1.3 Descarga Parcial Efeito de Coroa

As DP's efeito de coroa acontecem à volta de um dielétrico pontiagudo. Quando a intensidade do campo elétrico é elevado, ultrapassando o campo de disrupção do gás, existe ionização, formando uma pequena coroa à volta da parte pontiaguda, daí o seu nome, como se pode observar na figura 3.1c. Estas DP's podem não só ser vistas, como também podem ser ouvidas.

Em DC a polaridade irá afetar a facilidade do efeito de coroa ocorrer. No caso da ponta ser positiva, a descarga vai ser mais fácil de ocorrer devido à influencia da carga espacial.

Cada avalanche origina uma nuvem de carga positiva entre a ponta e o plano. Se a ponta for positiva, esta carga intensifica o campo entre a carga espacial e o eletrodo (plano), o que facilita a descarga. No caso da ponta ser negativa, a carga espacial positiva irá "enfraquecer" o campo, dificultando assim a descarga.

A diferença entre AC e DC é que em AC existe uma mudança periódica da direção no campo aplicado e a sua influência na carga residual do campo muda com uma periodicidade de meio ciclo. É como se em meio ciclo se tivesse uma ponta positiva e na outra metade uma ponta negativa, não sendo relevante a sua influência na carga espacial.

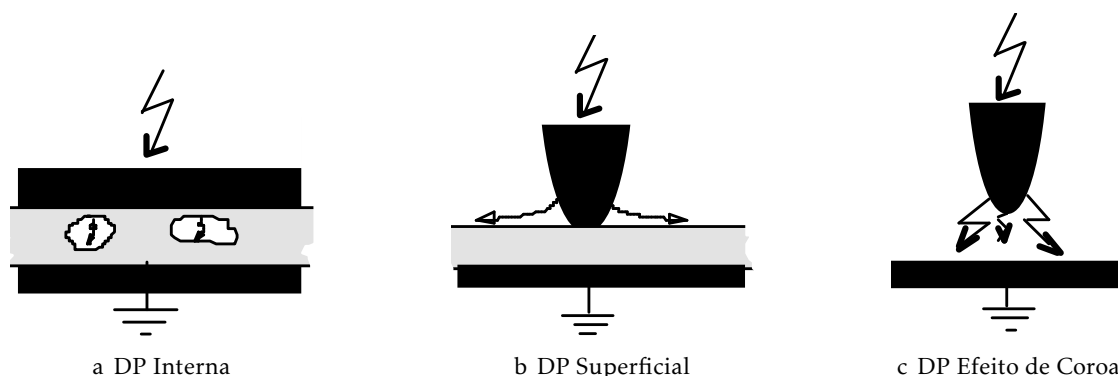


Figura 3.1: Classificação de DP [10]

3.2 Teoria das Descargas Parciais

Caso se trate de dois eletrodos planos inicialmente o campo é uniforme em todos os pontos do objeto, inclusive nas suas cavidades ou inclusões, por outro lado, se se tratar

de outra configuração de eletrodos que não dois planos o campo será não uniforme logo ao início. Para a ocorrência de uma DP são necessárias duas condições, o campo elétrico na cavidade (E_1) tem que ser igual ou superior ao campo mínimo de rutura do gás (E_d), e tem que existir um campo de extinção, campo abaixo do qual a DP se extingue (E_{ext}).

Quando (E_1) se torna superior a (E_d), devido ao aumento da tensão, existe um eletrão arrancado do cátodo com velocidade suficiente para gerar ionização das moléculas [11], dando início à avalanche de Townsend, tal como se observa na figura 3.2. Os eletrões viajam com uma velocidade superior aos iões positivos, pois, a massa dos iões positivos é maior.

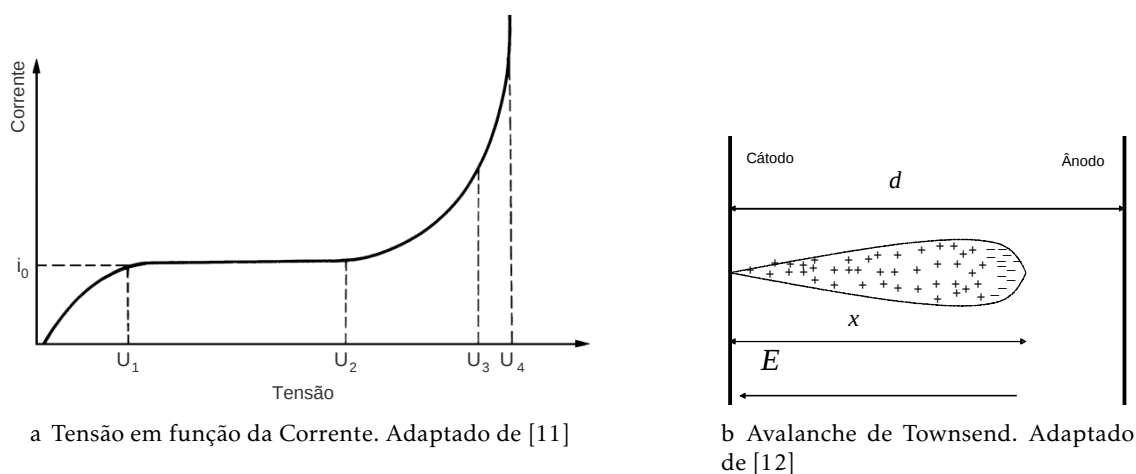


Figura 3.2: Avalanche de Townsend

Inicialmente a corrente aumenta de forma aproximadamente linear, tal como se pode observar na figura 3.2a. ≈ 0 V até U_1 . Isto deve-se ao aumento da tensão na cavidade, o que faz com que cada vez mais eletrões cheguem do cátodo ao ânodo.

Seguidamente, a corrente fica constante entre U_1 até U_2 . Tal acontece, pois, todos os eletrões saídos do cátodo chegam ao ânodo. Ainda não são produzidos eletrões devido à ionização. Existe então uma saturação da corrente, [13], como se pode observar na figura 3.2a.

Após U_2 , existe uma subida exponencial da mesma. Isto deve-se a que, a partir desta tensão, o campo eléctrico é suficientemente intenso para conferir uma energia cinética aos eletrões tal que ao chocarem com as moléculas do gás, serem capazes de as ionizar, arrancando-lhes um outro eletrão [11]. O eletrão torna-se então capaz de ionizar por colisões as moléculas de gás, resultando dois eletrões e um ião positivo. Através das colisões ionizantes aumentam significativamente o numero de partículas que transitam no intervalo (primeira avalanche de Townsend, figura 3.2a).

Os iões positivos resultantes da primeira avalanche de Townsend embatem nas paredes do cátodo com energia cinética suficiente para arrancar eletrões que lá se encontram, estes por sua vez vão bater na parede do ânodo, tal como se pode observar na figura 3.2a. U_3 a U_4 .

Até chegar a U_4 , como se pode observar na figura 3.2a, a corrente no ânodo aumenta subitamente, apenas sendo limitada pela resistência externa. Após U_4 diz-se que existe uma descarga autônoma, ou seja, a corrente não se irá alterar mesmo que já não exista luz UV incidente. Townsend afirma que existe um segundo mecanismo que está a afetar a corrente [13].

Ao campo de disrupção (E_D) está associada uma tensão de disrupção (U_D). Esta tensão depende das propriedades do gás, da distância entre elétrodos e da pressão do gás. No caso do ar para um campo uniforme tem-se a equação 3.1.

$$U_D = 6,72\sqrt{pd} + 24,36(pd) \quad (3.1)$$

Em que:

U_D - Tensão de disrupção, medida em volt (U);

p - Pressão do gás;

d - Distância entre elétrodos.

As constantes numéricas na equação 3.1 aplicam-se com a pressão expressa em milímetros de mercúrio (mmHg), e com a distância expressa em centímetros (cm). Assim, o produto pd expressa-se em mmHg.cm (1 mmHg = 133,322 Pa).

Pode-se então aumentar U_D aumentando a pressão do gás, a distância entre elétrodos, ou ambos os fatores.

À relação tensão- pd dá-se o nome de curva de Paschen. A curva mais comum é a do ar, mas cada gás tem a sua própria curva devido à sua diferente composição, tal como se observa na figura 3.3.

3.3 Causas e Consequências

Como já se observou no capítulo 3.1, as DP's podem ter várias origens. Podem ocorrer devido a bolhas de ar que se alocam no dielétrico ou até mesmo devido à má qualidade do isolante. Podem também ocorrer devido ao fator humano, a má impregnação do dielétrico ou condutores mal dobrados [15].

Devido às DP's existem consequências nos isolantes, estas podem ser insignificantes ou muito perigosas, levando mesmo à inutilização do isolante. As DP's podem produzir luz, ruído e ozono. Podem ainda surgir efeitos como:

- Elevar a temperatura do dielétrico;
- Perda de potência e energia nas cavidades do isolante;
- Erosão do dielétrico;
- Criação de ácido oxálico;

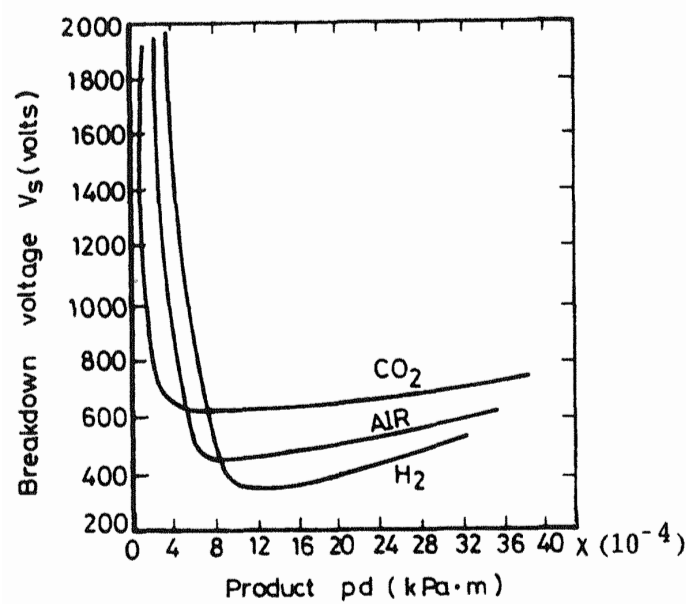


Figura 3.3: Curva de Paschen [14]

- Fissuras nos isolantes, podem levar à falha total.

Todas estas causas levam à diminuição da vida útil dos materiais. Nos líquidos poderá ser necessária a sua substituição antecipada, já nos sólidos estas são mais perigosas devido à sua complicada substituição.

As DP's em AT devem ser cuidadosamente analisadas, são vistas como algo que não está bem com o isolador e indicam que a vida útil do material pode não ser a esperada, assim como que a utilização do equipamento pode não estar a ser a mais correta.

3.4 Detecção e Observação de Descargas Parciais

As descargas parciais devem ser constantemente monitorizadas, não só para observar a vida útil da peça, mas também para haver uma troca antecipada da mesma para um bom funcionamento do equipamento.

Hoje em dia já é possível haver um seguimento online da peça para que a mesma esteja em permanente observação.

As descargas parciais surgem em pulsos com um período muito inferior a 1s e produzem uma grande transferência de carga no local da sua ocorrência. Devido ao impulso ser de um período muito reduzido, as descargas parciais irão ter uma elevada frequência [16].

Para a medição das descargas parciais é usado um esquema equivalente semelhante ao da figura 3.4. As descargas parciais são fenómenos de alta frequência, pelo que no 2º andar do circuito a resistência R e a indutância L se comportam como circuitos abertos. Assim, para as descargas parciais têm-se essencialmente o conjunto de capacidades associadas

à peça de teste em série com a capacidade C . Estando em série, as suas cargas elétricas são iguais, pelo que a tensão V aos terminais de C é uma imagem da carga envolvida nas descargas parciais.

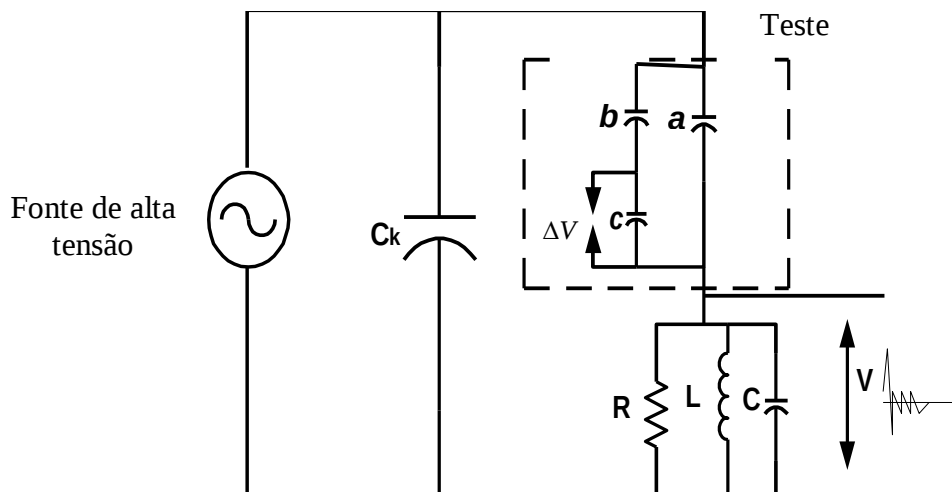


Figura 3.4: Equivalente Elétrico para Medição de Descargas Parciais. Adaptado de [16]

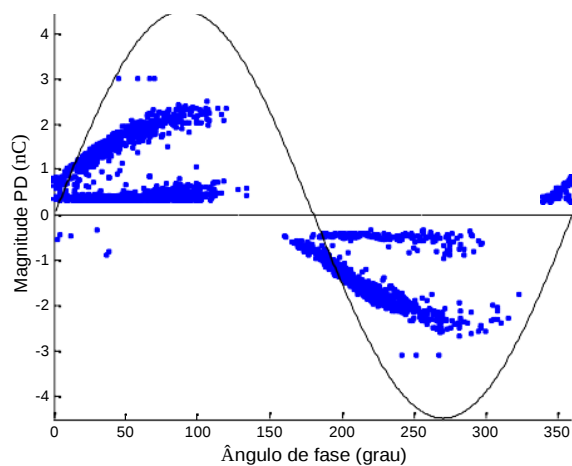
Um dos tipos possíveis de deteção de descargas parciais num circuito equivalente é a deteção com resolução de fase.

A deteção por resolução de fase utiliza a fase e a magnitude da descarga parcial. O eixo das abcissas (fase) corresponde a um ciclo completo da tensão aplicada enquanto que o eixo das ordenadas (magnitude) consiste na magnitude da descarga parcial. Com esta técnica de deteção de descargas parciais é possível ainda descobrir se a descarga é interna, superficial ou com efeito de coroa, tal como se pode observar na figura 3.5.

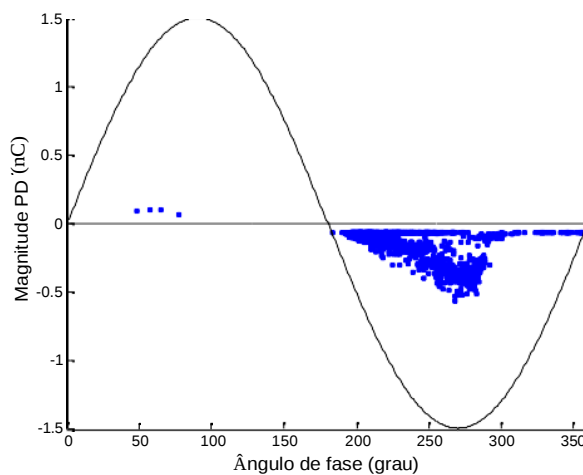
Quando a descarga é interna, o campo elétrico dentro do vazio acompanha a forma sinusoidal da onda, apesar dos eletrões se deslocarem de forma aleatória. Devido ao vazio estar no meio do material, o campo elétrico é simétrico, como se observa na figura 3.5a.

A descarga parcial de superfície uma vez que comece a acontecer apenas se extingue quando o fluxo de eletrões se extingue. À medida que a tensão aumenta, também o número de ionizações aumenta na superfície do material. O número de descargas parciais que ocorrem no ciclo positivo da tensão é inferior ao número de descargas parciais que ocorrem no ciclo negativo, tal deve-se a mais eletrões estarem disponíveis no eletrodo quando a tensão é negativa o que faz com que as avalanches sejam mais fáceis de iniciar. O máximo valor da descarga parcial ocorre por volta dos 270° , como se pode observar na figura 3.5b.

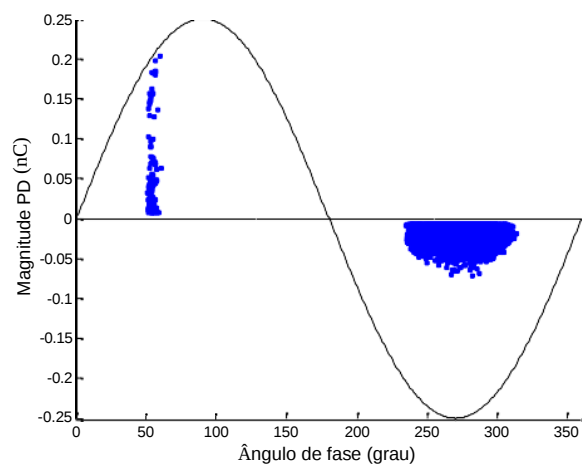
Por fim têm-se as descargas parciais com efeito de coroa. Neste caso as descargas parciais também são mais fáceis de aparecer quando a tensão é positiva, daí o pico na parte positiva da tensão, pois nesta circunstância os eletrões têm mais probabilidade de ionizar o gás circundante e criar avalanches, tal como se pode observar na figura 3.5c, [17].



a DP Interna com Resolução de Fase



b DP de Superfície com Resolução de Fase



c DP Efeito de Coroa com Resolução de Fase

Figura 3.5: Observação de Descargas Parciais com Resolução de Fase. Adaptado de [17]

SIMULAÇÃO EM PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS DE CONDENSADORES UTILIZADOS ANTERIORMENTE

Neste capítulo foi estudado o comportamento dos condensadores já ensaiados fisicamente na fábrica, tal como se pode observar na tabela 4.1. Foi feita uma simulação em 2D do corte dos condensadores, como se pode observar na figura 4.1 e anexo III, pois concluiu-se que a descarga parcial no condensador seria no extremo da metalização e não na curva que o condensador faz devido ao seu achatamento. O raio da curvatura não é relevante considerando a baixa espessura do polipropileno.

Tabela 4.1: Teste de Condensadores

Capacidade (nF)	Tensão AC (V)	Tensão de ignição (V)
470	480	300
560	480	300
680	480	300

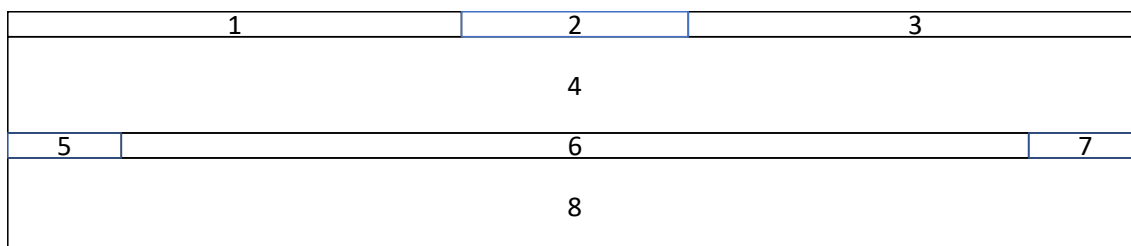


Figura 4.1: Corte do Condensador de Filme

1. Metalização de cima do lado esquerdo (elétrodo);

2. Polipropileno proveniente da camada superior a esta, camada 8 após o enrolamento;
3. Metalização de cima do lado direito (elétrodo);
4. Polipropileno (dielétrico);
5. Polipropileno proveniente da camada 8 após o achatamento;
6. Metalização de baixo;
7. Polipropileno proveniente da camada 8 após o achatamento;
8. Polipropileno que serve de base à metalização inferior;

Foi considerado que após o achatamento, o espaço entre as metalizações de cima iria ficar preenchido por polipropileno da camada que viria a estar sobre esta, número 2 da figura 4.1. Foi igualmente considerado que tanto antes como depois da metalização de baixo o espaço iria ser preenchido pelo polipropileno da camada que iria ficar por baixo da mesma, números 5 e 7 da figura 4.1.

Para efeitos de simulação, a camada 8 da figura 4.1 foi ignorada visto que não tem qualquer efeito dielétrico antes do enrolamento.

Cada condensador foi simulado tanto em ar como em óleo e foram simulados tanto sem anomalias, na sua perfeita condição e fabrico, como com várias anomalias para estas duas condições, como se pode observar na figura 4.2. Por fim foi ainda simulado o efeito da solda na união entre dois condensadores.

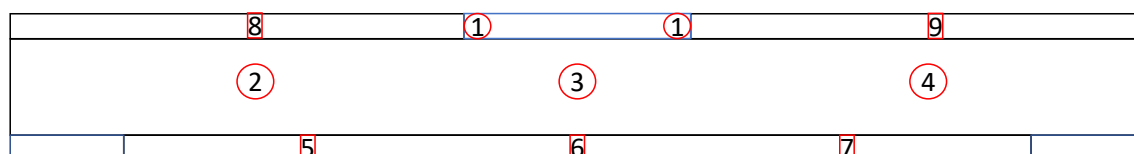


Figura 4.2: Anomalias Simuladas

- Bolhas logo após a metalização, número 1 da figura 4.2;
- Bolhas no dielétrico (direita, meio e esquerda), números 2, 3 e 4 da figura 4.2;
- Falha na metalização de baixo (direita, meio e esquerda), números 5, 6 e 7 da figura 4.2;
- Falha na metalização de cima (potencial mais alto e baixo), números 8 e 9 da figura 4.2.

Nos seguintes capítulos irão ser feitas algumas ampliações a partes do condensador para que se possa perceber melhor o campo elétrico nas anomalias, ou no condensador sem as mesmas. Estas ampliações irão ser feitas tal como é exemplificado na figura 4.3

e serão referenciadas nas legendas das mesmas. No caso da ampliação número 1 apenas se irá observar uma linha devido ao reduzido tamanho do condensador. No caso das ampliações número 4, 5 e 6, não é notada a espessura do filme devido à sua reduzida dimensão.

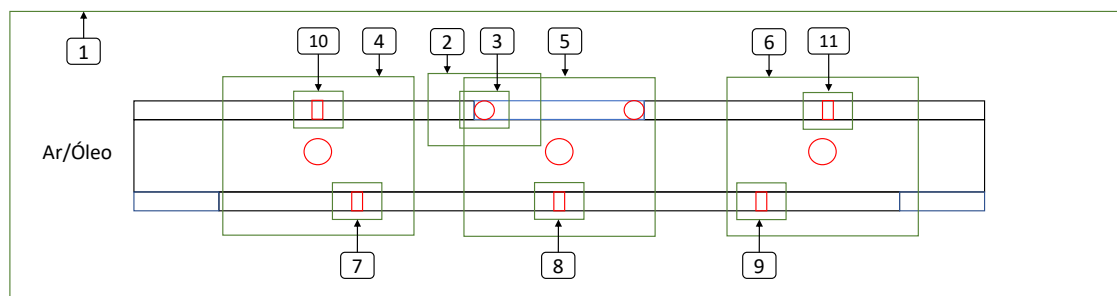


Figura 4.3: Ampliações Feitas ao Condensador

Para estas simulações, tal como já foi referido anteriormente, foi utilizado um programa de elementos finitos. Num programa deste tipo, após ser desenhada a peça é gerada uma malha, tal como pode ser observada na figura 4.4. O objetivo desta malha é em cada geometria os resultados serem os mesmos, como tal, quanto menor o tamanho da malha mais precisos irão ser os resultados.

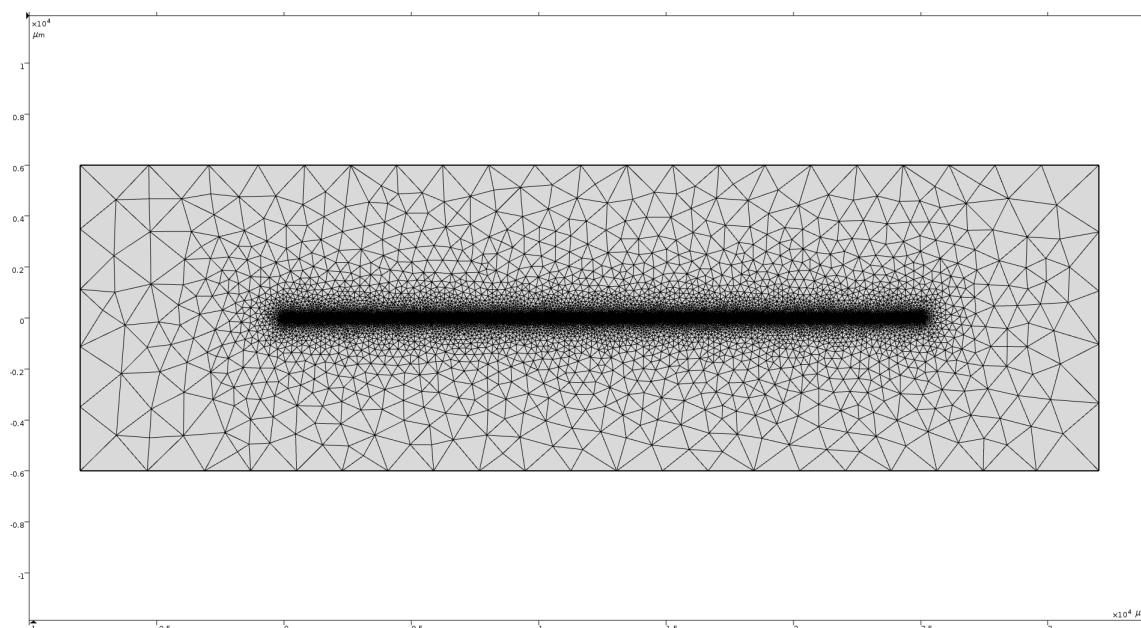


Figura 4.4: Exemplo de uma Malha de Elementos Finitos. Neste caso do Condensador de 470 nF

CAPÍTULO 4. SIMULAÇÃO EM PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS DE CONDENSADORES UTILIZADOS ANTERIORMENTE

Para uma correta simulação foram tidas em conta as medidas dos condensadores, cada condensador tem as suas próprias dimensões e capacidade, apenas tem que respeitar a fórmula 4.1.

$$C = (8,85 \times 10^{-12}) \times \epsilon_r \times \frac{A}{D} \quad (4.1)$$

Em que:

C - Capacidade do condensador (medida em Farad, F);

ϵ_r - Constante dielétrica relativa;

A - Área útil do eletrodo (medida em metros quadrados, m²);

D - Espessura do dielétrico (medida em metros, m).

Dependendo da espessura do polipropileno o condensador suporta maior ou menor tensão, como poderá ser observado no capítulo 4.4.

Cada material tem uma constante dielétrica diferente da dos outros, tal como tem a sua própria rigidez dielétrica (campo de disrupção), como se pode observar na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Constante Dielétrica e Campo de Disrupção [18], [19]

Material	Constante dielétrica (ϵ_r)	Campo de disrupção (MV/m)
Ar	1	3
Óleo	2,2	7
Polipropileno	2,2	25
Alumínio (Metalização e Conexões)	8,5	Não aplicável
Solda	6,9	Não aplicável
Epoxy	4	10

Para cada condensador o processo foi igual. Abriu-se o condensador, fizeram-se medições e calcularam-se as medidas cuja observação não era possível devido à sua baixa ordem de grandeza, tal como se pode observar na figura 4.5. O único elemento que não se conseguiu saber ao certo foi a espessura da metalização. Numa ida à fábrica da Vishay, concluiu-se que esta espessura vai depender de vários parâmetros, sendo que para todas as simulações foi estipulada uma espessura de 10 nm. Valor que foi dito ser aceitável por um engenheiro da Vishay.

Foi também calculada a tensão a que cada condensador iria estar sujeito. Apesar da peça final poder variar entre 8,5 nF e 10 nF, para efeitos de simulação foi sempre considerada a capacidade de 10 nF. A capacidade de cada condensador unitário irá não só alterar a tensão a que este está sujeito, mas também o número total de condensadores utilizados, tal como se pode observar na tabela 4.3.

Utilizando a figura 4.5 retiraram-se as formulas 4.2, 4.3 e 4.4.

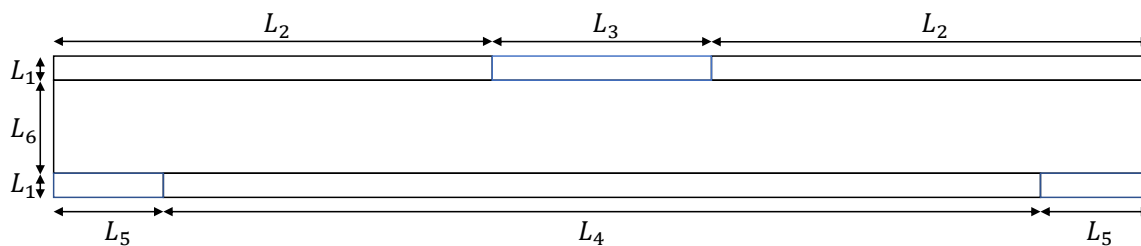


Figura 4.5: Medidas dos Condensadores

Tabela 4.3: Número de Condensadores e Tensão a que está Sujeito

Capacidade (nF)	Número de condensadores	Tensão a que está sujeito (V)
470	47	612,8
560	56	514,29
680	68	423,53

$$l_{\text{util}} = (L_2 - L_5) \times 2 \quad (4.2)$$

$$A_{\text{util}} = l_{\text{util}} \times \text{comprimento} \quad (4.3)$$

$$d = L_6 = \frac{8,85 \times 10^{-12} \times \epsilon_r \times A_{\text{util}}}{\text{capacidade}} \quad (4.4)$$

Após se abrir cada condensador conseguiram-se tirar as medidas correspondentes a cada um, como se pode observar na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Medidas dos Condensadores

Capacidade (nF)	Comprimento (m)	Valores da figura 4.5						l_{util} (mm)	A_{util} (m ²)
		L_1 (nm)	L_2 (mm)	L_3 (mm)	L_4 (mm)	L_5 (mm)	L_6 (μm)		
470	14	10	10	5	25	2,5	8,7	15	0,21
560	17	10	10,5	4	20	2,5	9,5	16	0,272
680	19	10	10,5	4	20	2,5	8,7	16	0,304

Para cada condensador foi analisado o potencial elétrico (V) em todo o condensador e o seu campo elétrico (V/m) em zonas específicas do condensador. Com o potencial conseguiu-se saber como este se distribui em todo o condensador. Com o campo elétrico conseguiu-se perceber os pontos onde existe, ou mais propícios a existir, descargas parciais.

Nas secções seguintes vão ser apresentados os resultados de cada condensador das simulações feitas num programa de elementos finitos.

4.1 Condensador de 470 nF

4.1.1 Falhas em Ar

4.1.1.1 Sem Anomalias

As figuras 4.6 e 4.7 apresentam o potencial elétrico e o campo elétrico respectivamente da simulação do condensador de 470 nF caso não exista nenhuma anomalia no condensador.

Como se pode observar pela figura 4.6, a placa superior de maior potencial, está sujeita a um potencial de 600 V, enquanto que a placa superior de menor potencial está sujeita a uma tensão de 0 V. Pode-se também observar que a placa inferior está sujeita a uma tensão de 300 V, como seria de esperar.

Analisando a figura 4.7, observa-se que o campo elétrico imediatamente após a metalização de maior potencial é de $6,5 \times 10^7$ V/m (65 MV/m), campo superior ao campo de disrupção no polipropileno, tal como se pode observar na tabela 4.2. Sendo que possivelmente existe neste ponto uma descarga parcial.

Todas as falhas posteriores a esta simulação terão também este campo elétrico no mesmo ponto e com igual intensidade.

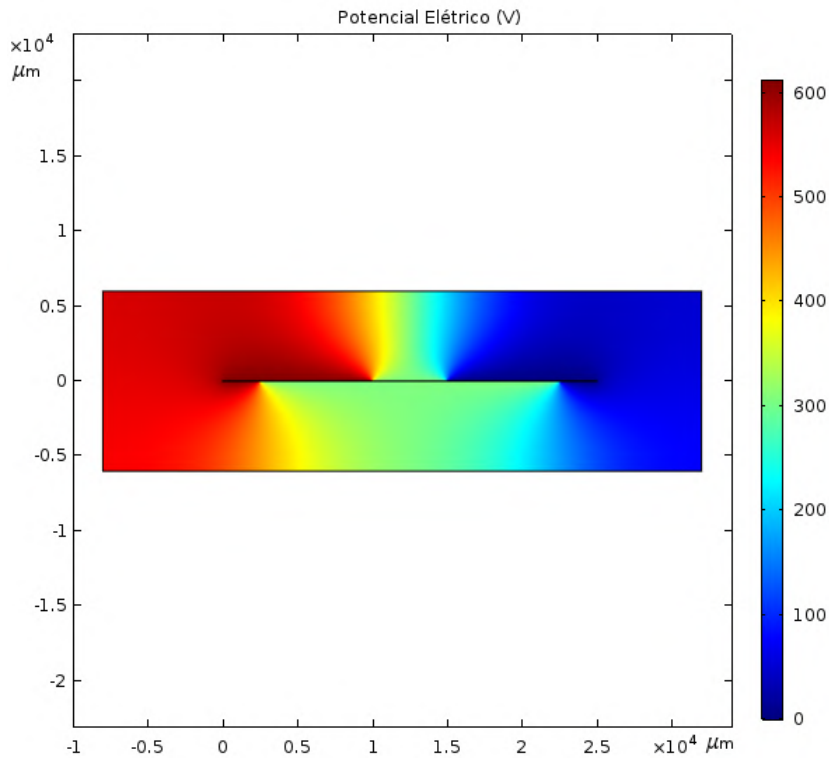


Figura 4.6: Potencial Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Sem Anomalias. Ampliação 1 da Figura 4.3

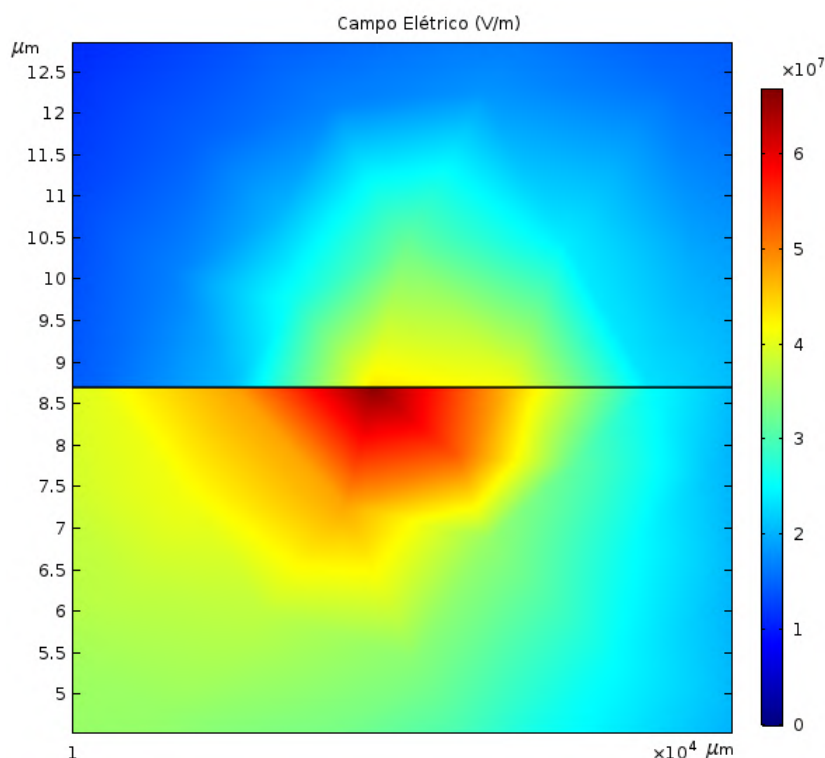


Figura 4.7: Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Sem Anomalias. Ampliação 2 da Figura 4.3

4.1.1.2 Bolhas Após a Metalização

O resultado da simulação do caso em que existem bolhas após a metalização é apresentado na figura 4.8.

Sendo que as bolhas não se situam em nenhum dielétrico, estas não afetam o potencial elétrico no condensador. Posto isto, o potencial elétrico será igual ao da figura 4.6.

Em relação ao campo elétrico, analisando a figura 4.8, concluiu-se que este abaixo da bolha que se encontra junto ao dielétrico de maior tensão é de $1,15 \times 10^{11}$ V/m (115000 MV/m), campo muito superior ao campo de ruptura no polipropileno, como se pode observar na tabela 4.2. Já o campo elétrico dentro da bolha de ar não é muito elevado ($0,3 \times 10^{11}$ V/m), mas mesmo assim é superior ao campo de ruptura no ar, sendo que muito provavelmente nesta zona existe uma descarga parcial.

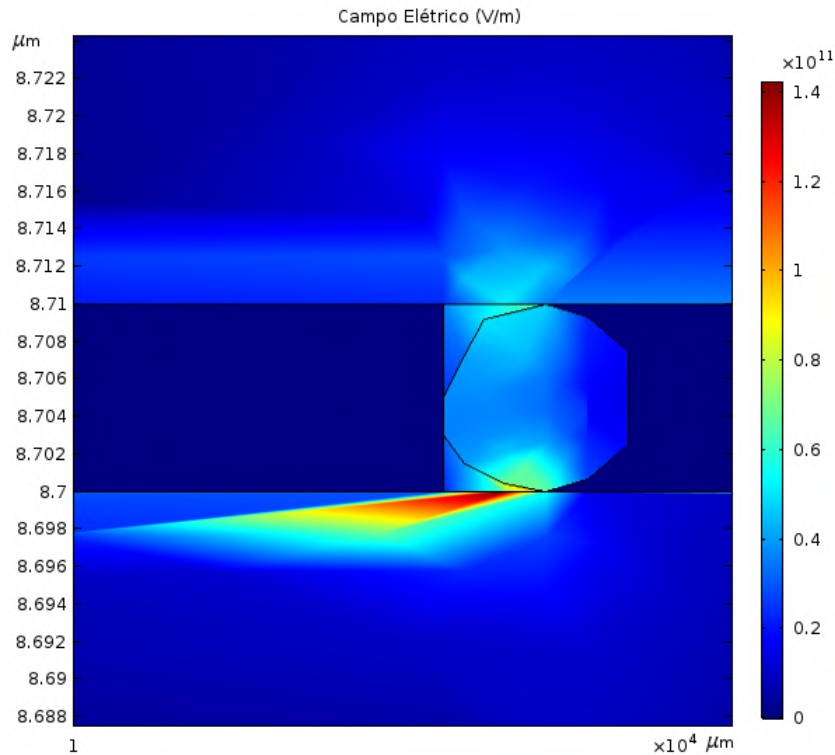


Figura 4.8: Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Bolhas Após a Metalização. Ampliação 3 da Figura 4.3

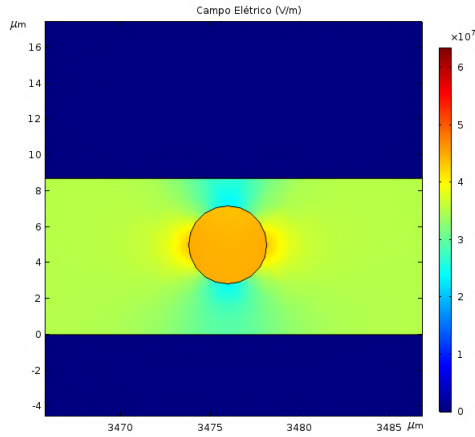
4.1.1.3 Bolhas no Dielétrico

No caso de existirem bolhas no dielétrico em diferentes posições, as simulações são apresentadas na figura 4.9.

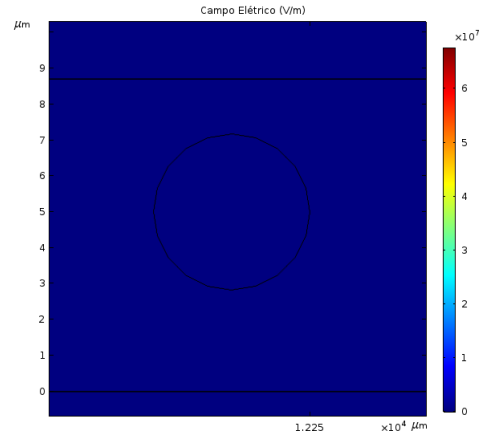
Estas falhas situam-se no elétrodo, por sua vez não irão afetar a distribuição do potencial elétrico no condensador, o que faz que esta seja igual à da figura 4.6.

Como se pode observar pela figura 4.9b, o campo elétrico não se altera caso exista uma bolha de ar no meio do dielétrico. O contrário ocorre se a bolha estiver tanto à esquerda como à direita, como se pode observar na figura 4.9a e 4.9c. Nestes dois casos o campo elétrico altera-se um pouco. Sendo que o campo elétrico sem esta anomalia nestas zonas seria de $3,5 \times 10^7$ V/m, observa-se que dentro da bolha o campo elétrico se altera para $4,5 \times 10^7$ V/m, na lateral esquerda e direita altera-se para $4,2 \times 10^7$ V/m e no topo e na sua base altera-se para $2,4 \times 10^7$ V/m.

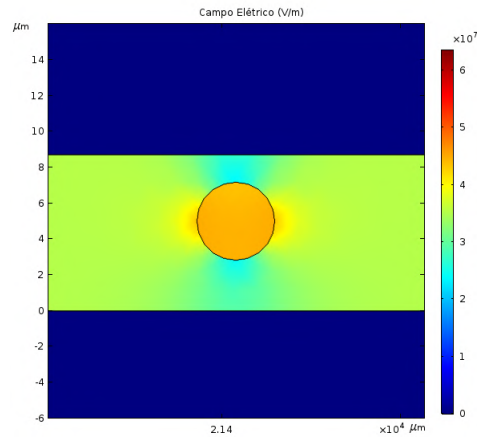
Apesar do campo elétrico no topo e na base das bolhas mais à esquerda e à direita do dielétrico ser inferior ao campo de disrupção no mesmo, nos outros pontos é superior, existindo assim probabilidade de existirem descargas parciais com esta anomalia.



a Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Bolha no Dielétrico à Esquerda



b Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Bolha no Dielétrico no Meio



c Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Bolha no Dielétrico à Direita

Figura 4.9: Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Bolhas no Dielétrico. Ampliações 4, 5 e 6 da Figura 4.3

4.1.1.4 Falha na Metalização de Baixo

O resultado da simulação do caso em que existe uma falha na metalização da placa inferior é apresentado nas figuras 4.10 e 4.11, potencial elétrico e campo elétrico respetivamente.

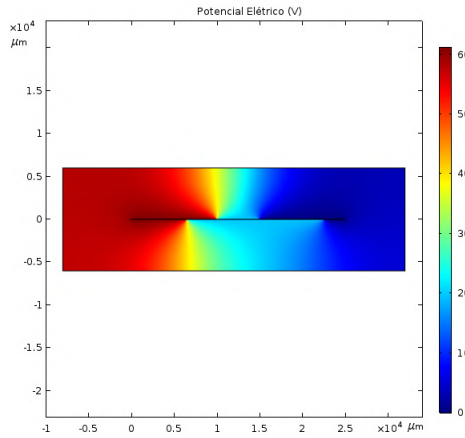
Observando as figuras 4.10a, 4.10c e 4.10b, vê-se que a distribuição do potencial elétrico é bastante afetada por estas falhas. Neste caso as falhas não são muito graves pois acontecem apenas numa zona do condensador e não em todo o seu comprimento.

Em relação ao campo elétrico, observa-se que se a falha for à esquerda ou à direita, no extremo onde a falha ocorre o campo é mais intenso, chegando a valores de $3,9 \times 10^9$ V/m caso a falha seja à esquerda, como se pode observar na figura 4.11a ou de 6×10^9 V/m caso a falha seja à direita, tal como se pode observar na figura 4.11c. No caso da falha ser no centro da metalização, observa-se que o campo elétrico é similar em ambos os extremos da falha, podendo chegar a valores de 6×10^9 V/m em ambos os extremos, como se pode

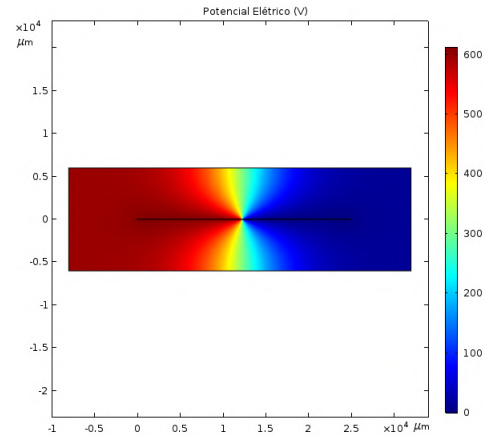
CAPÍTULO 4. SIMULAÇÃO EM PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS DE CONDENSADORES UTILIZADOS ANTERIORMENTE

observar na figura 4.11b.

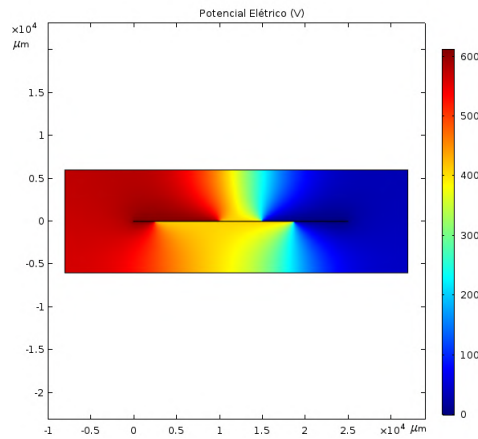
Qualquer destes valores de campo elétrico é bastante superior ao campo de ruptura no polipropileno, tal como se pode observar na tabela 4.2, sendo que a probabilidade de existirem descargas parciais em qualquer uma destas falhas é bastante grande.



a Potencial Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Falha na Metalização de Baixo à Esquerda

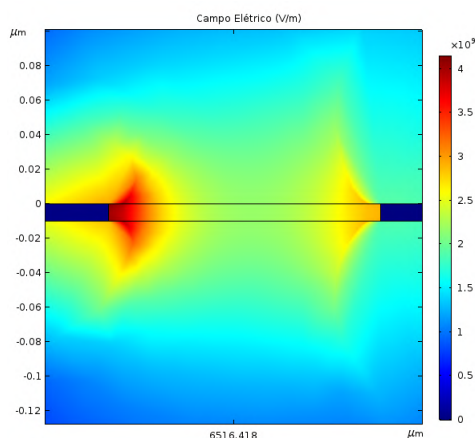


b Potencial Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Falha na Metalização de Baixo no Meio

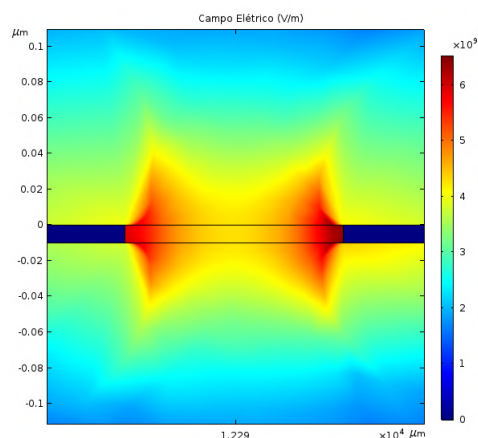


c Potencial Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Falha na Metalização de Baixo à Direita

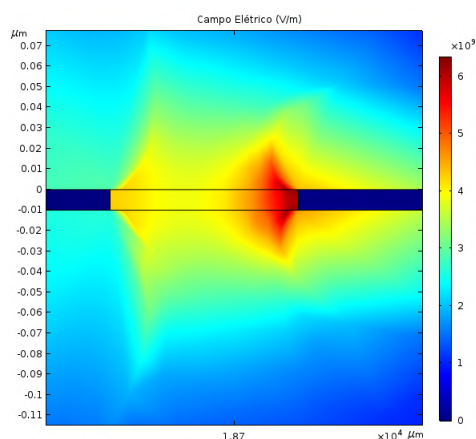
Figura 4.10: Potencial Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Falha na Metalização de Baixo. Ampliação 1 da Figura 4.3



a Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Falha na Metalização de Baixo à Esquerda



b Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Falha na Metalização de Baixo no Meio



c Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Falha na Metalização de Baixo à Direita

Figura 4.11: Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Falha na Metalização de Baixo. Ampliações 7, 8 e 9 da Figura 4.3

4.1.1.5 Falha na Metalização de Cima

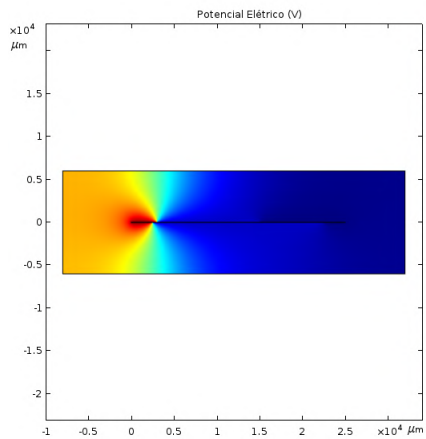
O resultado da simulação do caso em que existe uma falha na metalização de uma das placas superiores é apresentado nas figuras 4.12 e 4.13, potencial elétrico e campo elétrico respectivamente.

A falha no dielétrico de potencial mais elevado afeta mais a distribuição do potencial elétrico, sendo que esta será mais problemática do que a falha no dielétrico de potencial mais baixo.

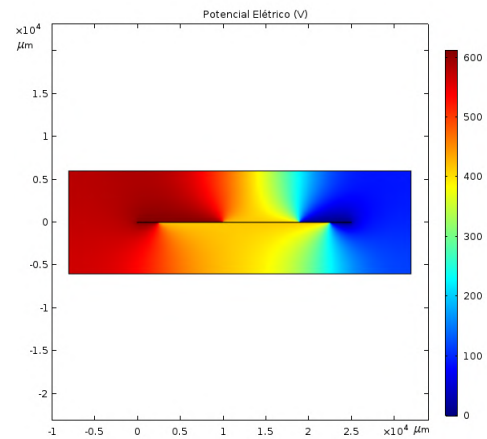
Analisando o campo elétrico das figuras 4.13a e 4.13b, vê-se que no caso da falha ser no eletrodo de potencial mais elevado o campo elétrico é mais intenso no lado esquerdo da falha, chegando aos $6,7 \times 10^9$ V/m. No caso da falha ser no eletrodo de menor potencial o campo elétrico é mais uniforme em toda a falha, acabando por ser também mais intenso no extremo esquerdo da falha, chegando aos $4,8 \times 10^9$ V/m.

CAPÍTULO 4. SIMULAÇÃO EM PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS DE CONDENSADORES UTILIZADOS ANTERIORMENTE

Tendo em conta o campo de disrupção no polipropileno, observa-se que qualquer valor do campo elétrico nos extremos destas falhas é bastante superior sendo que existem descargas parciais caso estas falhas existam.

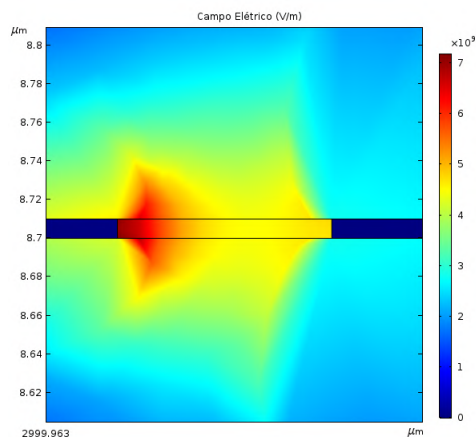


a Potencial Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Falha no Eléttrodo de Maior Potencial

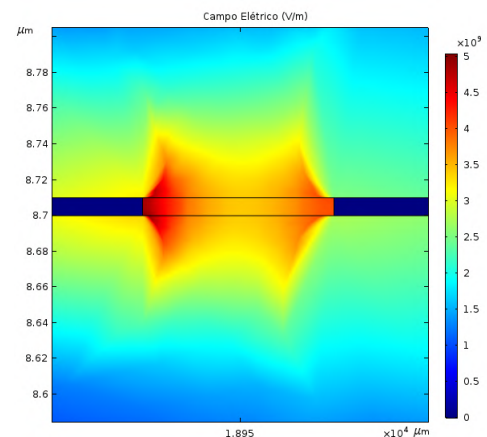


b Potencial Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Falha no Eléttrodo de Menor Potencial

Figura 4.12: Potencial Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Falhas nos Eléttrodos. Ampliação 1 da Figura 4.3



a Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Falha no Eléttrodo de Maior Potencial



b Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Falha no Eléttrodo de Menor Potencial

Figura 4.13: Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Ar, Falhas nos Eléttrodos. Ampliações 10 e 11 da Figura 4.3

4.1.2 Falhas em Óleo

A distribuição do potencial elétrico em óleo é igual à distribuição do potencial elétrico no ar, correspondente à mesma simulação. Sendo que nas secções (4.1.2.1, 4.1.2.2, 4.1.2.3, 4.1.2.4 e 4.1.2.5) apenas irão ser colocadas as figuras referentes ao campo elétrico.

4.1.2.1 Sem Anomalias

A figura 4.14 apresenta o campo elétrico da simulação do condensador de 470 nF caso não exista nenhuma anomalia no condensador.

Apesar de não existir a presença de óleo entre o dielétrico e o eletrodo, observa-se que o campo elétrico nesta zona é de 6×10^7 V/m, como se pode observar na figura 4.14. Campo que tem um valor um pouco inferior à da simulação a ar, capítulo 4.1.1.1. Independentemente do valor baixar um pouco continua a ser superior ao campo de disrupção no polipropileno.

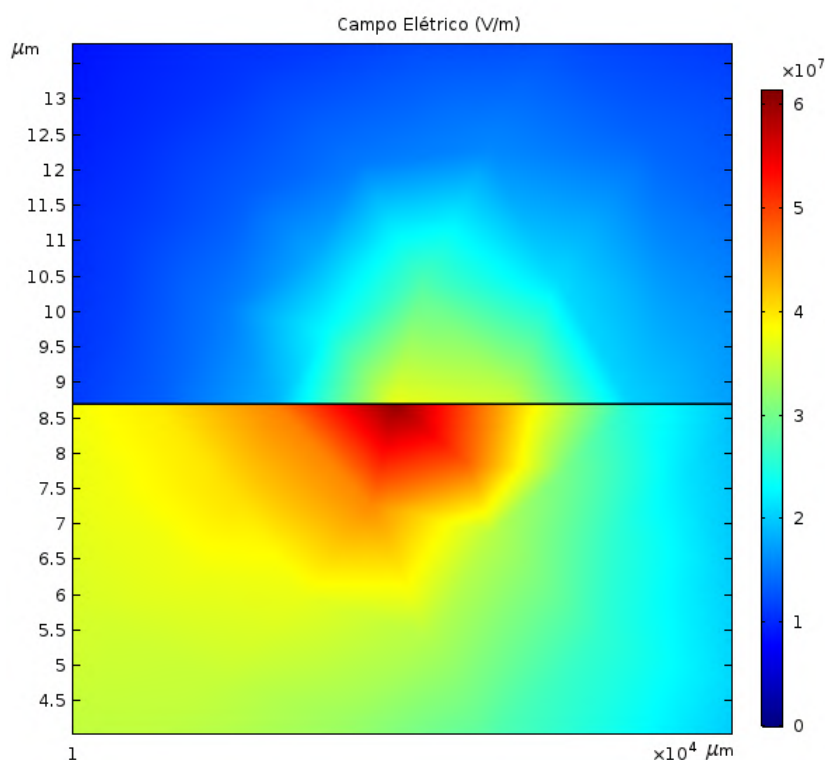


Figura 4.14: Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Óleo, Sem Anomalias. Ampliação 2 da Figura 4.3

4.1.2.2 Bolhas Após a Metalização

O resultado da simulação do caso em que existem bolhas após a metalização é apresentado na figura 4.15.

Analisando a figura 4.15, concluiu-se que o campo elétrico por baixo da bolha que se encontra junto ao dielétrico de maior tensão é de 2.3×10^9 V/m, campo muito superior ao campo de disrupção no polipropileno, como se pode observar na tabela 4.2. O campo elétrico dentro da bolha de óleo é quase nulo, sendo que muito provavelmente nesta zona existe uma descarga parcial.

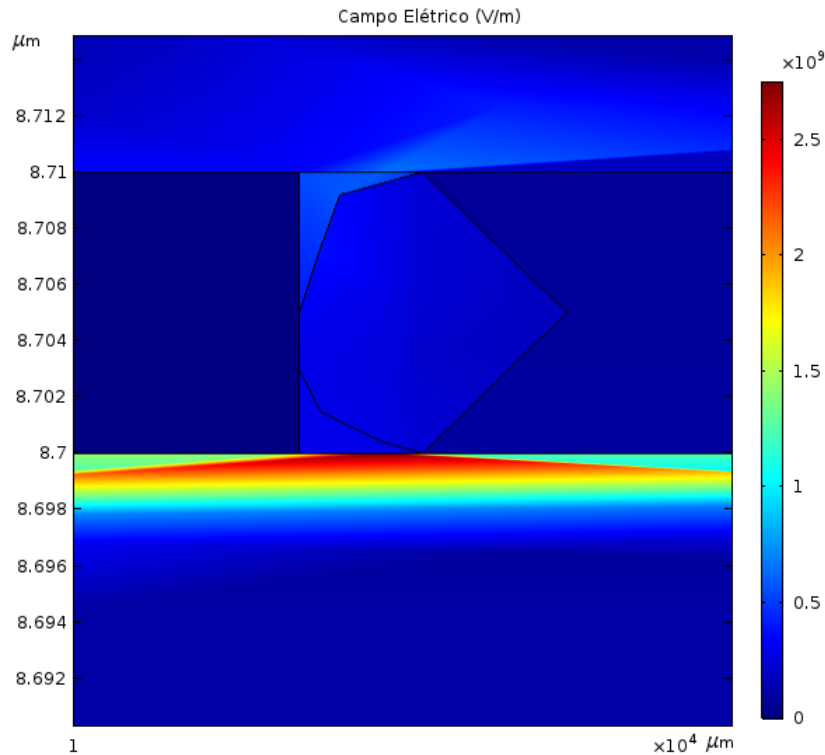


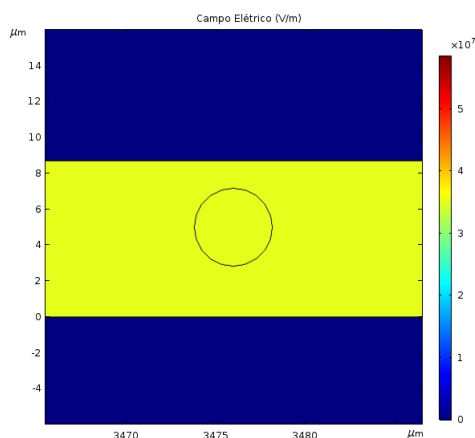
Figura 4.15: Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Óleo, Bolhas Após a Metalização. Ampliação 3 da Figura 4.3

4.1.2.3 Bolhas no Dielétrico

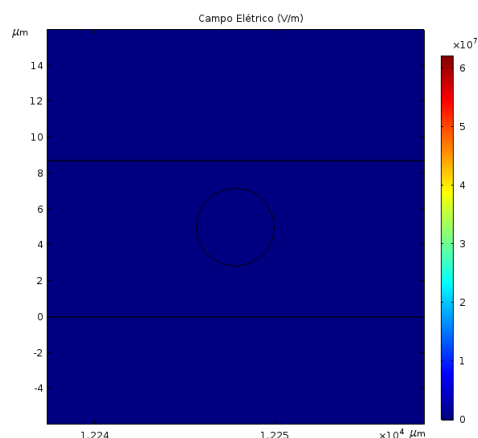
No caso de haver bolhas no dielétrico em diferentes posições, as simulações são apresentadas na figura 4.16.

Como se pode observar, o campo elétrico não se altera independentemente de onde esteja a bolha de óleo, como se pode observar nas figuras 4.16a, 4.16b e 4.16c. Apesar disto, observa-se que o campo elétrico no dielétrico à esquerda e à direita já é de $3,7 \times 10^7$ V/m, o que significa que possivelmente existe uma descarga parcial.

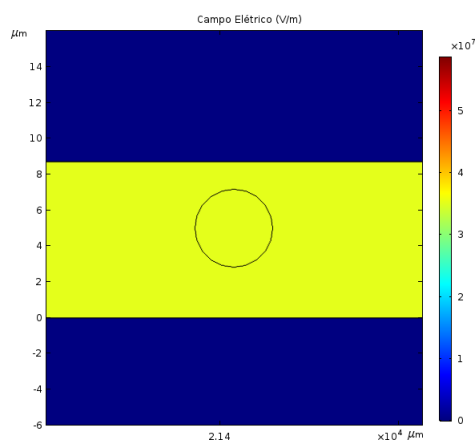
O facto de não existir diferença no campo elétrico deve-se à constante dielétrica ser igual no polipropileno e no ar.



a Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Óleo, Bolha no Dielétrico à Esquerda



b Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Óleo, Bolha no Dielétrico no Meio



c Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Óleo, Bolha no Dielétrico à Direita

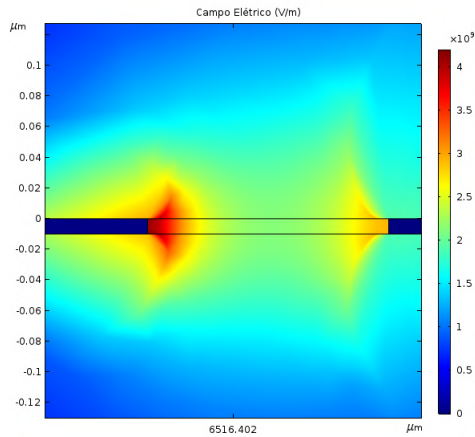
Figura 4.16: Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Óleo, Bolhas no Dielétrico. Ampliações 4, 5 e 6 da Figura 4.3

4.1.2.4 Falha na Metalização de Baixo

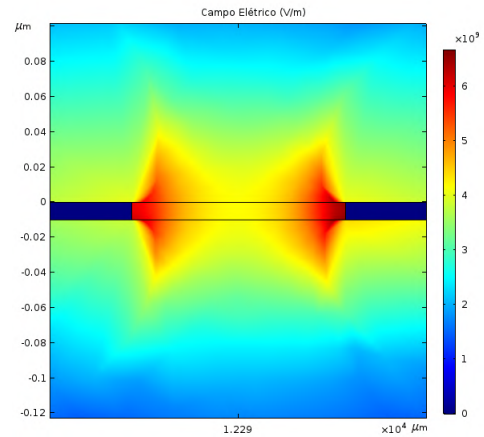
O resultado da simulação do campo elétrico no caso em que existe uma falha na metalização da placa inferior é apresentado na figura 4.17.

Caso aconteça uma destas três falhas, o campo elétrico é bastante elevado mas, um pouco mais baixo do que no ar. No caso da falha ser mais à esquerda da metalização, o campo potencial chega a valores de $3,8 \times 10^9 \text{ V/m}$, tal como se pode observar na figura 4.17a. Se a falha acontecer mais à direita da metalização, ou no meio, o campo elétrico chega a valores de $5,9 \times 10^9 \text{ V/m}$, como se pode observar nas figuras 4.17b e 4.17c.

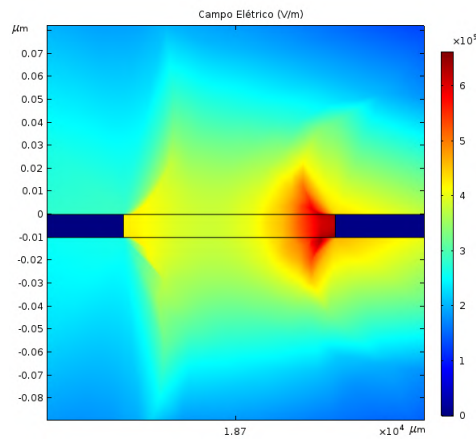
CAPÍTULO 4. SIMULAÇÃO EM PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS DE CONDENSADORES UTILIZADOS ANTERIORMENTE



a Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Óleo, Falha na Metalização de Baixo à Esquerda



b Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Óleo, Falha na Metalização de Baixo no Meio



c Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Óleo, Falha na Metalização de Baixo à Direita

Figura 4.17: Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Óleo, Falhas na Metalização de Baixo. Ampliações 7, 8 e 9 da Figura 4.3

4.1.2.5 Falha na Metalização de Cima

O resultado da simulação do campo elétrico no caso em que existe uma falha na metalização de uma das placas superiores é apresentado na figura 4.18.

O campo elétrico nestas condições será um pouco inferior ao campo elétrico nas mesmas condições em ar, capítulo 4.1.1.5. Na possibilidade da falha acontecer no eletrodo de maior potencial, o valor do campo altera-se para $6,4 \times 10^9$ V/m, como se pode observar na figura 4.18a. Por outro lado, se a anomalia ocorrer no eletrodo de menor potencial, o valor do campo elétrico altera-se para $4,6 \times 10^9$ V/m 4.18b.

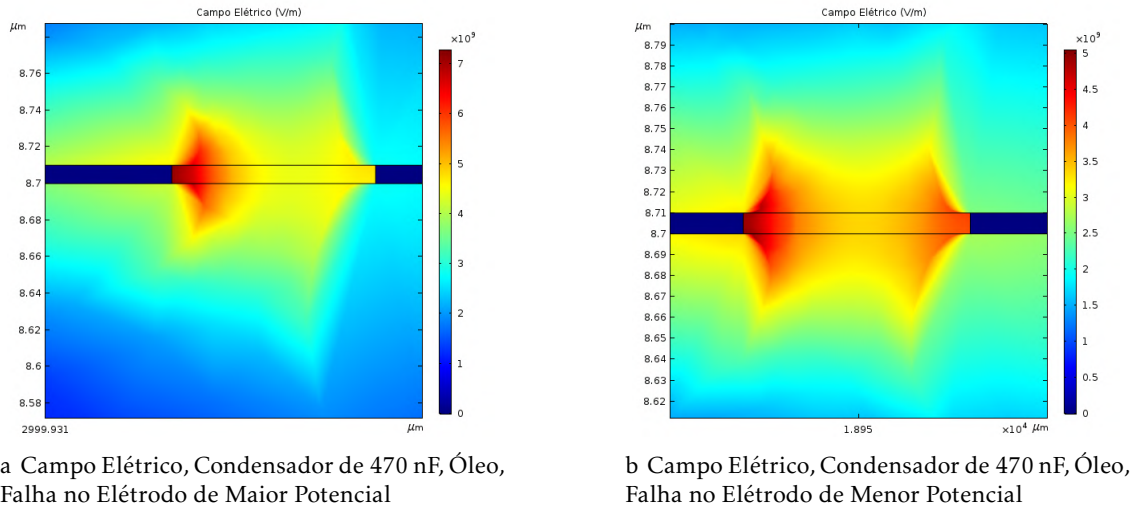


Figura 4.18: Campo Elétrico, Condensador de 470 nF, Óleo, Falhas nos Eléttrodos. Ampliações 10 e 11 da Figura 4.3

4.2 Condensador de 560 nF

4.2.1 Falhas em Ar

4.2.1.1 Sem Anomalias

As figuras 4.19 e 4.20 apresentam o potencial elétrico e o campo elétrico respetivamente da simulação do condensador de 560 nF caso não exista nenhuma anomalia no condensador.

Como se pode observar pela figura 4.19, a placa superior de maior potencial está sujeita a um potencial de 500 V, enquanto que a placa superior de menor potencial está sujeita a uma tensão de 0 V. Pode-se também observar que a placa inferior está sujeita a uma tensão de 250 V, como seria de esperar.

Analisando a figura 4.20, observa-se que o campo elétrico imediatamente após a metalização de maior potencial é de 5×10^7 V/m (50 MV/m), campo superior ao campo de ruptura no polipropileno, tal como se pode observar na tabela 4.2, sendo que possivelmente existe neste ponto uma descarga parcial.

Todas as falhas posteriores a esta simulação terão também este campo elétrico no mesmo ponto e com igual intensidade.

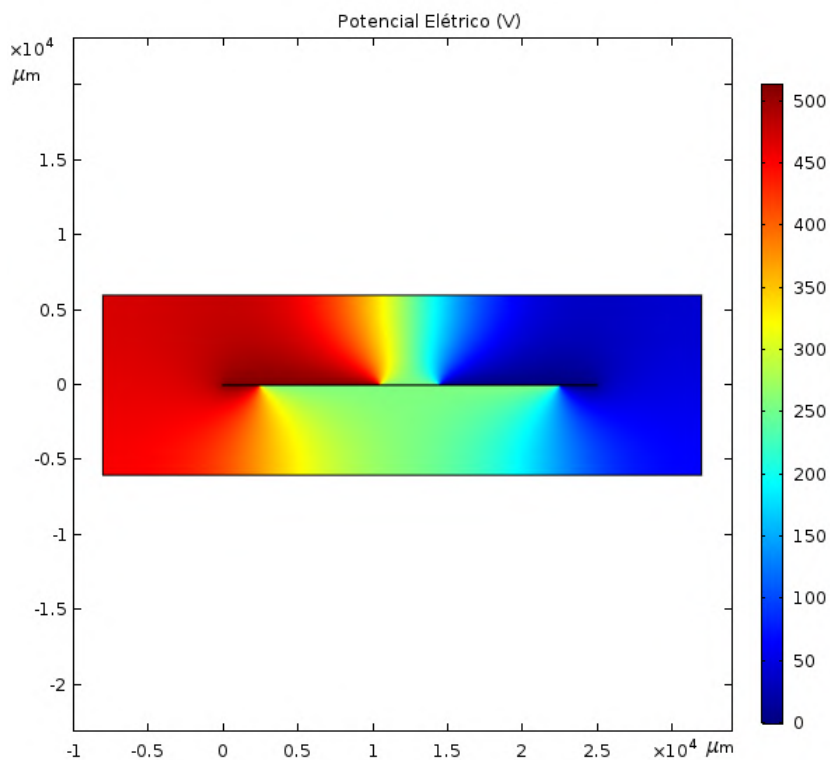


Figura 4.19: Potencial Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Sem Anomalias. Ampliação 1 da Figura 4.3

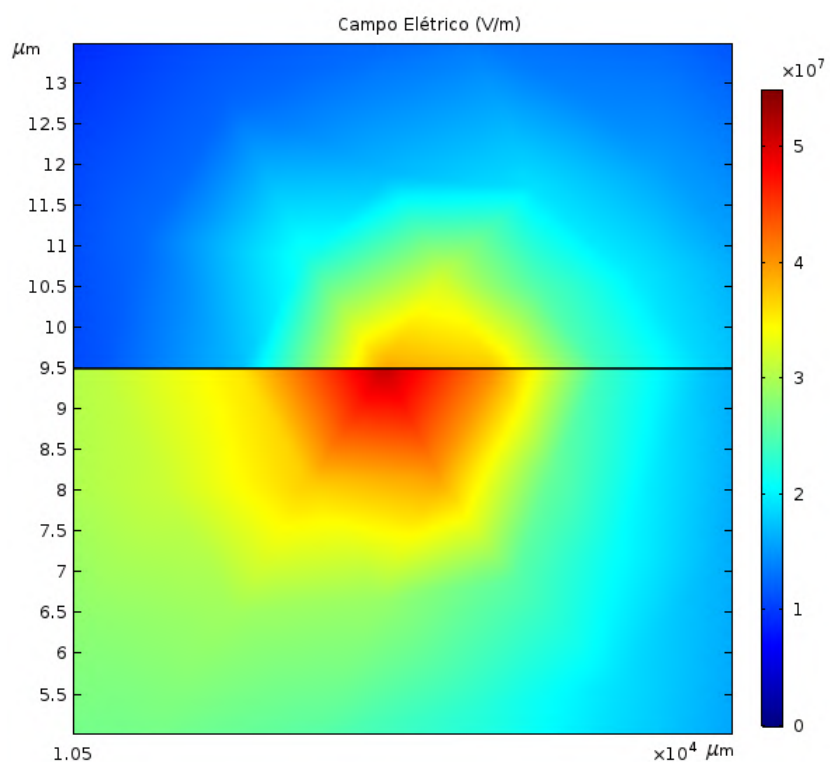


Figura 4.20: Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Sem Anomalias. Ampliação 2 da Figura 4.3

4.2.1.2 Bolhas Após a Metalização

O resultado da simulação do caso em que existem bolhas após a metalização é apresentado na figura 4.21.

As bolhas não irão afetar a distribuição de potencial elétrico, sendo que este irá ser igual ao da figura 4.19.

Analisando a figura 4.21, concluiu-se que o campo elétrico abaixo da bolha que se encontra junto ao dielétrico de maior tensão é de $0,72 \times 10^9$ V/m, campo superior ao campo de ruptura no polipropileno, tal como se pode observar na tabela 4.2. O campo elétrico dentro da bolha de ar varia bastante entre $0,25 \times 10^9$ V/m e $0,68 \times 10^9$ V/m. Qualquer destes valores de campo elétrico é superior ao campo de ruptura no ar, sendo que muito provavelmente neste zona existe uma descarga parcial.

A mancha longa e pontiaguda de cores associadas a valores muito elevados de campo é provavelmente um artefacto numérico do programa de elementos finitos, tal como discutido adiante a propósito da figura 4.34.

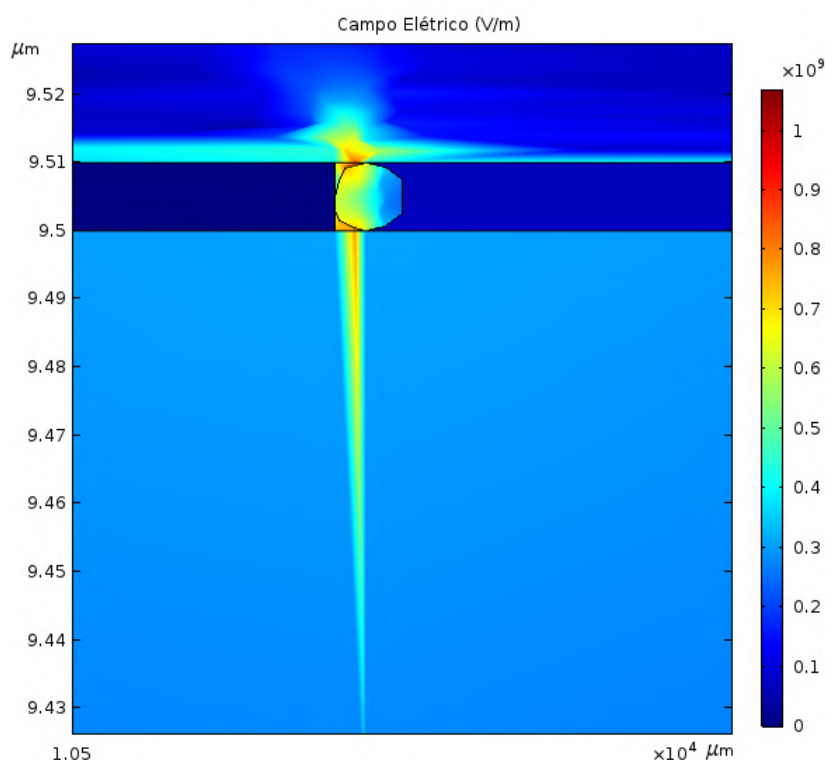


Figura 4.21: Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Bolhas Após a Metalização. Ampliação 3 da Figura 4.3

4.2.1.3 Bolhas no Dielétrico

No caso de haver bolhas no dielétrico em diferentes posições, as simulações são apresentadas na figura 4.22.

Estas falhas situam-se no elétrodo, por sua vez não irão afetar a distribuição do potencial elétrico no condensador, o que faz que esta seja igual à da figura 4.19.

Como se pode observar pela figura 4.22b, o campo elétrico não se altera caso exista uma bolha de ar no meio do dielétrico. O contrário ocorre se a bolha estiver tanto à esquerda como à direita, tal como se pode observar na figura 4.22a e 4.22c. Nestes dois casos o campo elétrico altera-se um pouco. Sendo que se a bolha se encontrar por baixo do elétrodo de maior potencial ou do de menor potencial, o campo elétrico sem esta anomalia nestas zonas seria de $2,7 \times 10^7$ V/m, observa-se que dentro da bolha o campo elétrico se altera para $3,4 \times 10^7$ V/m, na lateral esquerda e direita altera-se para $3,2 \times 10^7$ V/m e no topo e na sua base altera-se para 2×10^7 V/m.

Apesar do campo elétrico no topo e na base das bolhas mais à esquerda e à direita do dielétrico ser inferior ao campo de disrupção no mesmo, nos outros pontos é superior, existindo assim probabilidade de existirem descargas parciais com esta anomalia.

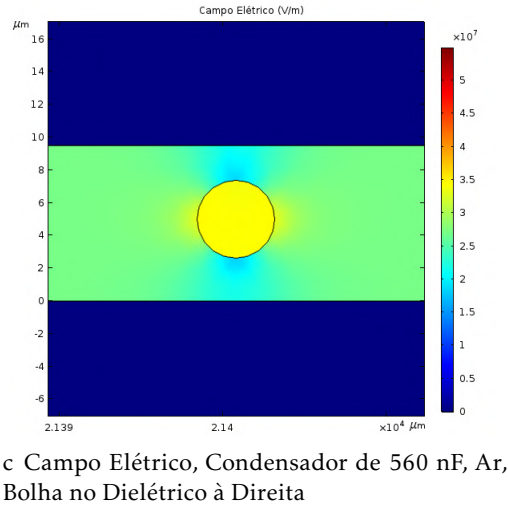
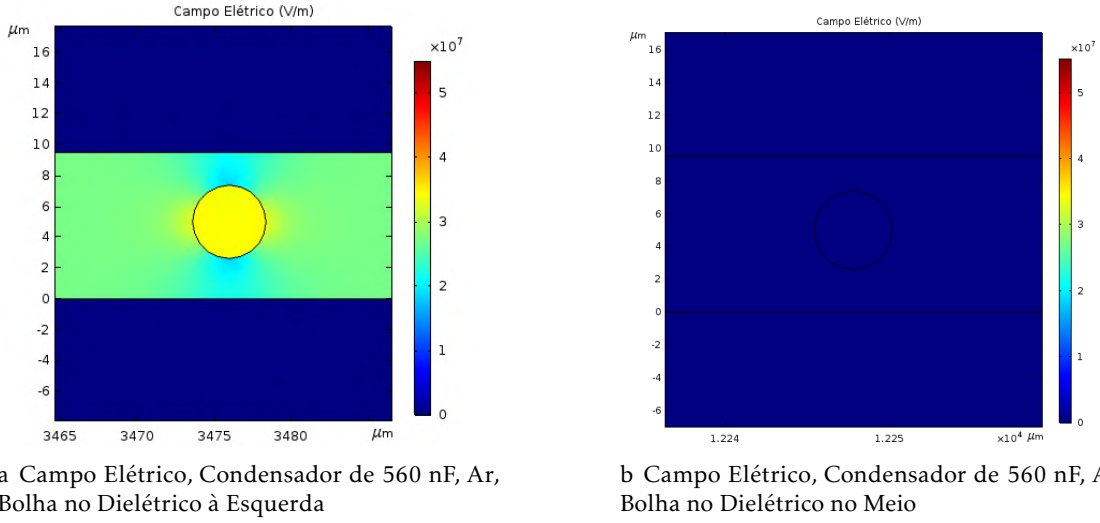


Figura 4.22: Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Bolhas no Dielétrico. Ampliações 4, 5 e 6 da Figura 4.3

4.2.1.4 Falha na metalização de baixo

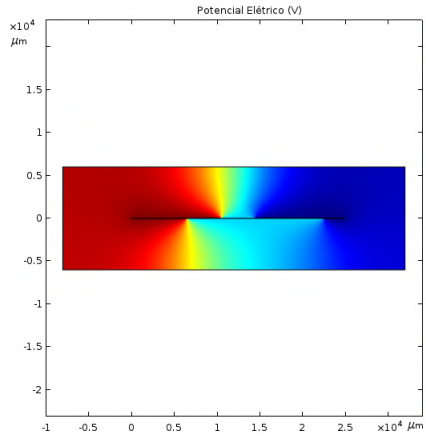
O resultado da simulação do caso em que existe uma falha na metalização da placa inferior é apresentado nas figuras 4.23 e 4.24, potencial elétrico e campo elétrico respetivamente.

Observando as figuras 4.23a, 4.23b e 4.23c, vê-se novamente que a distribuição do potencial elétrico é bastante afetada por estas falhas.

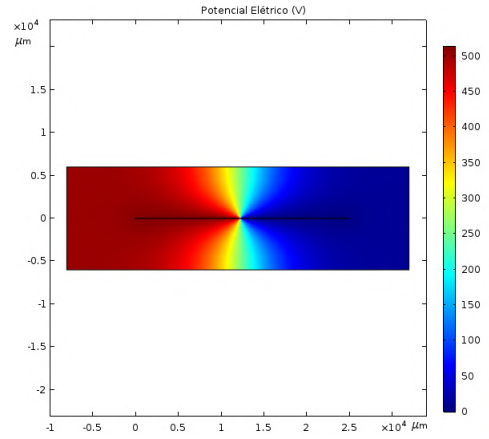
Em relação ao campo elétrico, observa-se que se a falha for à esquerda ou à direita, no extremo onde a falha ocorre o campo é mais intenso, chegando a valores de $3,2 \times 10^9$ V/m caso a falha seja à esquerda, como se pode observar na figura 4.24a ou de $5,2 \times 10^9$ V/m caso a falha seja à direita, tal como se pode observar na figura 4.24c. No caso da falha ser no centro da metalização, observa-se que o campo elétrico é similar em ambos os extremos da falha, podendo chegar a valores de $4,8 \times 10^9$ V/m em ambos os extremos, tal como se pode observar na figura 4.24b.

CAPÍTULO 4. SIMULAÇÃO EM PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS DE CONDENSADORES UTILIZADOS ANTERIORMENTE

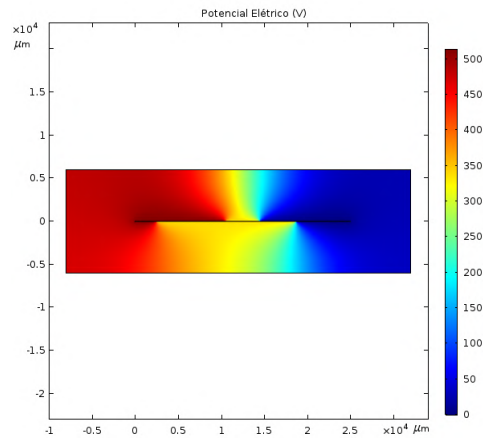
Qualquer destes valores de campo elétrico é bastante superior ao do campo de ruptura no polipropileno, como se pode observar na tabela 4.2, sendo que a probabilidade de existir descargas parciais em qualquer uma destas falhas é grande.



a Potencial Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Falha na Metalização de Baixo à Esquerda



b Potencial Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Falha na Metalização de Baixo no Meio



c Potencial Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Falha na Metalização de Baixo à Direita

Figura 4.23: Potencial Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Falha na Metalização de baixo. Ampliações 1 da Figura 4.3

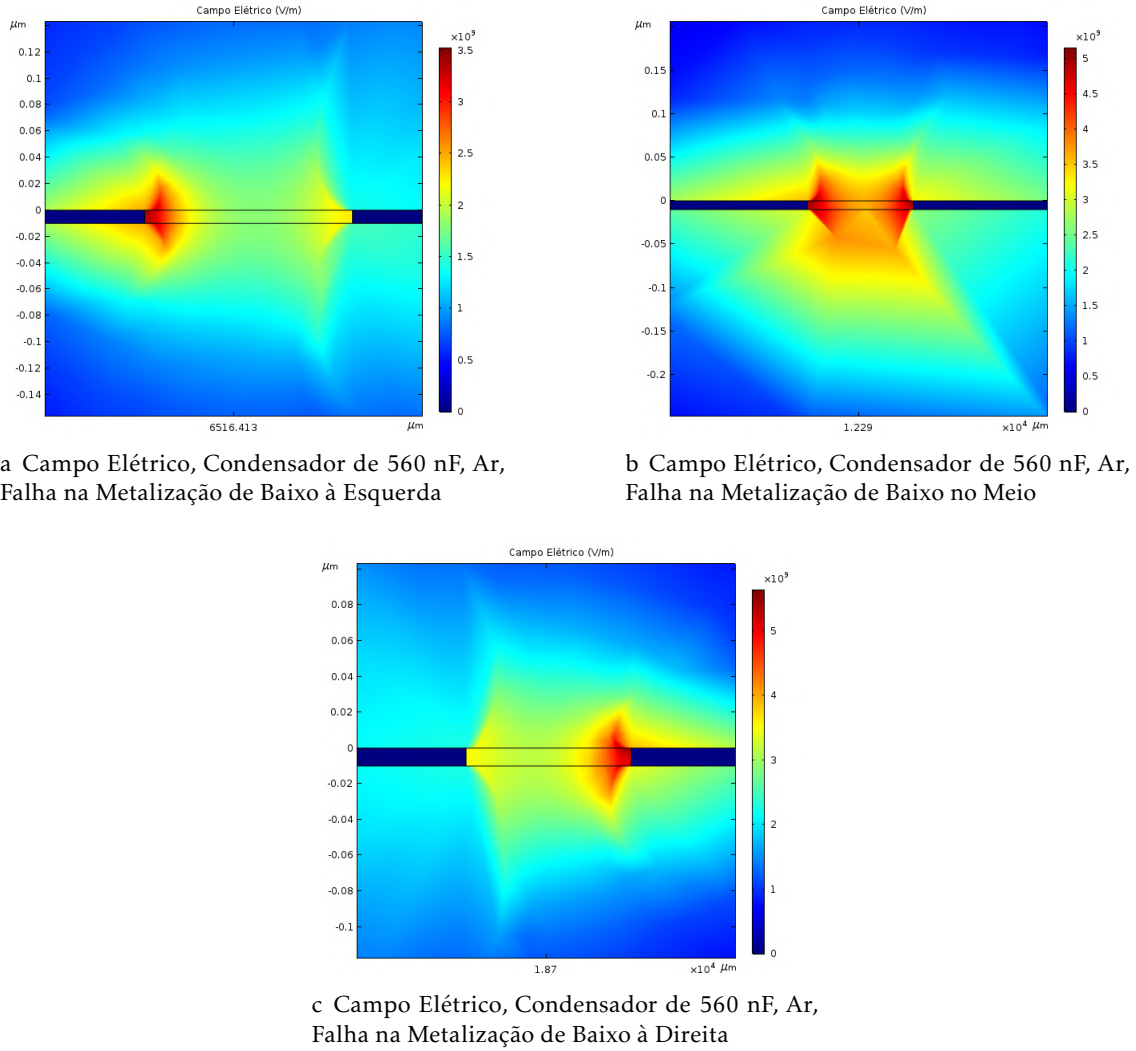


Figura 4.24: Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Falha na Metalização de Baixo. Ampliações 7, 8 e 9 da Figura 4.3

4.2.1.5 Falha na Metalização de Cima

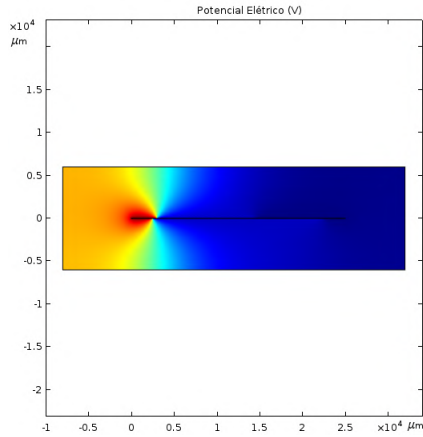
O resultado da simulação do caso em que existe uma falha na metalização de uma das placas superiores é apresentado nas figuras 4.25 e 4.26, potencial elétrico e campo elétrico respetivamente.

A falha no dielétrico de potencial mais elevado afeta mais a distribuição do potencial elétrico, sendo que esta será mais problemática do que a falha no dielétrico de potencial mais baixo, como se pode observar nas figuras 4.25a e 4.25b.

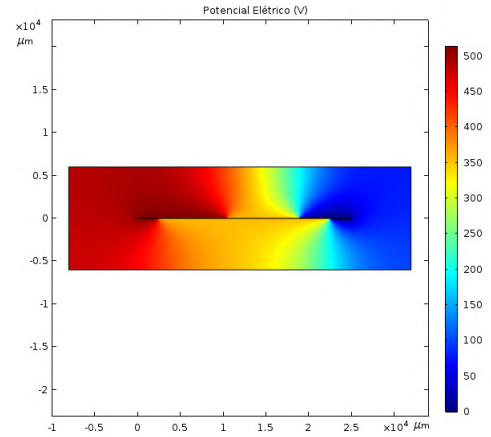
Analisando o campo elétrico das figuras 4.26a e 4.26b, vê-se que no caso da falha ser no elétrodo de potencial mais elevado o campo elétrico é mais intenso no lado esquerdo da falha, chegando aos 6×10^9 V/m. No caso da falha ser no elétrodo de menor potencial o campo elétrico é mais uniforme em toda a falha, acabando por ser mais intenso no extremo direito da falha, chegando aos $3,7 \times 10^9$ V/m.

CAPÍTULO 4. SIMULAÇÃO EM PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS DE CONDENSADORES UTILIZADOS ANTERIORMENTE

Tendo em conta o campo de disrupção no polipropileno, observa-se que qualquer tensão nos extremos destas falhas é bastante superior, sendo que existem descargas parciais caso estas falhas existam.

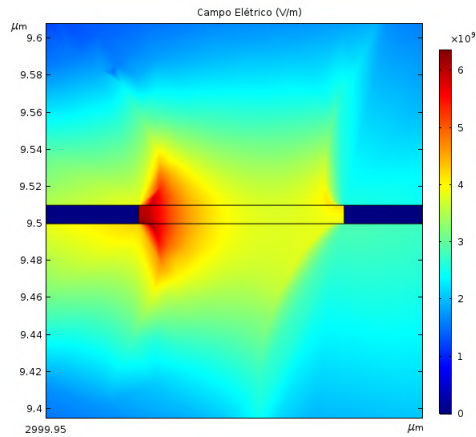


a Potencial Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Falha no Eléttrodo de Maior Potencial

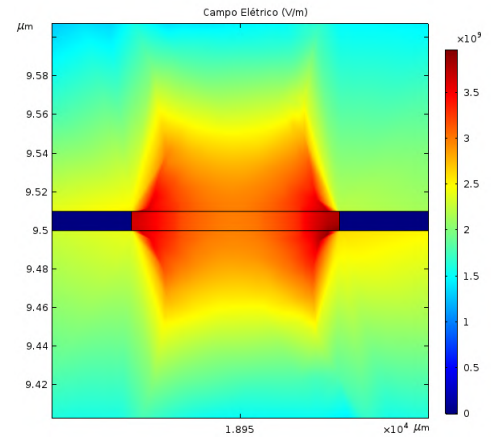


b Potencial Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Falha no Eléttrodo de Menor Potencial

Figura 4.25: Potencial Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Falhas nos Eléttrodos. Ampliação 1 da Figura 4.3



a Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Falha no Eléttrodo de Maior Potencial



b Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Falha no Eléttrodo de Menor Potencial

Figura 4.26: Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Ar, Falhas nos Eléttrodos. Ampliações 10 e 11 da Figura 4.3

4.2.2 Falhas em Óleo

A distribuição do potencial elétrico em óleo é igual à distribuição do potencial elétrico no ar, correspondente à mesma simulação. Sendo que nas secções seguintes (4.2.2.1, 4.2.2.2, 4.2.2.3, 4.2.2.4 e 4.2.2.5) apenas irão ser colocadas as figuras referentes ao campo elétrico.

4.2.2.1 Sem Anomalias

A figura 4.27 apresenta o campo elétrico da simulação do condensador de 560 nF caso não exista nenhuma anomalia no condensador.

Apesar da inexistência de óleo entre o dielétrico e o eléctrodo, observa-se que o campo elétrico nesta zona baixa um pouco comparando com a simulação em ar, tendo o valor de $4,7 \times 10^7$ V/m, tal como se pode observar na figura 4.27. Apesar da sua descida este valor continua a ser superior ao campo de disrupção no polipropileno.

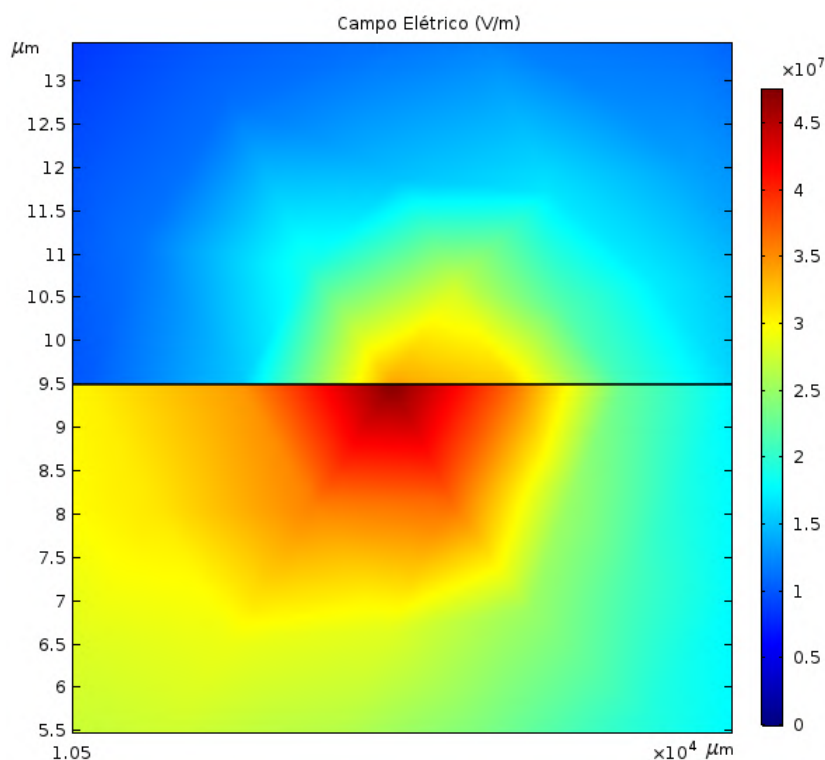


Figura 4.27: Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Óleo, Sem Anomalias. Ampliação 2 da Figura 4.3

4.2.2.2 Bolhas Após a Metalização

O resultado da simulação do caso em que existem bolhas após a metalização é apresentado na figura 4.28.

Analisando a figura 4.28, concluiu-se que o campo elétrico abaixo da bolha que se encontra junto ao dielétrico de maior tensão é de $0,7 \times 10^9$ V/m, campo superior ao campo

CAPÍTULO 4. SIMULAÇÃO EM PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS DE CONDENSADORES UTILIZADOS ANTERIORMENTE

de ruptura no polipropileno, tal como se pode observar na tabela 4.2. O campo elétrico dentro da bolha de óleo varia bastante entre $0,2 \times 10^9$ V/m e $0,68 \times 10^9$ V/m. Qualquer destes valores de campo elétrico é superior ao campo de ruptura no ar, sendo que muito provavelmente nesta zona existe uma descarga parcial.

Novamente, a mancha longa e pontiaguda de cores referentes a campos elevados é provavelmente resultado de ruído numérico, tal como discutido adiante a propósito da figura 4.34.

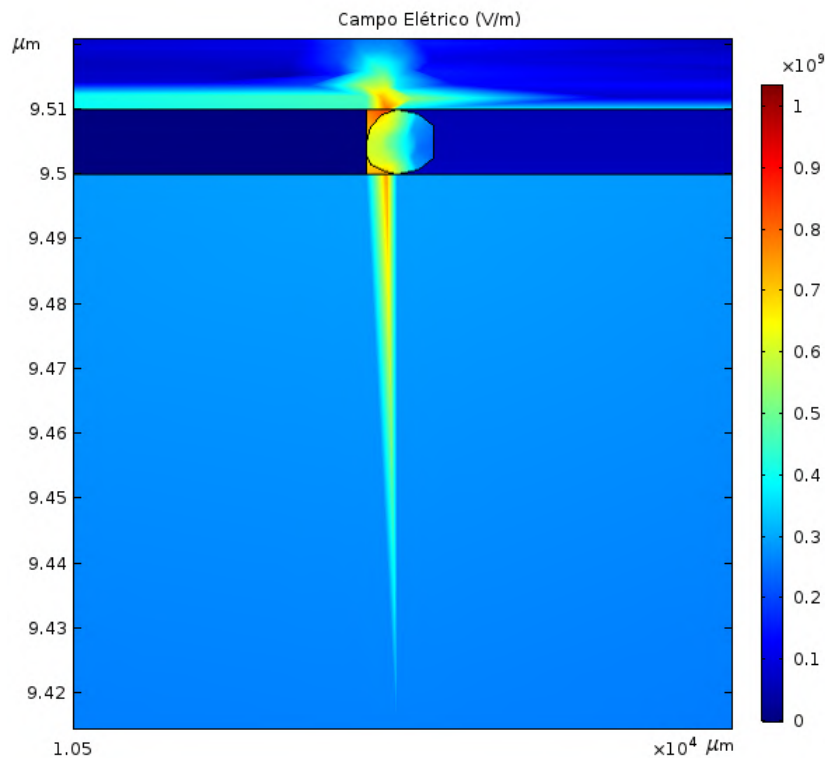


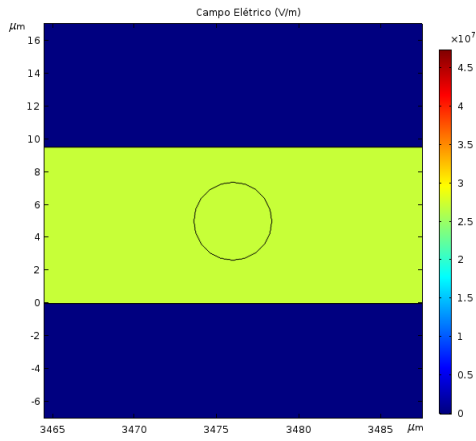
Figura 4.28: Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Óleo, Bolhas Após a Metalização. Ampliação 3 da Figura 4.3

4.2.2.3 Bolhas no Dielétrico

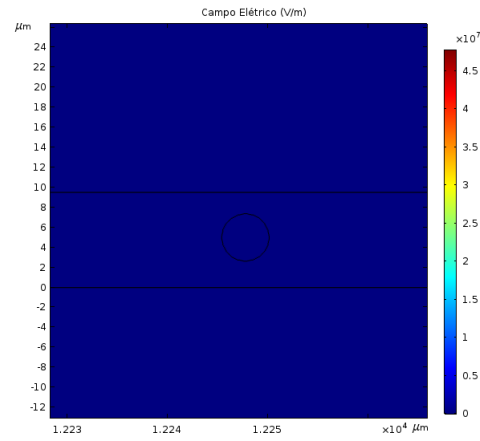
No caso de haver bolhas no dielétrico em diferentes posições, as simulações são apresentadas na figura 4.29.

Como se pode observar, campo elétrico não se altera independentemente de onde ocorra a anomalia, tal como se pode observar nas figuras 4.29a, 4.29b e 4.29c. Apesar disto, observa-se que o campo elétrico no dielétrico à esquerda e à direita já é de $2,7 \times 10^7$ V/m, o que significa que muito provavelmente existe uma descarga parcial nesta zona, mesmo sem existência de anomalia.

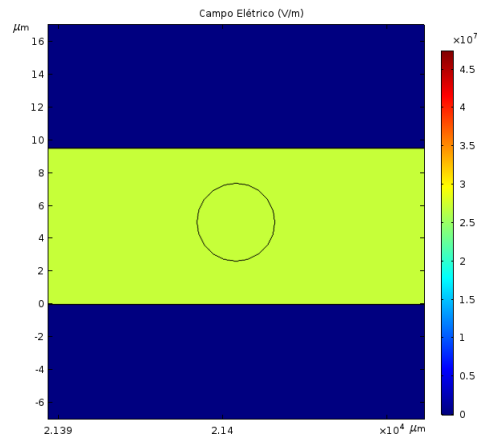
O facto de não existir diferença no campo elétrico deve-se às constantes dielétricas nestes materiais ser igual.



a Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Óleo, Bolha no Dielétrico à Esquerda



b Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Óleo, Bolha no Dielétrico no Meio



c Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Óleo, Bolha no Dielétrico à Direita

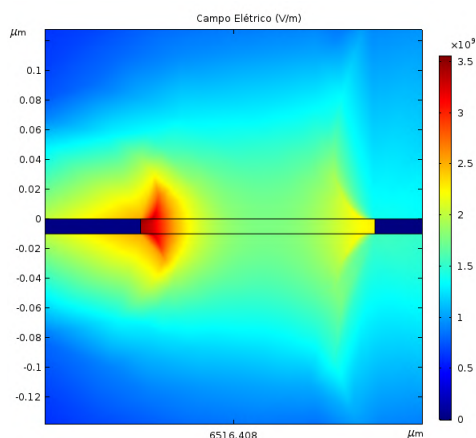
Figura 4.29: Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Óleo, Bolhas no Dielétrico. Ampliações 4, 5 e 6 da Figura 4.3

4.2.2.4 Falha na Metalização de Baixo

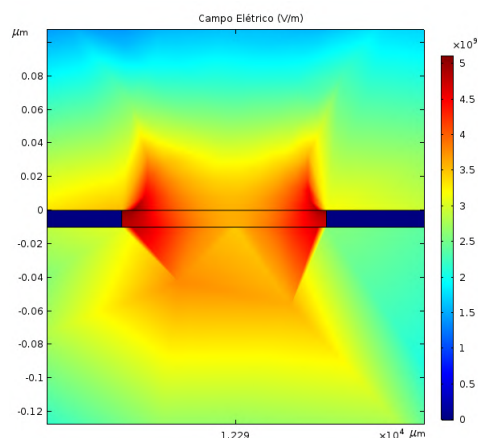
O resultado da simulação do campo elétrico no caso em que existe uma falha na metalização da placa inferior é apresentado na figura 4.30.

Observa-se que independentemente da falha se situar no lado esquerdo ou no lado direito da metalização, no extremo onde a falha ocorre o campo é mais intenso, chegando a valores de 3×10^9 V/m caso a falha seja à esquerda, como se pode observar na figura 4.30a ou de $5,16 \times 10^9$ V/m caso a falha seja à direita, tal como se pode observar na figura 4.30c. No caso da falha ser no centro da metalização, observa-se que o campo elétrico é similar em ambos os extremos da falha, podendo chegar a valores de $4,8 \times 10^9$ V/m em ambos os extremos, tal como se pode observar na figura 4.30b.

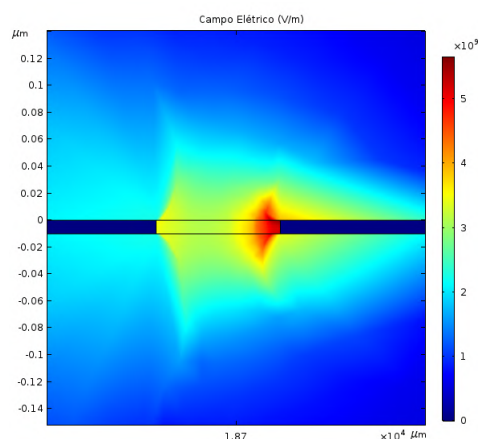
Qualquer destes valores de campo elétrico é bastante superior ao do campo de ruptura no polipropileno, tal como se pode observar na tabela 4.2, sendo que a probabilidade de existir descargas parciais em qualquer uma destas falhas é grande.



a Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Óleo, Falha na Metalização de Baixo à Esquerda



b Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Óleo, Falha na Metalização de Baixo no Meio



c Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Óleo, Falha na Metalização de Baixo à Direita

Figura 4.30: Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Óleo, Falhas na Metalização de Baixo. Ampliações 7, 8 e 9 da Figura 4.3

4.2.2.5 Falha na Metalização de Cima

O resultado da simulação do campo elétrico no caso em que existe uma falha na metalização de uma das placas superiores é apresentado na figura 4.31.

Analisando o campo elétrico das figuras 4.31a e 4.31b, vê-se que no caso da falha ser no elétrodo de potencial mais elevado o campo elétrico é mais intenso no lado esquerdo da falha, chegando aos $5,9 \times 10^9$ V/m. No caso da falha ser no elétrodo de menor potencial o campo elétrico é mais uniforme em toda a falha, chegando aos $3,6 \times 10^9$ V/m.

Tendo em conta o campo de ruptura no polipropileno, observa-se que qualquer campo nos extremos destas falhas é bastante superior, sendo que existem descargas parciais caso estas falhas existam.

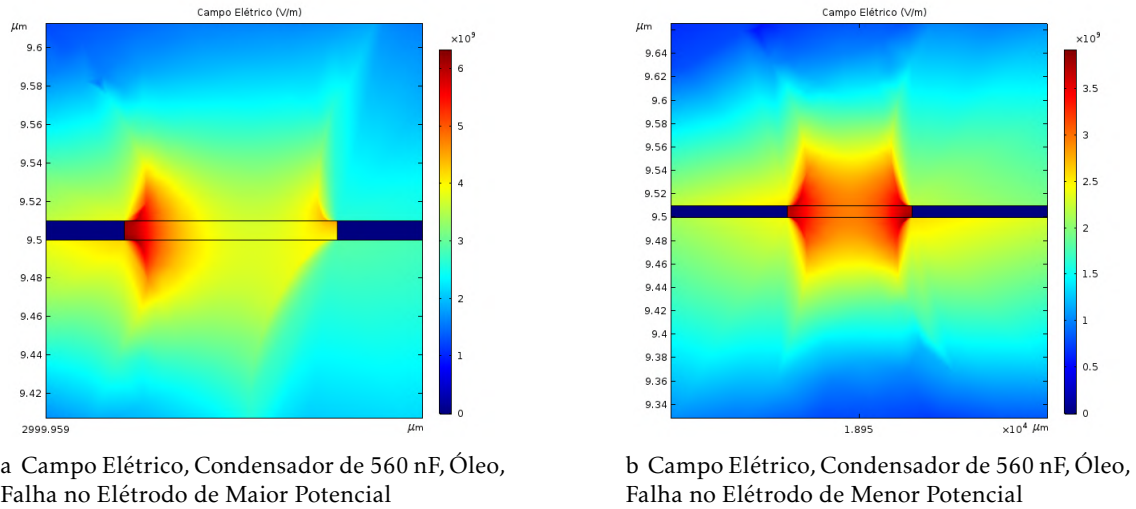


Figura 4.31: Campo Elétrico, Condensador de 560 nF, Óleo, Falhas nos Eléttrodos. Ampliações 10 e 11 da Figura 4.3

4.3 Condensador de 680 nF

4.3.1 Falhas em Ar

4.3.1.1 Sem Anomalias

As figuras 4.32 e 4.33 apresentam o potencial elétrico e o campo elétrico respetivamente da simulação do condensador de 680 nF caso não exista nenhuma anomalia no condensador.

Como se pode observar pela figura 4.32, a placa superior de maior potencial está sujeita a um potencial de 420 V, enquanto que a placa superior de menor potencial está sujeita a uma tensão de 0 V. Pode-se também observar que a placa inferior está sujeita a uma tensão de 210 V, como seria de esperar.

Analisando a figura 4.33, observa-se que o campo elétrico imediatamente após a metalização de maior potencial é de 4.3×10^7 V/m (43 MV/m), este valor de campo é superior ao campo de disrupção no polipropileno, como se pode observar na tabela 4.2, sendo que possivelmente existe neste ponto uma descarga parcial.

Todas as falhas posteriores a esta simulação terão também este campo elétrico no mesmo ponto e com igual intensidade.

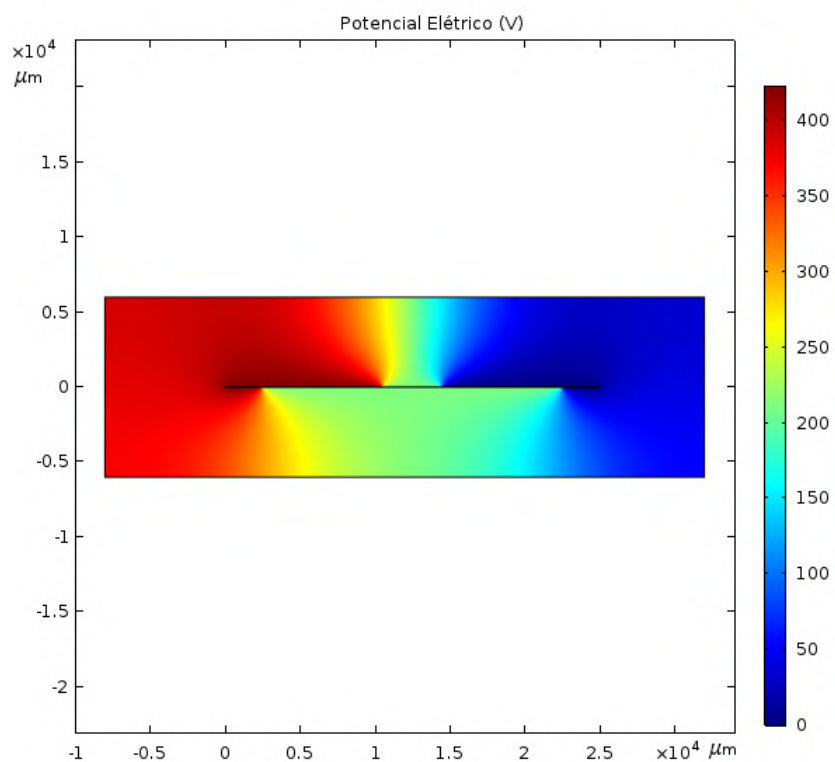


Figura 4.32: Potencial Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Sem Anomalias. Ampliação 1 da Figura 4.3

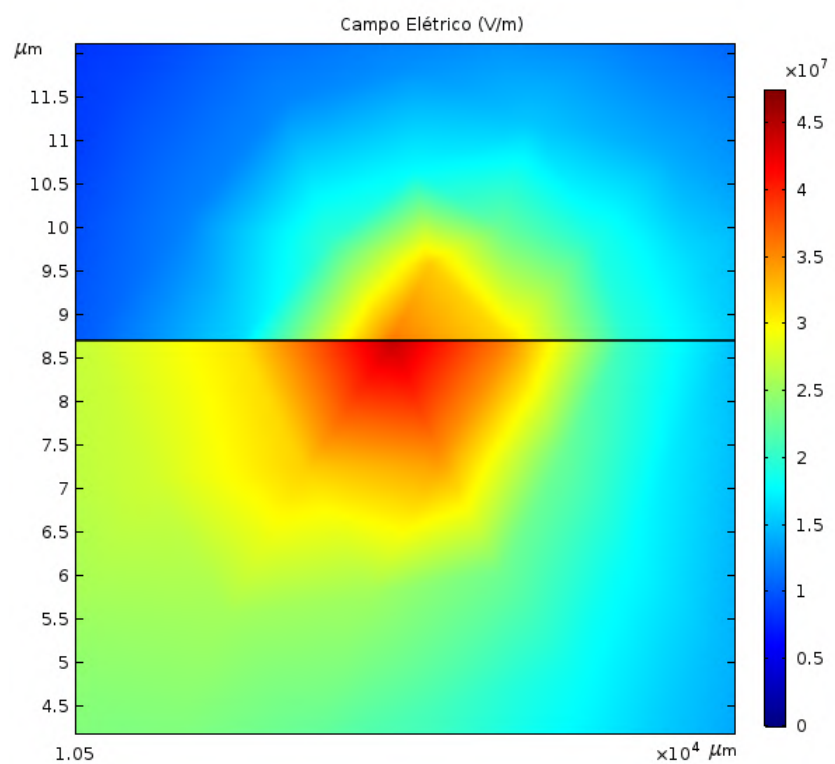


Figura 4.33: Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Sem Anomalias. Ampliação 2 da Figura 4.3

4.3.1.2 Bolhas Após a Metalização

O resultado da simulação do caso em que existem bolhas após a metalização é apresentado na figura 4.34.

Sendo que as bolhas não se situam em nenhum dielétrico, estas não afetam o potencial elétrico no condensador. Posto isto, o potencial elétrico será igual ao da figura 4.32.

Analisando a figura 4.34, concluiu-se que o campo elétrico abaixo da bolha que se encontra junto ao dielétrico de maior tensão é de 6×10^8 V/m, campo superior ao campo de disrupção no polipropileno, tal como se pode observar na tabela 4.2. O campo elétrico dentro da bolha de ar varia bastante entre 2×10^8 V/m e $5,8 \times 10^8$ V/m.

Qualquer destes valores de campo elétrico é superior ao campo de disrupção no ar, sendo que muito provavelmente nesta zona existe uma descarga parcial.

A mancha longa e pontiaguda de cores associadas a valores muito elevados de campo é provavelmente um artefacto numérico do programa de elementos finitos, causado pela pequena dimensão da bolha comparada com a dimensão das malhas da grelha de elementos finitos. O uso de malhas de tamanho mais apropriado quanto à precisão numérica iria, no entanto, exigir um tempo de cálculo incomportável.

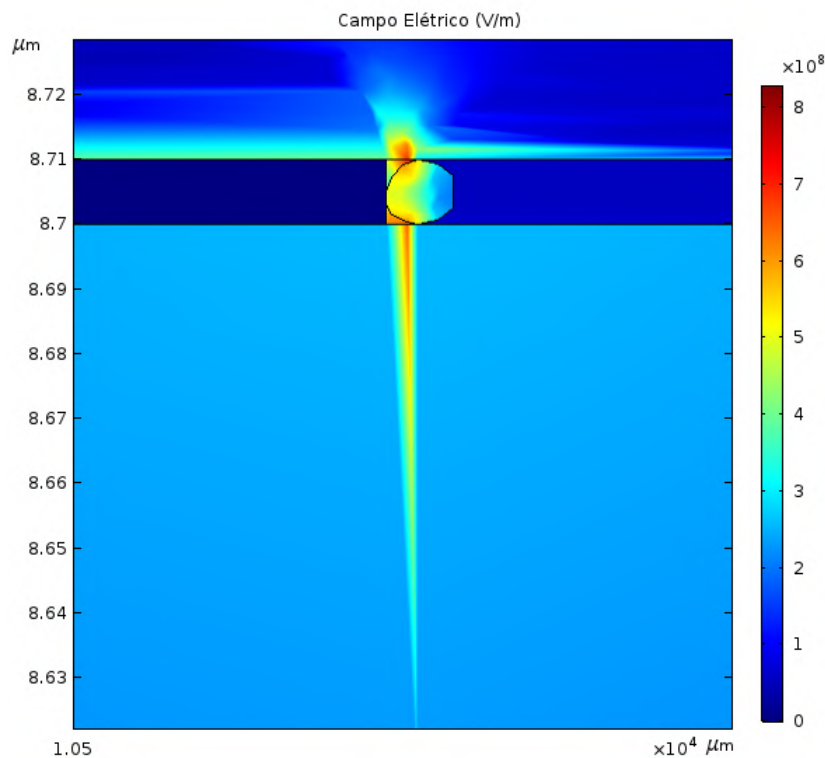


Figura 4.34: Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Bolhas Após a Metalização. Ampliação 3 da Figura 4.3

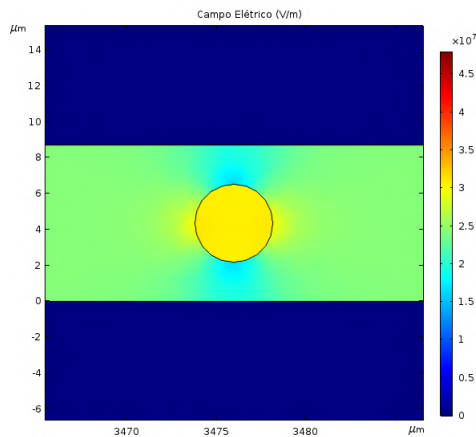
4.3.1.3 Bolhas no Dielétrico

No caso de haver bolhas no dielétrico em diferentes posições, as simulações são apresentadas na figura 4.35.

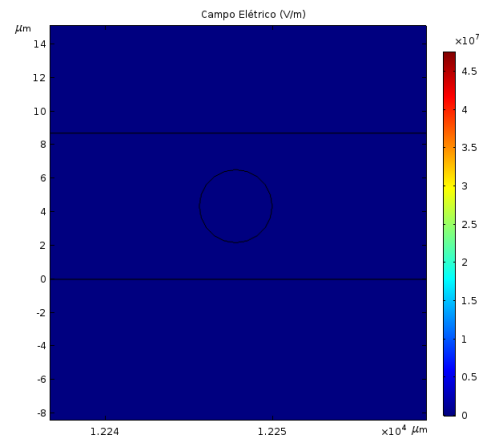
Estas falhas situam-se no elétrodo, por sua vez não irão afetar a distribuição do potencial elétrico no condensador, o que faz que esta seja igual à da figura 4.32.

Como se pode observar pela figura 4.35b, o campo elétrico não se altera caso exista uma bolha de ar no meio do dielétrico. O contrário ocorre se a bolha estiver tanto à esquerda como à direita, tal como se pode observar na figura 4.35a e 4.35c. Nestes dois casos o campo elétrico altera-se um pouco, sendo que se a bolha se encontrar por baixo do elétrodo de maior potencial ou do de menor potencial, o campo elétrico sem esta anomalia nestas zonas seria de $2,4 \times 10^7$ V/m, observa-se que dentro da bolha o campo elétrico se altera para 3×10^7 V/m, na lateral esquerda e direita altera-se para $2,9 \times 10^7$ V/m e no topo e na sua base altera-se para $1,7 \times 10^7$ V/m.

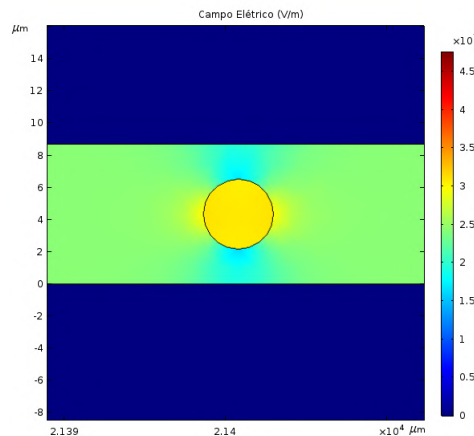
Apesar do campo elétrico no topo e na base das bolhas mais à esquerda e à direita do dielétrico ser inferior ao campo de disrupção no mesmo, nos outros pontos é superior, existindo assim probabilidade de existirem descargas parciais com esta anomalia.



a Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Bolha no Dielétrico à Esquerda



b Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Bolha no Dielétrico no Meio



c Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Bolha no Dielétrico à Direita

Figura 4.35: Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Bolhas no Dielétrico. Ampliações 4, 5 e 6 da Figura 4.3

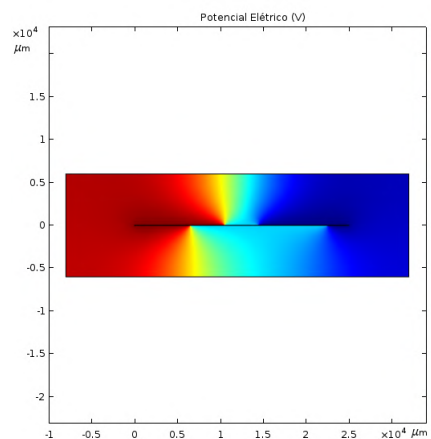
4.3.1.4 Falha na Metalização de Baixo

O resultado da simulação do caso em que existe uma falha na metalização da placa inferior é apresentado nas figuras 4.36 e 4.37, potencial elétrico e campo elétrico respectivamente.

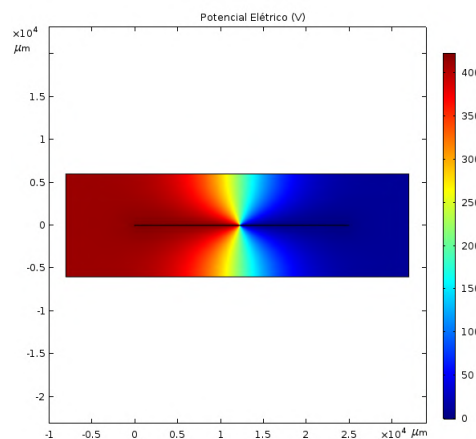
Observando as figuras 4.36a, 4.36b e 4.36c, vê-se que a distribuição do potencial elétrico é bastante afetada por estas falhas.

Ao se analisar o campo elétrico, vê-se que se a falha for à esquerda ou à direita, no extremo onde a falha ocorre o campo é mais intenso, chegando a valores de $2,7 \times 10^9$ V/m caso a falha seja à esquerda, como se pode observar na figura 4.37a ou de $4,2 \times 10^9$ V/m caso a falha seja à direita, tal como se pode observar na figura 4.37c. No caso da falha ser no centro da metalização, observa-se que o campo elétrico é similar em ambos os extremos da falha, podendo chegar a valores de $4,2 \times 10^9$ V/m em ambos os extremos, como se pode observar na figura 4.37b.

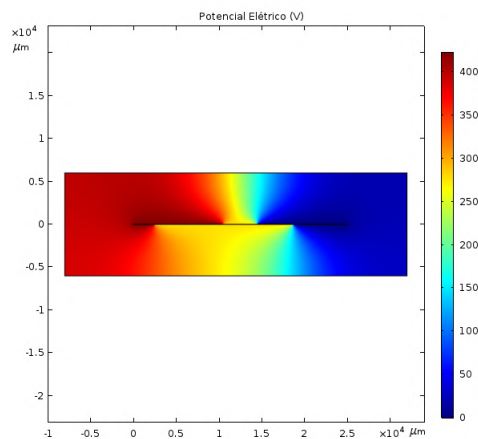
Qualquer destes valores de campo elétrico é bastante superior ao do campo de ruptura no polipropileno, tal como se pode observar na tabela 4.2, sendo que a probabilidade de existir descargas parciais em qualquer uma destas falhas é grande.



a Potencial Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Falha na Metalização de Baixo à Esquerda



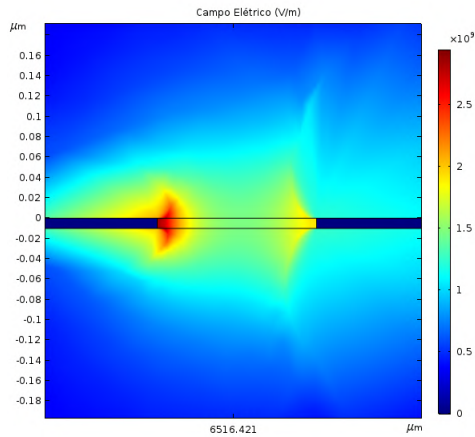
b Potencial Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Falha na Metalização de Baixo no Meio



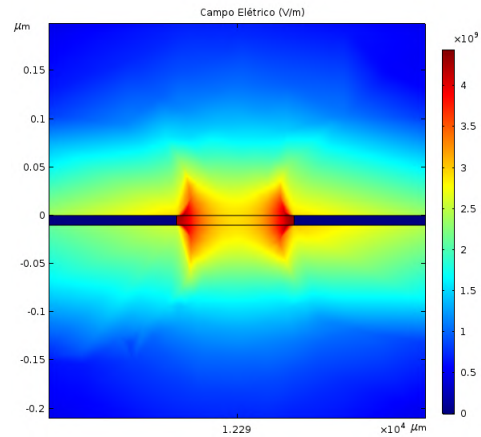
c Potencial Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Falha na Metalização de Baixo à Direita

Figura 4.36: Potencial Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Falhas na Metalização de Baixo. Ampliação 1 da Figura 4.3

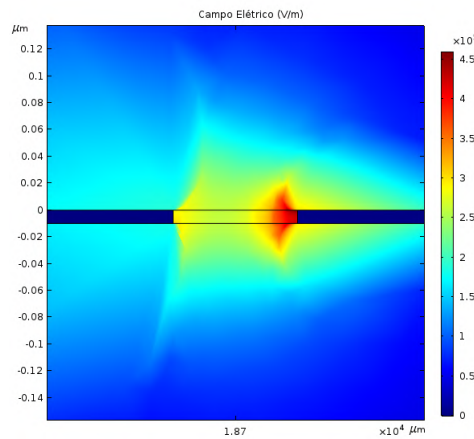
CAPÍTULO 4. SIMULAÇÃO EM PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS DE CONDENSADORES UTILIZADOS ANTERIORMENTE



a Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Falha na Metalização de Baixo à Esquerda



b Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Falha na Metalização de Baixo no Meio



c Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Falha na Metalização de Baixo à Direita

Figura 4.37: Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Falhas na Metalização de Baixo. Ampliações 7, 8 e 9 da Figura 4.3

4.3.1.5 Falha na Metalização de Cima

O resultado da simulação do caso em que existe uma falha na metalização de uma das placas superiores é apresentado nas figuras 4.38 e 4.39, potencial elétrico e campo elétrico respectivamente.

A falha no dielétrico de potencial mais elevado afeta mais a distribuição do potencial elétrico, sendo que esta será mais problemática do que a falha no dielétrico de menor potencial, como se pode observar nas figuras 4.38a e 4.38b.

Analisando o campo elétrico das figuras 4.39a e 4.39b, vê-se que no caso da falha ser no eletrodo de potencial mais elevado o campo elétrico é mais intenso no lado esquerdo da falha, chegando aos $4,6 \times 10^9$ V/m. No caso da falha ser no eletrodo de menor potencial o campo elétrico é mais uniforme em toda a falha, acabando por ser mais intenso no extremo esquerdo da falha, chegando aos $3,1 \times 10^9$ V/m.

Tendo em conta o valor do campo de disrupção no polipropileno observa-se que qualquer campo elétrico nos extremos destas falhas é bastante superior, sendo que existem descargas parciais caso estas falhas existam.

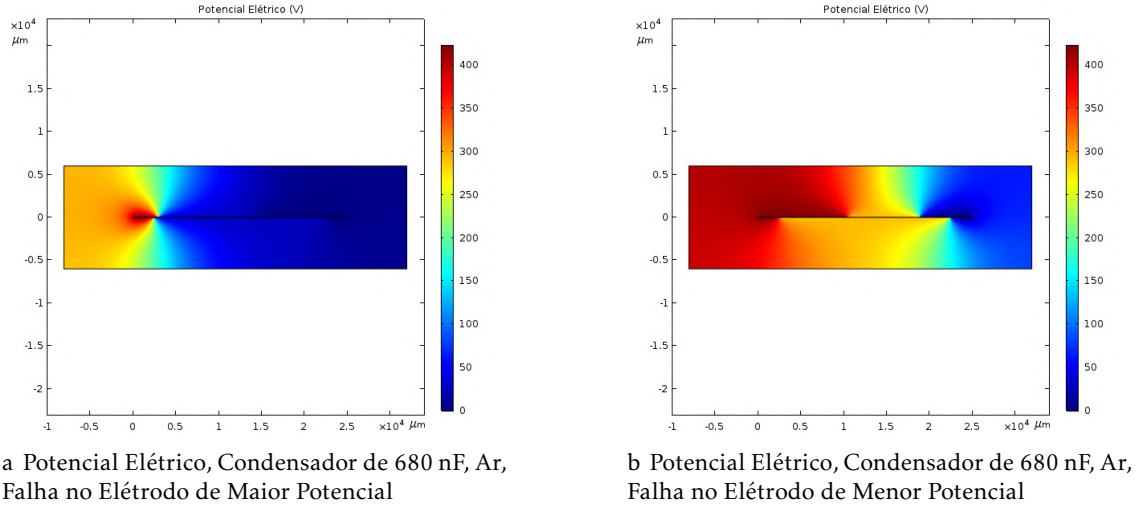


Figura 4.38: Potencial Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Falhas nos Eléctrodos. Ampliação 1 da Figura 4.3

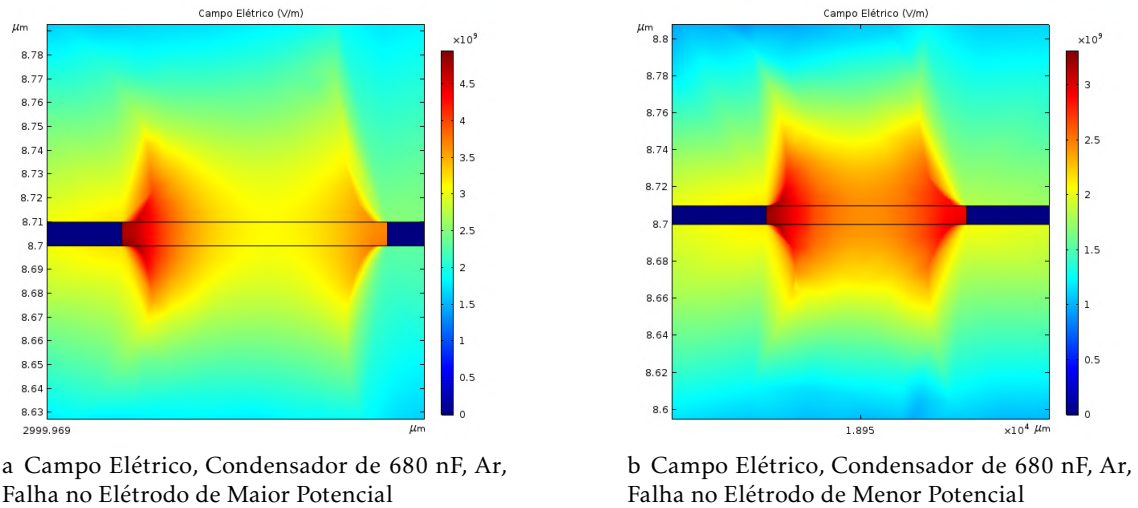


Figura 4.39: Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Ar, Falhas nos Eléctrodos. Ampliações 10 e 11 da Figura 4.3

4.3.2 Falhas em Óleo

A distribuição do potencial elétrico em óleo é igual à distribuição do potencial elétrico no ar, correspondente à mesma simulação. Sendo que nas secções seguintes (4.3.2.1, 4.3.2.2, 4.3.2.3, 4.3.2.4 e 4.3.2.5) apenas irão ser colocadas as figuras referentes ao campo elétrico.

4.3.2.1 Sem Anomalias

A figura 4.40 apresenta o campo elétrico da simulação do condensador de 680 nF caso não exista nenhuma anomalia no condensador.

Apesar da inexistência de óleo entre o dielétrico e o eletrodo, observa-se que o campo elétrico nesta zona baixa um pouco comparando com a simulação em ar, tendo o valor de $4,1 \times 10^7$ V/m, tal como se pode observar na figura 4.40. Apesar da sua descida este valor continua a ser superior ao campo de disrupção no polipropileno.

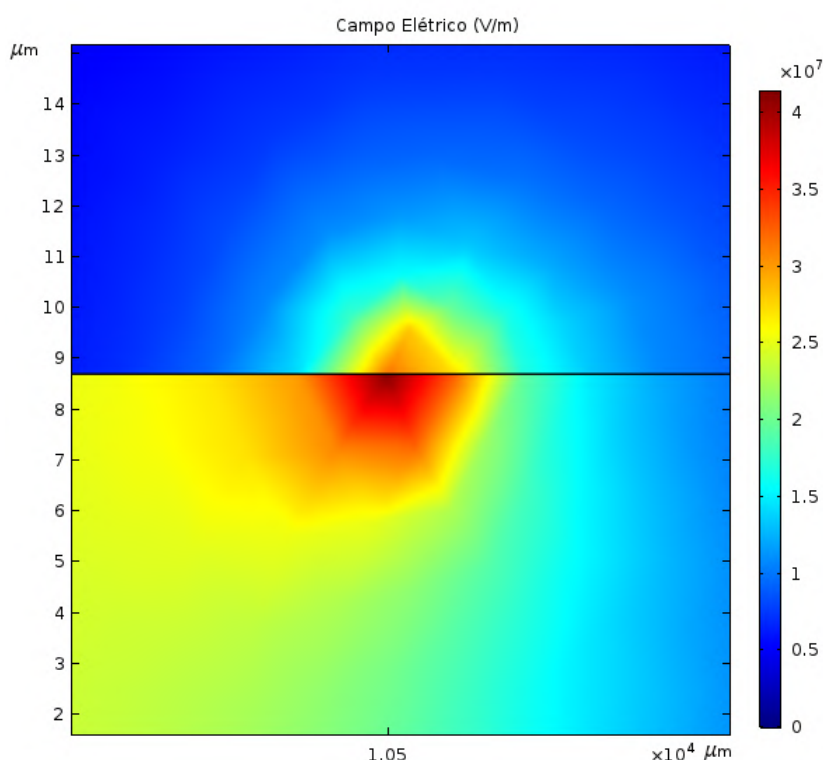


Figura 4.40: Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Óleo, Sem Anomalias. Ampliação 2 da Figura 4.3

4.3.2.2 Bolhas Após a Metalização

O resultado da simulação do caso em que existem bolhas após a metalização é apresentado na figura 4.41.

Analisando a figura 4.41, concluiu-se que o campo elétrico abaixo da bolha que se encontra junto ao dielétrico de maior tensão é de $5,9 \times 10^8$ V/m, campo superior ao campo de disrupção no polipropileno, tal como se pode observar na tabela 4.2. O campo elétrico dentro da bolha de óleo varia bastante, entre 2×10^8 V/m e $5,4 \times 10^8$ V/m. Qualquer destes valores de campo é superior ao campo de disrupção no ar, sendo que muito provavelmente nesta zona existe uma descarga parcial.

A mancha longa e pontiaguda de valores elevados de campo, tal como foi comentado a propósito figura 4.34, resulta provavelmente de ruído numérico decorrente de uma

dimensão da malha de elementos finitos desajustada à dimensão da bolha simulada.

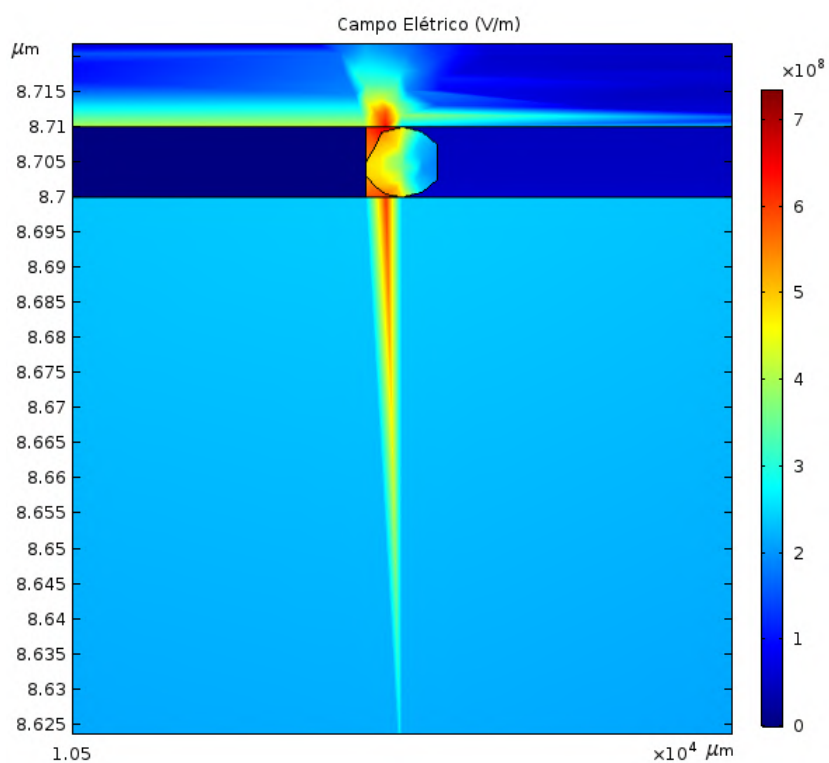


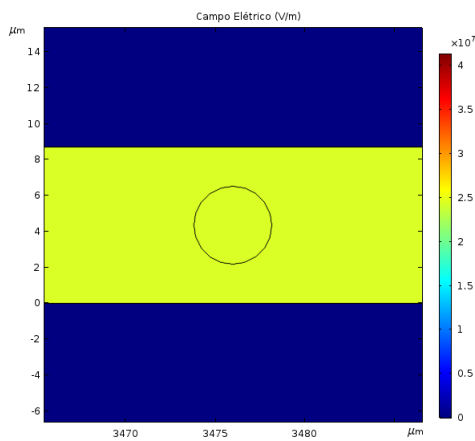
Figura 4.41: Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Óleo, Bolhas Após a Metalização. Ampliação 3 da Figura 4.3

4.3.2.3 Bolhas no Dielétrico

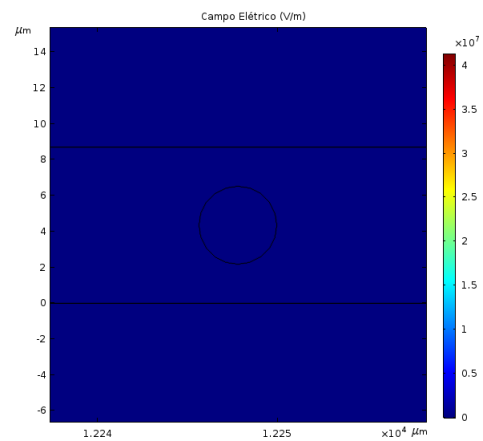
No caso de haver bolhas no dielétrico em diferentes posições, as simulações são apresentadas na figura 4.42.

Como se pode observar, não existem variações do campo elétrico devido à anomalia independentemente de onde esta ocorra, tal como se pode observar nas figuras 4.42a, 4.42b e 4.42c. Apesar de tal acontecer, observa-se que o campo elétrico no dielétrico à esquerda e à direita já é de $2,4 \times 10^7$ V/m. Este valor de campo elétrico está muito próximo do campo de ruptura no polipropileno, mas não é superior, o que significa que não existem aqui descargas parciais.

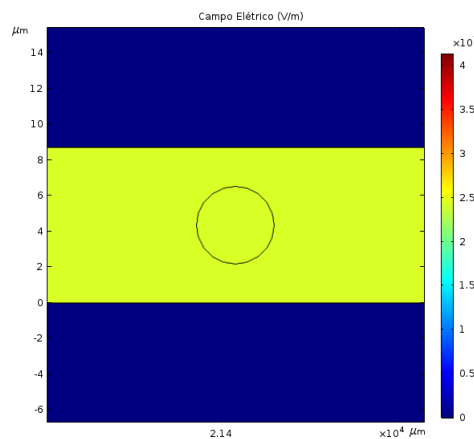
O facto de não existir diferença no campo elétrico deve-se às constantes dielétricas nestes materiais ser igual.



a Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Óleo, Bolha no Dielétrico à Esquerda



b Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Óleo, Bolha no Dielétrico no Meio



c Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Óleo, Bolha no Dielétrico à Direita

Figura 4.42: Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Óleo, Bolhas no Dielétrico. Ampliações 4, 5 e 6 da Figura 4.3

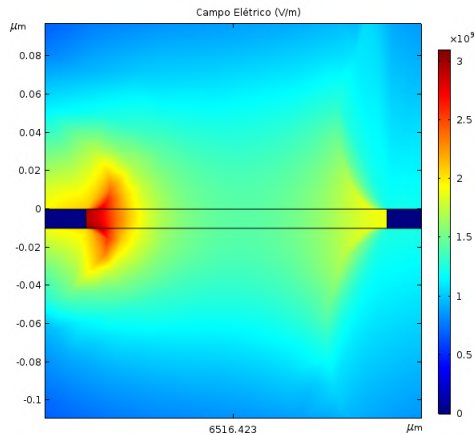
4.3.2.4 Falha na Metalização de Baixo

O resultado da simulação do campo elétrico no caso em que existe uma falha na metalização da placa inferior é apresentado na figura 4.43.

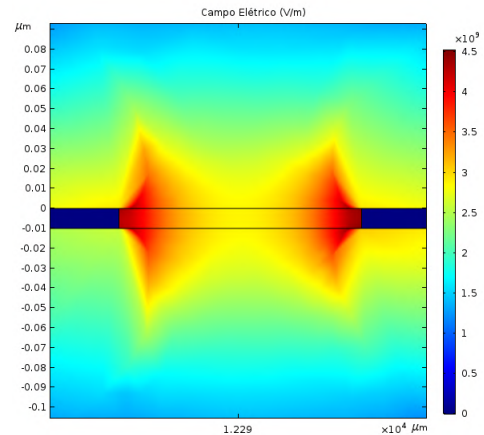
Observa-se que independentemente da falha se situar no lado esquerdo ou no lado direito da metalização, no extremo onde a falha ocorre o campo é mais intenso, chegando a valores de $2,6 \times 10^9$ V/m caso a falha seja à esquerda, tal como se pode observar na figura 4.43a ou de $4,2 \times 10^9$ V/m caso a falha seja à direita, como se pode observar na figura 4.43c. No caso da falha ser no centro da metalização, observa-se que o campo elétrico é similar em ambos os extremos da falha, podendo chegar a valores de $4,2 \times 10^9$ V/m em ambos os extremos, tal como se pode observar na figura 4.43b.

Qualquer destes valores de campo elétrico é bastante superior ao do campo de disrupção no polipropileno, como se pode observar na tabela 4.2, sendo que a probabilidade de existir descargas parciais em qualquer uma destas falhas é grande.

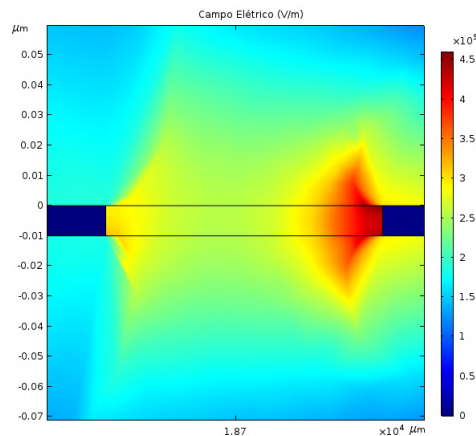
CAPÍTULO 4. SIMULAÇÃO EM PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS DE CONDENSADORES UTILIZADOS ANTERIORMENTE



a Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Óleo, Falha na Metalização de Baixo à Esquerda



b Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Óleo, Falha na Metalização de Baixo no Meio



c Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Óleo, Falha na Metalização de Baixo à Direita

Figura 4.43: Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Óleo, Falhas na Metalização de Baixo. Ampliações 7, 8 e 9 da Figura 4.3

4.3.2.5 Falha na metalização de cima

O resultado da simulação do campo elétrico no caso em que existe uma falha na metalização de uma das placas superiores é apresentado na figura 4.44.

Analisando o campo elétrico das figuras 4.44a e 4.44b, observa-se que no caso da falha ser no eletrodo de potencial mais elevado o campo elétrico é mais intenso no lado esquerdo da falha, chegando aos $4,5 \times 10^9$ V/m. No caso da falha ser no eletrodo de menor potencial o campo elétrico é mais uniforme em toda a falha, chegando aos 3×10^9 V/m.

Tendo em conta o campo de ruptura no polipropileno, observa-se que qualquer campo elétrico nos extremos destas falhas é bastante superior, sendo que existem descargas parciais caso estas falhas existam.

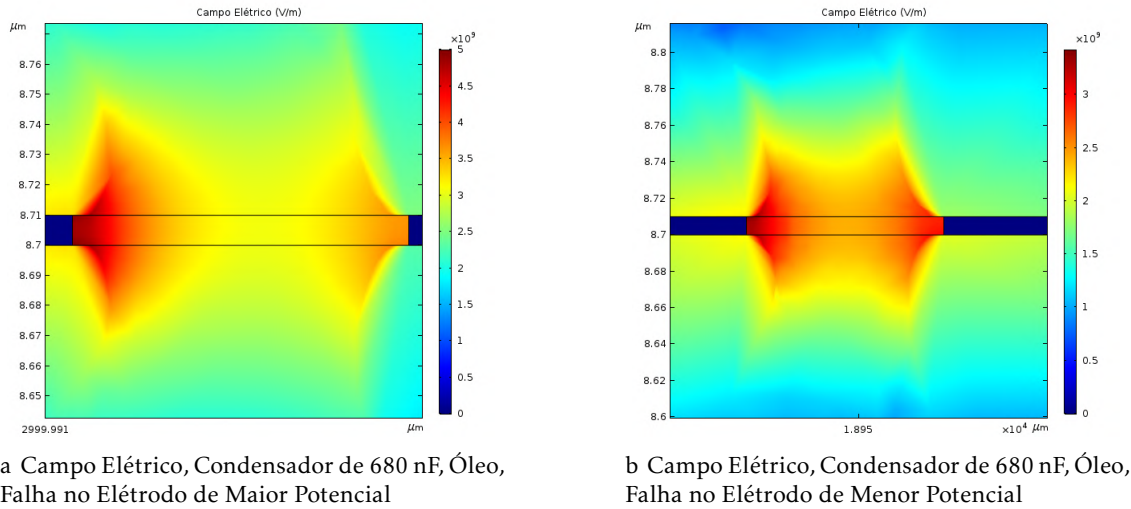


Figura 4.44: Campo Elétrico, Condensador de 680 nF, Óleo, Falhas nos Eléttrodos. Ampliações 10 e 11 da Figura 4.3

4.4 Medidas Alternativas Condensador de 470 nF

Neste capítulo irá modificar-se a espessura do polipropileno, mantendo a mesma capacidade do condensador e observar o que estas alterações influenciam no campo elétrico presente num condensador sem falhas.

Apenas irá ser observado o efeito do campo elétrico logo após a metalização (eléttrodo) de maior potencial para o polipropileno (dielétrico). Foi unicamente simulada a situação em que o condensador se encontra em óleo.

Para estas simulações a espessura do polipropileno foi alterado de 8,7 μm para 40 μm , caso em que se aumentou a espessura do dielétrico, e de 8,7 μm para 5 μm , caso em que se diminuiu a espessura do dielétrico mantendo a mesma medida de l_{util} .

Alterando a equação 4.4 foi retirada a A_{util} e por fim através da equação 4.3 foi retirado o comprimento que o filme necessita de ter. Todas estas especificações encontram-se na tabela 4.5.

Tabela 4.5: Medidas para uma Espessura Superior do Polipropileno

Espessura do polipropileno ((6) figura 4.5) (μm)	A_{util} (m^2)	Comprimento (m)
40	0,362	64,37
5	0,121	8,05

4.4.1 Polipropileno com Medidas Superiores às Originais

No caso do polipropileno ser mais espesso do que o do condensador analisado, o campo elétrico vai ser inferior. O resultado da simulação encontra-se na figura 4.45.

Observando a figura 4.45, verifica-se que o campo elétrico se alterou para $2,3 \times 10^7$ V/m (23 MV/m). Este valor é inferior ao do campo de ruptura no polipropileno, tal como se pode observar na tabela 4.2, sendo que não deverão existir descargas parciais nesta zona.

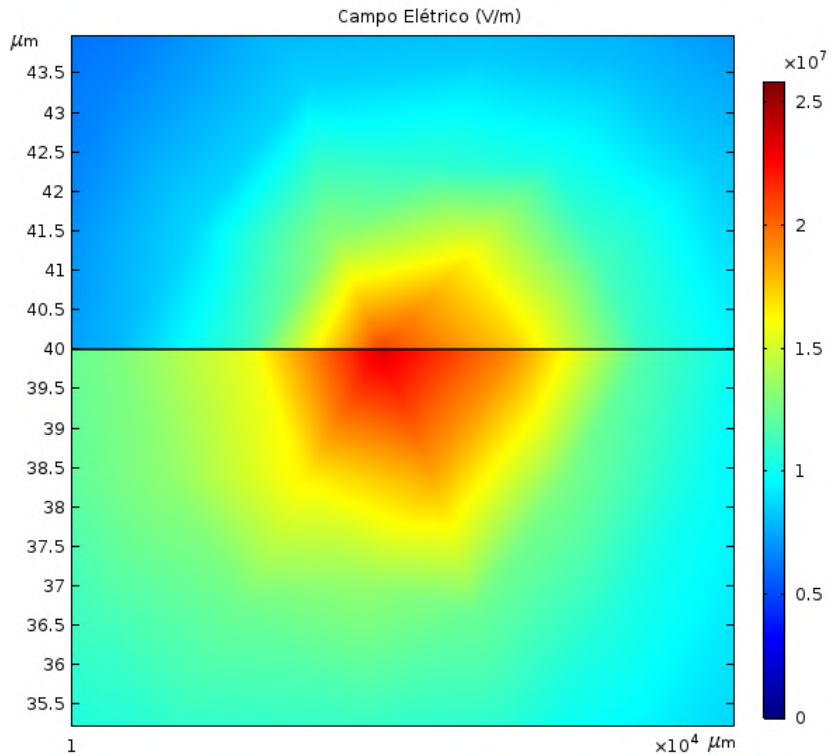


Figura 4.45: Campo Elétrico, Condensador com Medidas Superiores às Originais, Óleo, Sem Anomalias. Ampliação 2 da Figura 4.3

4.4.2 Polipropileno com Medidas Inferiores às Originais

No caso do polipropileno ser mais fino do que o do condensador analisado, o campo elétrico vai ser superior. O resultado da simulação encontra-se na figura 4.46.

Como se pode observar através da figura 4.46, o campo elétrico alterou-se para $8,1 \times 10^7$ V/m (81 MV/m). Este valor é bastante superior ao original de $6,5 \times 10^7$ V/m (65 MV/m), sendo que, o que se referiu no início do capítulo 4 está comprovado.

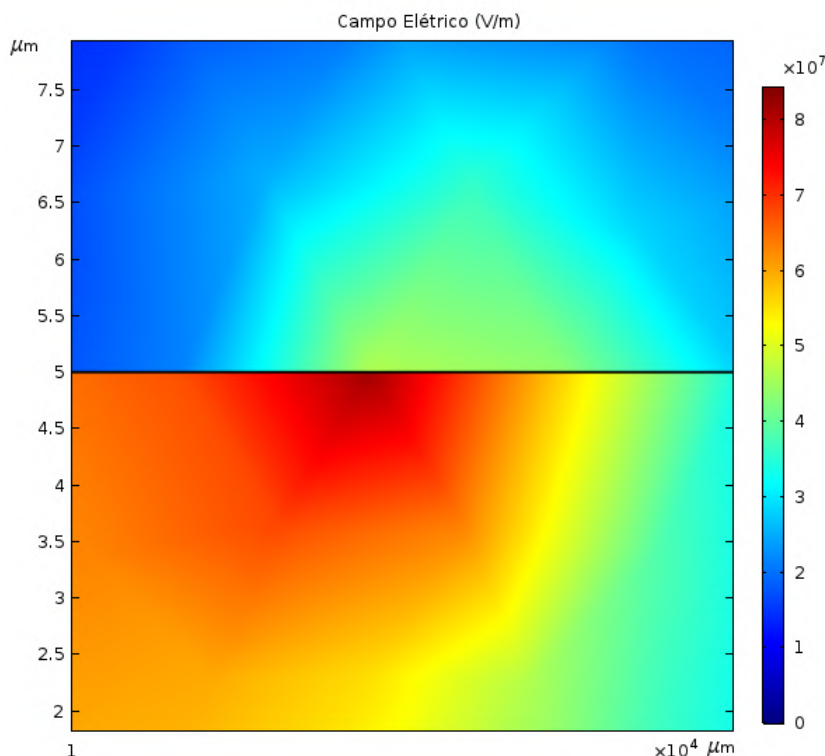


Figura 4.46: Campo Elétrico, Condensador com Medidas Inferiores às Originais, Óleo, Sem Anomalias. Ampliação 2 da Figura 4.3

4.5 Efeito da Solda no Condensador de 470nF

A simulação do efeito da solda entre dois condensadores pode ser observado nas figuras 4.47 e 4.48, potencial elétrico e campo elétrico respectivamente.

Para esta simulação foram tidos em conta os dois últimos condensadores da cadeia logo, o penúltimo condensador deverá ter um potencial mais elevado de 1225,6 V e o último deverá ter o potencial mais elevado a 612,8 V.

Analisando a figura 4.47, verifica-se que o dielétrico de maior potencial do penúltimo condensador se encontra a 1225,6 V e o dielétrico de potencial mais baixo se encontra a 612,8 V. O dielétrico de maior potencial do último condensador se encontra a 612,8 V e o dielétrico de potencial mais baixo se encontra a 0 V. Observa-se também que as placas inferiores do condensador se encontram a meio dos respectivos potenciais elétricos.

Observando o campo elétrico na solda nas figuras 4.48a e 4.48b, verifica-se que apesar do campo elétrico ser praticamente de 0 V/m, este existe, tendo o valor de $2,2 \times 10^{-8}$ V/m.

Analisando a tabela 4.6 conclui-se que em todos os condensadores existem descargas parciais. Conclui-se, também, que como estudado no capítulo 2.2 o condensador ao ser impregnado por óleo diminui bastante o campo elétrico em todos os pontos. Pode-se ainda ver que quanto mais grosso for o dielétrico menor vai ser a probabilidade de existência de descargas parciais para a mesma tensão.

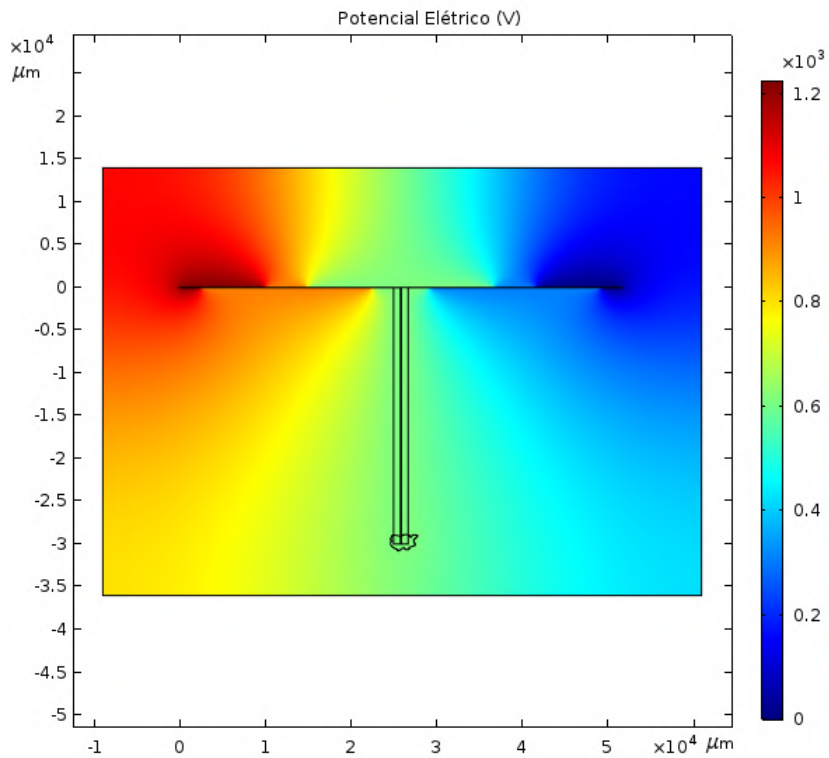
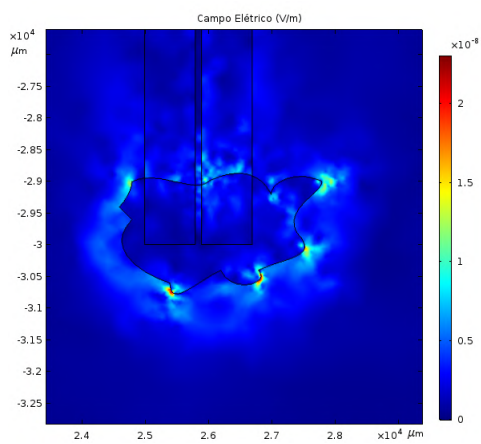
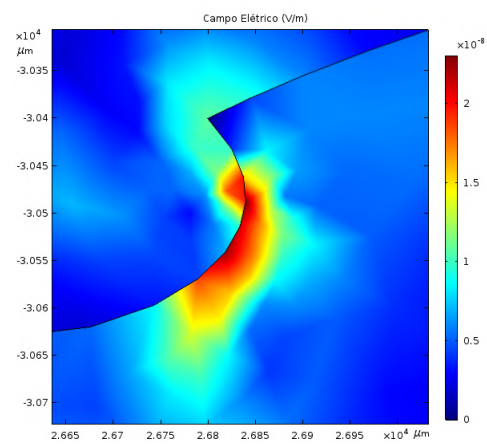


Figura 4.47: Potencial Elétrico, Efeitos da Solda no Condensador de 470 nF, Óleo, Sem Anomalias



a Campo Elétrico, Efeitos da Solda no Condensador de 470 nF, Óleo, Sem Anomalias



b Campo Elétrico, Efeitos da Solda no Condensador de 470 nF, Óleo, Sem Anomalias

Figura 4.48: Campo Elétrico, Efeitos da Solda no Condensador de 470 nF, Óleo, Sem Anomalias

Tabela 4.6: Comparação de Valores dos Diversos Campos Elétricos (MV/m)

Condensador (nF)		470		560		680		Medidas Superiores	Medidas Inferiores
Meio		ar	óleo	ar	óleo	ar	óleo	óleo	óleo
Anomalias	Sem anomalia	65	60	50	47	43	41	23	81
	Bolhas após a metalização	115000	2300	720	700	600	590	-	-
	Bolhas no dielétrico (Esquerda)	45	37	34	27	30	24	-	-
	Bolhas no dielétrico (Meio)	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	-	-
	Bolhas no dielétrico (Direita)	45	37	34	27	30	24	-	-
	Falha na metalização de baixo (Esquerda)	3900	3800	3200	3000	2700	2600	-	-
	Falha na metalização de baixo (Meio)	6000	5900	5200	5160	4200	4200	-	-
	Falha na metalização de baixo (Direita)	6000	5900	4800	4800	4200	4200	-	-
	Falha na metalização de cima (Maior Potencial)	6700	6400	6000	5900	4600	4500	-	-
	Falha na metalização de cima (Menor Potencial)	4800	4600	3700	3600	3100	3000	-	-

ESCOLHA, SIMULAÇÃO E ENSAIO DO CONDENSADOR ESCOLHIDO

Neste capítulo é feito um pequeno estudo financeiro de vários condensadores de baixa tensão existentes no mercado. Após a escolha do mesmo este é simulado num programa de elementos finitos e por fim é montado o condensador de alta tensão de 10 nF e ensaiado fisicamente na fábrica.

5.1 Escolha do Condensador

Após um estudo dos condensadores já utilizados, tratou-se de pesquisar um condensador que, possivelmente, seria adequado para a utilização da construção de um condensador de 10 nF. Uma vez que nesta etapa se tratou mais de um trabalho de consulta, foi feita uma pesquisa em diversos fornecedores de forma a encontrar condensadores que se adequassem ao fabrico de um condensador final de 10 nF.

O facto da Indisol ter um orçamento limitado para a construção do condensador de alta tensão dificultou bastante a procura de um condensador de baixa tensão adequado, uma vez que este tem não só de suportar uma tensão elevada, mas também de ter um preço reduzido. Por este motivo foi construída uma tabela em Excel semelhante à tabela 5.1.

Sendo que os fornecedores estão constantemente a atualizar os preços dos condensadores e a colocar novos condensadores no seu inventário, houve uma aposta em manter um contacto frequente com a Indisol, de modo a agilizar a escolha do condensador de baixa tensão.

Após vários contactos com a Indisol, chegou-se à conclusão de que o condensador nº13 da tabela 5.1 seria o mais indicado. A escassez de condensadores em armazém e o fator

CAPÍTULO 5. ESCOLHA, SIMULAÇÃO E ENSAIO DO CONDENSADOR ESCOLHIDO

tempo revelaram-se como entraves no que diz respeito à opção indicada anteriormente, pelo que, por força das circunstâncias, a escolha recaiu sobre o condensador nº16.

Tabela 5.1: Condensadores Pesquisados

Nº	Capacidade ¹ (nF)	Capacidade Final ² (nF)	Tensão Suportada (U _{AC})	Diferença entre Tensão suportada e Tensão aplicada (U _{AC})	Preço ³ (€/Un.)	Preço ⁴ (€)	Preço Quantidade ⁵ (€)
1	470	10	760	147,2	2,53	119,14	80,98
2	470	10	760	147,2	1,88	88,55	
3	470	10	600	-12,8	1,31	61,57	
4	470	10	700	87,2	2,31	108,52	
5	680	10	400	-23,5	2,34	159,12	64,26
6	1000	10	440	152	2,09	208,8	
7	680	10	480	56,5	2,44	165,72	
8	680	10	440	16,5	2,75	187,27	
9	1000	10	310	22	1,03	103,1	
10	1000	10	310	22	1,20	120,3	
11	470	10	760	147,2	1,89	88,55	
12	470	8,5	520	-3,6	2,11	116,05	39,10
13	470	10	760	147,2	4,84	227,48	58,28
14	680	10	440	16,5	1,06	72,08	
15	680	8,5	400	40	2,34	187,2	52,16
16	470	10	760	147,2	2,03	95,32	80,98

¹Capacidade de um condensador de baixa tensão.

²Capacidade do condensador final (série dos condensadores de baixa tensão).

³Preço de um condensador de baixa tensão.

⁴Preço total de um condensador (série dos condensadores de baixa tensão.)

⁵Preço total do condensador final de alta tensão com o desconto de quantidade aplicado a cada condensador de baixa tensão.

5.2 Simulação do Condensador num Programa de Elementos Finitos

Após a receção do condensador abriu-se um para se tirar as medidas, como se pode observar pela figura 5.1 e anexo III. Estas medidas encontram-se na tabela 5.2. Ao contrário dos condensadores antigos que simulavam a união de dois condensadores em série, como se pode observar na figura 2.5, este condensador simula a união de três condensadores em série, o que à primeira vista indicava logo que aguentaria uma tensão muito superior.

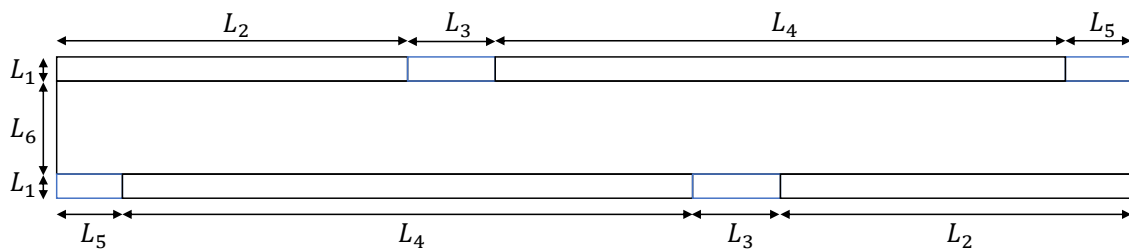


Figura 5.1: Medidas do Condensador Utilizado

L_1 - Espessura do eletrodo;

L_2 - Medida do eletrodo (metalização);

L_3 - Espaço entre eletrodos, neste caso preenchido por polipropileno como explicado no capítulo 4;

L_4 - Medida do eletrodo (metalização);

L_5 - Polipropileno proveniente da camada de cima como explicado no capítulo 4;

L_6 - Espessura do polipropileno (dielétrico).

Tabela 5.2: Medidas do Condensador Utilizado

Número	L_1 (nm)	L_2 (mm)	L_3 (mm)	L_4 (mm)	L_5 (mm)	L_6 (μ m)
Comprimento	10	8	2	13	1,5	23,19

Neste caso a equação 4.2 foi substituída pela 5.1. Isto deveu-se ao facto do condensador simular três condensadores em série, como foi dito anteriormente.

$$l_{\text{util}} = (L_2 - L_5) \times 2 + (L_4 + L_5 - L_2 - L_3) \quad (5.1)$$

Após se terem retirado todas as medidas possíveis do condensador e calculado as restantes, este foi desenhado num programa de elementos finitos e simulado, obtendo-se o seu potencial elétrico, como se pode observar pela figura 5.2 e o seu campo elétrico, tal como se pode observar na figura 5.3.

Analisando a figura 5.2 verifica-se que a tensão em todas as placas é a esperada.

Observando-se a figura 5.3, concluiu-se que o valor do campo elétrico mais elevado neste condensador é no extremo esquerdo da placa superior direita, como se pode observar na figura 5.3b. O valor do campo elétrico neste ponto ($2,7 \times 10^7$ V/m) está muito próximo do campo de disrupção no polipropileno ultrapassando-a por muito pouco. Por outro lado, o campo elétrico entre as placas, tal como se pode observar na figura 5.3a, tem um valor de $1,1 \times 10^7$ V/m. Este valor é bastante inferior ao do campo de disrupção no polipropileno.

As medições feitas a este condensador demonstram que o mesmo suporta uma tensão de 750 V até começarem a existir descargas parciais, tensão não muito inferior à da indicada na *datasheet* (760 V), anexo I.

Numa outra medição observou-se que os condensadores não são de 470 nF como era indicado na *datasheet*, anexo I, mas sim de 407 nF.

Perante esta nova capacidade foi-se calcular de novo a distância entre placas do condensador, chegando-se à conclusão de que esta distância se altera para $26,8 \mu\text{m}$. Esta distância altera com a capacidade pois não é possível medir-se algo tão fino logo, calcula-se como foi feito no capítulo 4. Simulando de novo num programa de elementos finitos observa-se que os valores do campo elétrico baixaram, como se pode observar através da figura 5.4. O campo elétrico entre as placas alterou-se para $0,95 \times 10^7$ V/m, como se pode observar na figura 5.4a, e o campo elétrico no extremo da metalização alterou-se para $2,4 \times 10^7$ V/m, tal como se pode observar na figura 5.4b.

Como neste caso se está a simular um condensador de aproximadamente 470 nF, cada condensador de baixa tensão vai estar sujeito a uma tensão de aproximadamente 612 V. Esta tensão é muito inferior à do início das descargas parciais deste condensador (750 V) e os valores do campo elétrico já estão muito próximos do campo de disrupção do polipropileno logo, apenas se pode concluir que as simulações feitas têm alguma discrepância com a realidade.

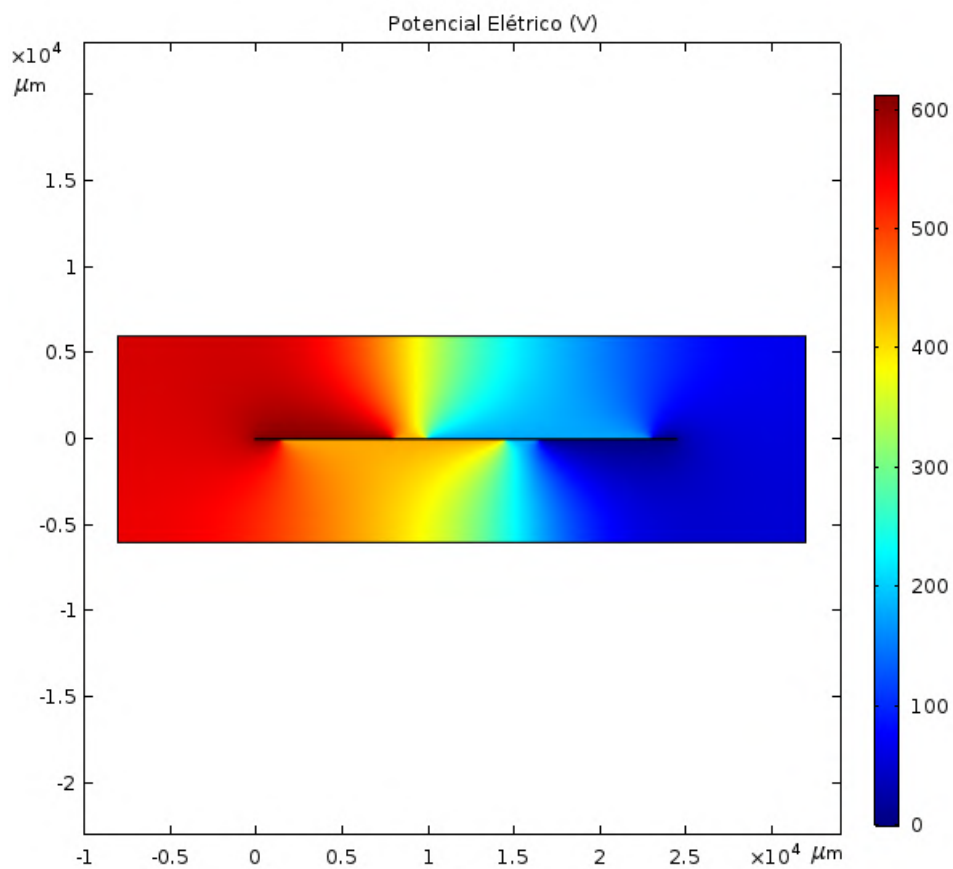
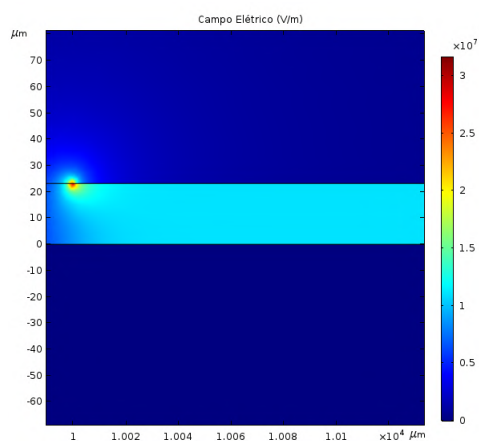
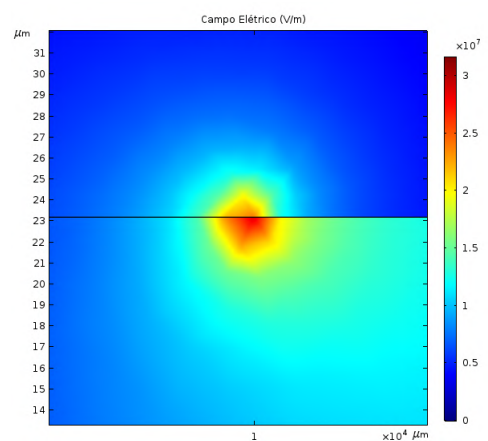


Figura 5.2: Potencial Elétrico do Condensador Utilizado



a Campo Elétrico entre as Placas do Condensador Utilizado



b Campo Elétrico do Condensador Utilizado no Ponto de Maior Campo

Figura 5.3: Campo Elétrico do Condensador Utilizado

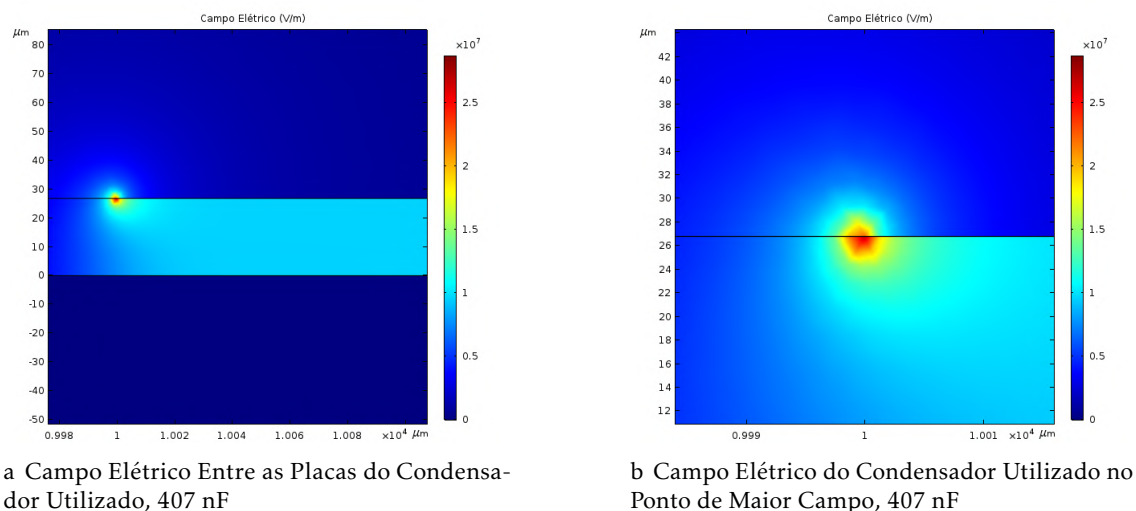


Figura 5.4: Campo Elétrico do Condensador Utilizado, 407 nF

5.3 Ensaio do Condensador de 10 nF

Após se constatar que o condensador escolhido tinha grandes possibilidades de ter resultados positivos, tratou-se de construir a peça final, anexo V. Ao se verificar que a peça com 9,76 nF passava nos ensaios, decidiu-se testar outra solução. As suas capacidades, número total de condensadores utilizados e tensão a que cada condensador será sujeito encontram-se na tabela 5.3.

A decisão de se testar uma peça com menos condensadores em série foi majoritariamente para reduzir os custos de produção.

Tabela 5.3: Possibilidades do Condensador Final

Capacidade final (nF)	Número de condensadores	Tensão aplicada a cada condensador (V)
9,76	42	685,71
10,23	40	720

5.3.1 Condensador de 9,76 nF

Após se colocar o condensador no circuito de ensaio, anexo IV, começou por se calibrar a máquina. Visto este ser o primeiro ensaio efetuado ao condensador, optou-se não só por se observar as tensões de ensaio, mas também de se fazer um mapeamento de várias tensões e respectivas descargas parciais. Estas tensões e descargas parciais foram mapeadas tanto no aumento da tensão, como se pode observar na tabela 5.5, como na sua diminuição, tal como se pode observar na tabela 5.4.

É de referir que existe um *offset* na máquina, sendo que para um valor de 5 pC não será considerada a existência de descargas parciais.

CAPÍTULO 5. ESCOLHA, SIMULAÇÃO E ENSAIO DO CONDENSADOR ESCOLHIDO

Apesar do que foi referido anteriormente, apenas as imagens correspondentes às tensões de ensaio serão colocadas nesta secção, as restantes poderão ser consultadas no anexo II.

Tanto a tabela 5.5, como a tabela 5.4, foram construídas com base nas figuras 5.5, 5.6 e 5.7 e nas restantes colocadas no anexo II.

Tabela 5.4: Tensões de Descida e Respetivas Descargas Parciais

Tensão (kV)	36	32	30	28,8	16,6
Descarga parcial (pC)	121	79	44	16	5

Tabela 5.5: Tensões de Subida e Respetivas Descargas Parciais

Tensão (kV)	5	24,8	26,8	36	50
Descarga parcial (pC)	6	8,2	13,9	118	236

Nas imagens 5.5, 5.6 e 5.7 pode-se observar as descargas parciais ou a ausência delas. A linha a verde fina é a tensão a que a peça está sujeita, a mancha com várias cores é onde se pode observar as descargas parciais.

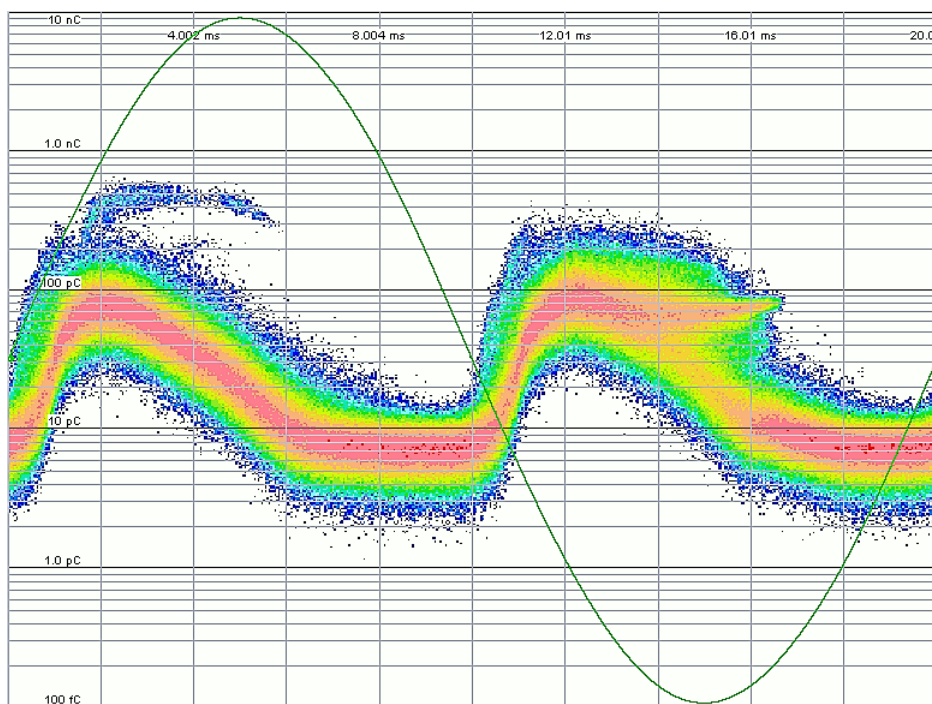


Figura 5.5: Descargas Parciais à Tensão de 50 kV, Peça de 9,76 nF

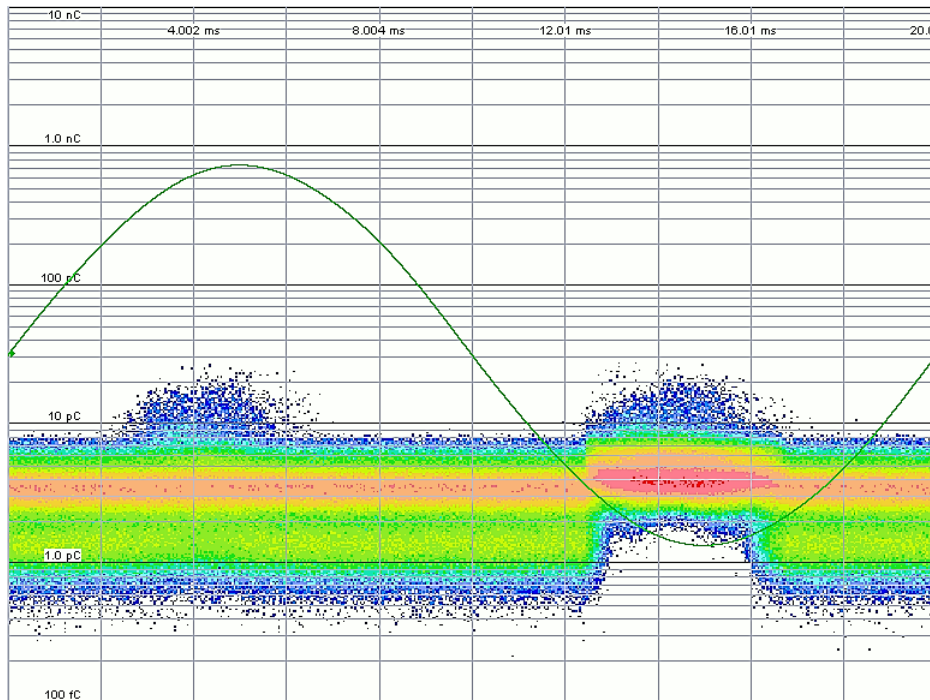


Figura 5.6: Descargas Parciais à Tensão de 28,8 kV, Peça de 9,76 nF

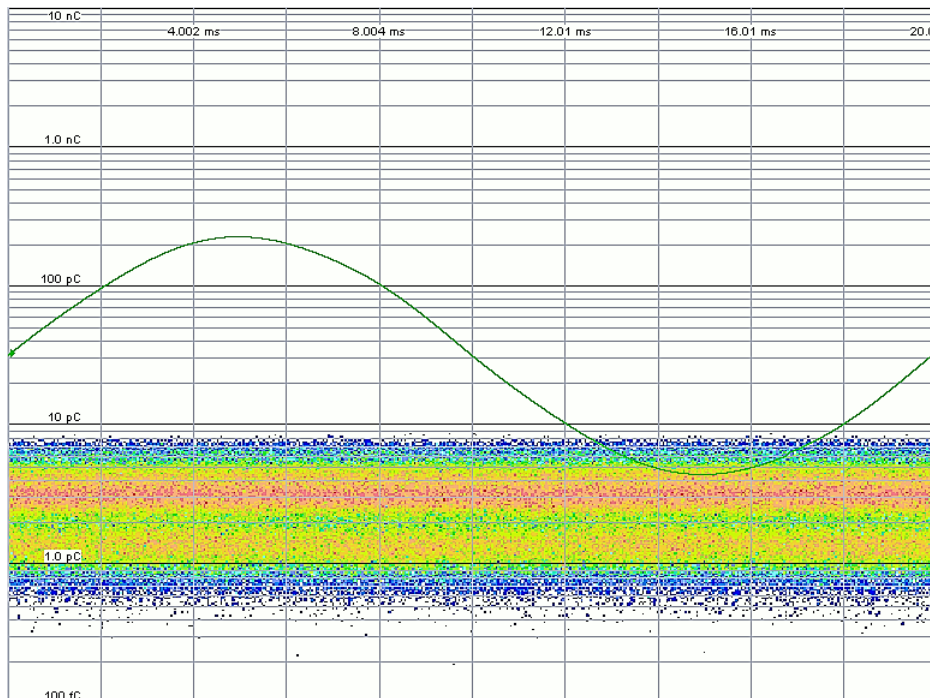


Figura 5.7: Descargas Parciais à Tensão de 16,6 kV, Peça de 9,76 nF

5.3.2 Condensador de 10,23 nF

Concluindo-se que o condensador de 9,76 nF estava dentro dos critérios, procedeu-se à redução do número de condensadores e consequente aumento da capacidade do condensador final para os 10,23 nF, para tal foram retirados dois condensadores da série.

Esta decisão apesar de não influenciar muito o preço de uma única peça (condensador de alta tensão), visto que cada condensador de baixa tensão custa apenas 1,72 €, a uma escala industrial pode-se poupar bastante dinheiro com a produção deste condensador de alta tensão.

Sendo que já se tinha observado a qualidade do condensador de 9,76 nF para várias tensões, optou-se por apenas se verificar se este novo condensador cumpria com os requisitos propostos e não se voltar a fazer o mapeamento para várias tensões.

Começou-se por aumentar a tensão até aos 50 kV e por se observar que o condensador não sofreu qualquer rotura física. Após isto iniciou-se a descida da tensão até aos 28,8 kV. Ao se estabilizar esta última tensão, verificou-se que as descargas parciais eram inferiores a 50 pC, 43 pC neste caso, como se pode observar na figura 5.8. Este valor apesar de estar dentro dos limites estabelecidos era bastante superior ao do condensador de 9,76 nF.

Com a contínua descida de tensão, observou-se que por volta dos 22 kV as descargas parciais desceram para os 4,5 pC, valor a que se considera a extinção das mesmas, tal como se pode observar na figura 5.9. Sendo que a esta tensão as descargas parciais já estão extintas, conclui-se que à tensão de 16,6 kV estas continuariam extintas e o condensador passa nos critérios pretendidos.

Conclui-se ainda que, apesar do condensador de 10,23 nF passar nos critérios à tensão de 28,8 kV, as descargas parciais estão muito próximas dos 50 pC, sendo que este é o limite mínimo possível de condensadores utilizados em série e, por conseguinte, a máxima capacidade obtida. Se se retirasse mais um condensador de baixa tensão da série de condensadores, possivelmente o condensador de alta tensão já não iria passar nos requisitos do cliente.

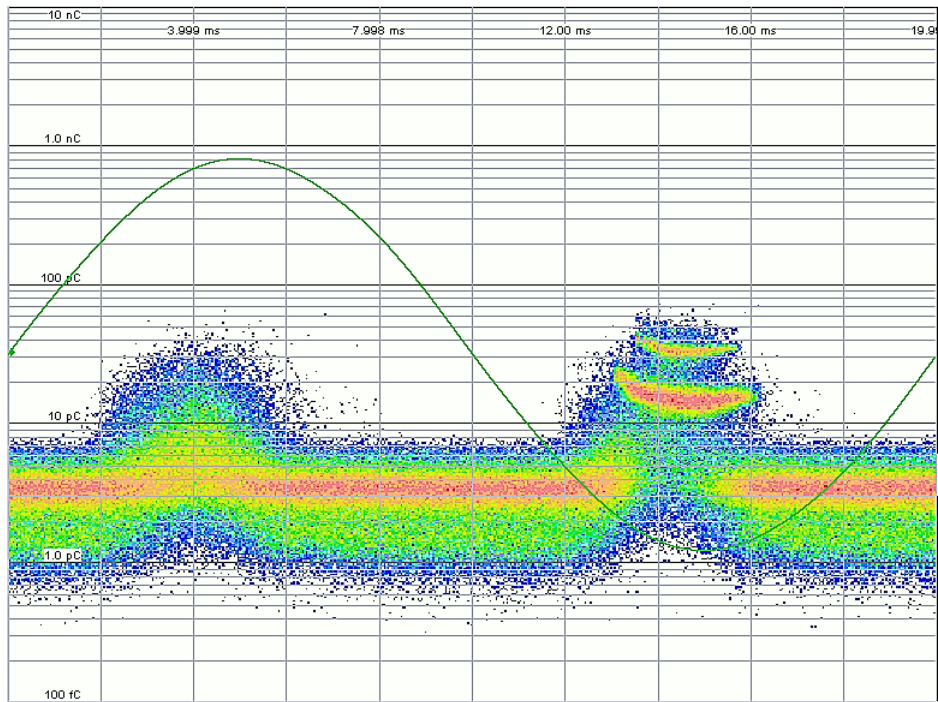


Figura 5.8: Descargas Parciais à Tensão de 28,8 kV, Peça de 10,23 nF

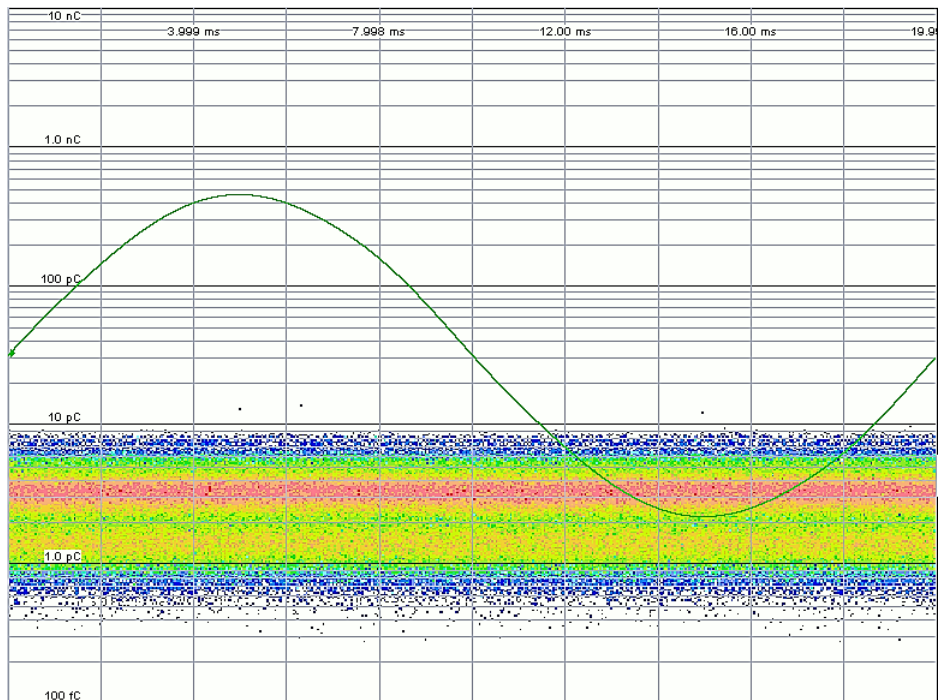


Figura 5.9: Descargas Parciais à Tensão de 22 kV, Peça de 10,23 nF

CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO

6.1 Conclusão

Com as simulações feitas no programa de elementos finitos, concluiu-se que qualquer um dos condensadores encomendados pela Indisol sofre de descargas parciais para as tensões a que vai ser sujeito, apesar das simulações no programa de elementos finitos não serem muito precisas pelo facto de serem um corte do condensador em 2D.

Caso o condensador não tenha anomalias o ponto mais crítico de campo elétrico é no extremo interior da placa de maior potencial. Caso existam anomalias no condensador de baixa tensão, a anomalia mais problemática (com exceção do condensador de 470 nF encomendado pela fábrica anteriormente) é quando existe uma falha na placa de maior potencial. Observou-se ainda, como era de esperar, que caso o condensador esteja impregnado em óleo o campo elétrico vai diminuir.

Devido ao projeto ser em parceria com uma fábrica esteve sempre muito presente o limite de preço que cada condensador de baixa tensão podia ter, bem como o condensador final de alta tensão. Depois de um contacto mais direto com o fornecedor conseguiu-se encomendar cada condensador de baixa tensão a 0,96 €, este preço deve-se à encomenda ser de quantidades industriais, reduzindo bastante o custo de produção do condensador de alta tensão e aumentando bastante o lucro por condensador.

Tal como estudado no capítulo 2, concluiu-se que um condensador que simula três em série suporta melhor a tensão do que um que apenas simula dois em série e, neste caso, o ponto mais crítico de campo elétrico é na placa superior direita, placa flutuante.

Ao fazer-se uma comparação entre os três condensadores, como se pode observar na tabela 6.1, concluiu-se não só que o condensador do cliente não suporta corretamente as tensões a que vai ser sujeito mas também que o condensador de 10,23 nF está no limiar dos valores aceites. Sendo que este é mais barato de produzir e para uma fábrica o custo

de produção é um fator importante, o condensador de 10,23 nF é o condensador final.

Tabela 6.1: Comparação dos Três Condensadores

Tensões (kV)	32			28,8			16,6		
Condensadores (nF)	9,76	10,23	8,5	9,76	10,23	8,5	9,76	10,23	8,5
Descargas parciais (pC)	79	n.a	329	16	44	256	5	n.a	2,6

6.2 Trabalho Futuro

De modo a complementar este trabalho penso que existem alguns pontos que poderiam ser abordados:

- Adicionar uma parte de baixa tensão ao condensador, chamada circuito de referência. Este circuito funciona como divisor de tensão e serve para medir a tensão, amplitude e fase;
- Estudar a disposição dos condensadores de baixa tensão para verificar se tem algum efeito no condensador final;

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. J. Kaiser. *The Capacitor Handbook*. Ed. por V. N. REINHOLD. 1993.
- [2] KEMET. *EMI Capacitors on the AC Line*. Visitado em 19/01/2018. 2007. URL: <http://www.kemet.com/Lists/Filestore/EvoxRifaRFIandSMD.pdf>.
- [3] J. Rhan. *Not All Caps Are Created Equal*. Visitado em 19/01/2018. 2015. URL: https://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/not_all_capacitors_are_created_equal.pdf.
- [4] TDK. *Film Capacitors. General technical information*. Visitado em 24/01/2018. 2015. URL: <https://en.tdk.eu/download/530754/bb7f3c742f09af6f8ef473fd34f6000e/pdf-generaltechnicalinformation.pdf>.
- [5] R. A. Samoden. "METHODS FOR ELIMINATING AC CORONA IN POLYMERIC FILM CAPACITORS". Em: *Annual Report 1962 Conference on Electrical Insulation* (1962). Visitado em 25/01/2018. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7466685/>.
- [6] Illinois Capacitor. *EMI/RFI Suppression Capacitors*. Visitado em 21/06/2018. URL: https://www.illinoiscapacitor.com/pdf/Papers/EMI_RFI_suppression_capacitors.pdf.
- [7] M. I. Committees e N. E.W. E. Standard. "information on international standards". Em: (2008), pp. 146–148.
- [8] M. G. Danikas. "The Definitions Used for Partial Discharge Phenomena". Em: *IEEE Transactions on Electrical Insulation* 28 (1993), pp. 1075–1081.
- [9] P. M. S. Dias. "Isolador de travessia para Alta Tensão : melhoria do seu projecto usando um programa de elementos finitos". Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2012.
- [10] G. Lupò. "Modellistica elettromagnetica dei Materiali". Em: (2009).
- [11] J. Kuffel, E. Kuffel e W. Zaengl. *High Voltage Engineering*. Ed. por Newnes. Vol. 15. 1995.
- [12] D. J. Holtzhausen e D. W. Vosloo. *High Voltage Engineering Theory and Practice*. Ed. por U. of Stellenbosch. 2008.
- [13] S. Ray. *An Introduction to High Voltage Engineering*. Ed. por P. Learning. 2011.

- [14] M. Abdel-salam. *High Voltage Engineering Theory and Practice*. Ed. por Marcel Dekker. Second Edi. 2000.
- [15] W. M. H. Cuenca. “Caracterização Dos Sinais De Descargas Parciais Em Equipamentos De Alta Tensão A Partir De Modelos Experimentais”. Tese de doutoramento. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
- [16] S. Karmakar, N. K. Roy e P. Kumbhakar. “Detection of partial discharges in a high voltage equipment”. Em: (2006).
- [17] H Illias, Y. Teo Soon, A. A. Bakar, H Mokhlis, G Chen e P. L. Lewin. “Partial discharge patterns in high voltage insulation”. Em: *Power and Energy (PECon), 2012 IEEE International Conference on* (2012). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/ielx5/6423700/6450178/06450316.pdf?tp=&arnumber=6450316&isnumber=6450178>.
- [18] M. F. Dehkordi. “Dielectric behavior of transformer oil when contaminated and / or fortified with nanoparticles”. UNIVERSITE DU QUEBEC, 2014.
- [19] Y. Kawaguchi, H. Murata e M. Ikeda. “Breakdown of transformer oil”. Em: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* (1990), pp. 9–23.

ANEXO



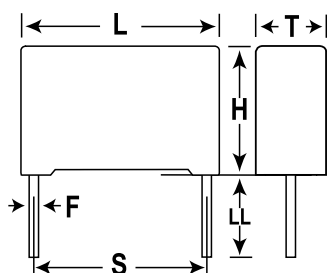
Datasheet DO CONDENSADOR UTILIZADO

ANEXO I. DATASHEET DO CONDENSADOR UTILIZADO

KEMET Part Number: PHE845VZ6470MR30L2



Capacitor, film, 0.47 uF, +/-20% Tol, -40/+105C, Safety: X1, 760 VAC, Lead Spacing=27.5 mm, Not for new design.



Dimensions (mm)		
Symbol	Dimension	Tolerance
L	31.50	MAX
H	30.00	MAX
T	21.00	MAX
S	27.50	+/-0.4
LL	30.00	+0/-1
F	0.80	NOM

Packaging Specifications	
Package Kind:	Pizza
Package Type:	Tray
Package Quantity:	108

General Information	
Supplier:	KEMET
Dielectric:	Metallized Polypropylene
Application:	Safety: X1
Style:	Radial Box
Approvals:	ENEC,UL,cUL
RoHS:	Yes

Specifications	
Capacitance:	0.47 uF
Voltage:	1500 VDC
Tolerance:	+/-20%
Voltage AC:	760 VAC
Rated Temperature:	105C
Temperature Range:	-40/+105C
Dissipation Factor @ 1 kHz:	0.1%
Dissipation Factor @ 10 kHz:	0.4%
Insulation Resistance:	21.28 GOhm
Maximum dVdT:	100 v/us
Miscellaneous Electrical:	Not for new design.

Statements of suitability for certain applications are based on our knowledge of typical operating conditions for such applications, but are not intended to constitute - and we specifically disclaim - any warranty concerning suitability for a specific customer application or use. This information is intended for use only by customers who have the requisite experience and capability to determine the correct products for their application. Any technical advice inferred from this information or otherwise provided by us with reference to the use of our products is given gratis, and we assume no obligation or liability for the advice given or results obtained.



© 2006-2014 IntelliData.net

Generated 12/29/2014 - 156beb47-100c-49bd-bcd7-5e7ccdd1bb03

TENSÕES DE ENSAIO E RESPECTIVAS DESCARGAS PARCIAIS

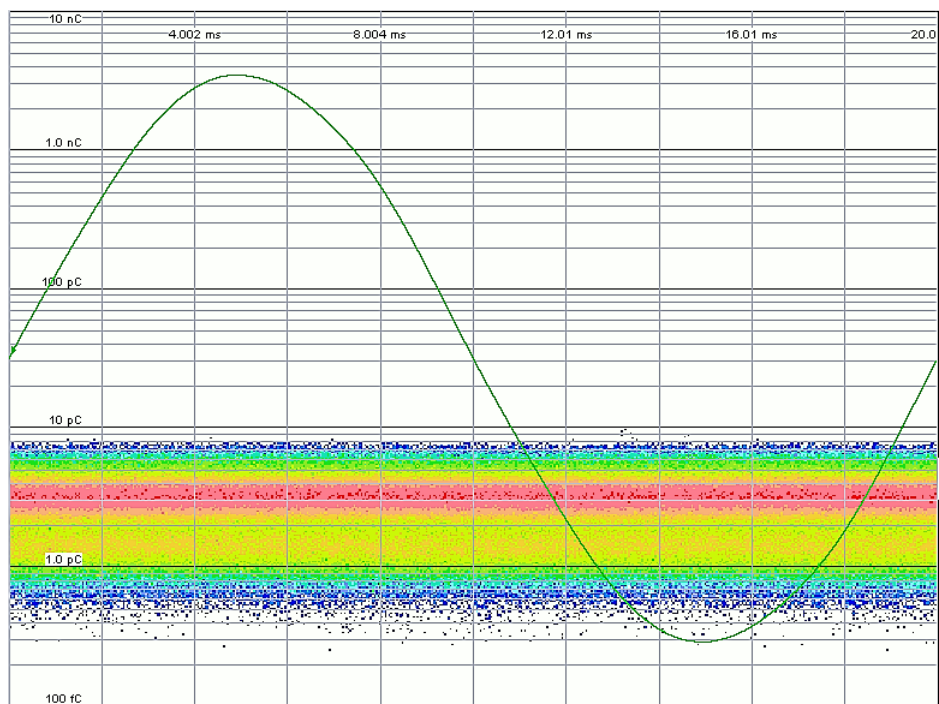


Figura II.1: Descargas Parciais à Tensão de 5 kV na Subida de Tensão, 6,1 pC

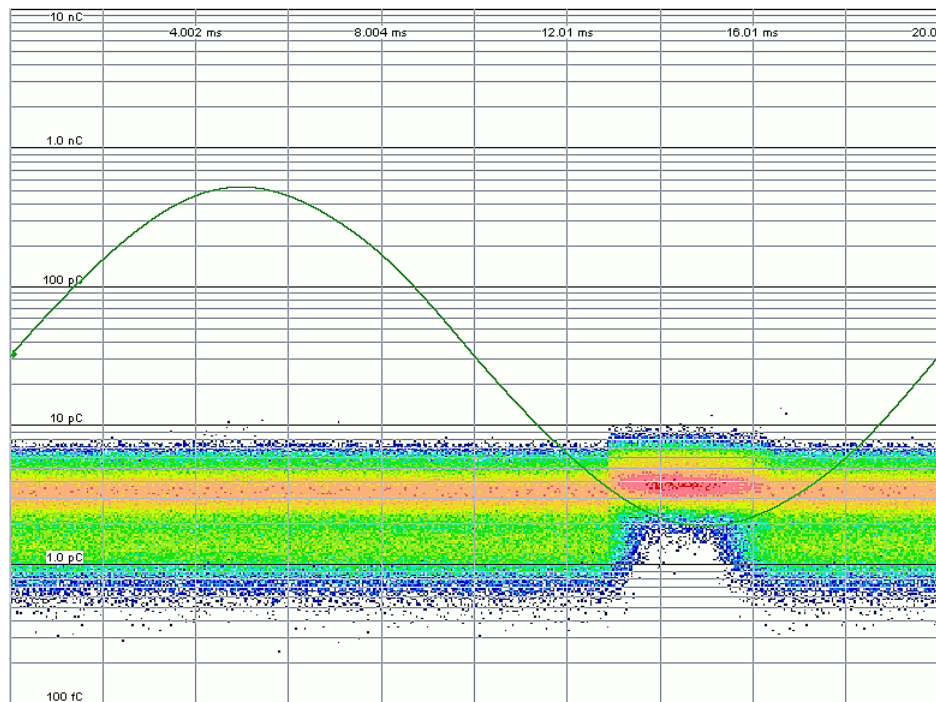


Figura II.2: Descargas Parciais à Tensão de 24,8 kV na Subida de Tensão, 8,3 pC

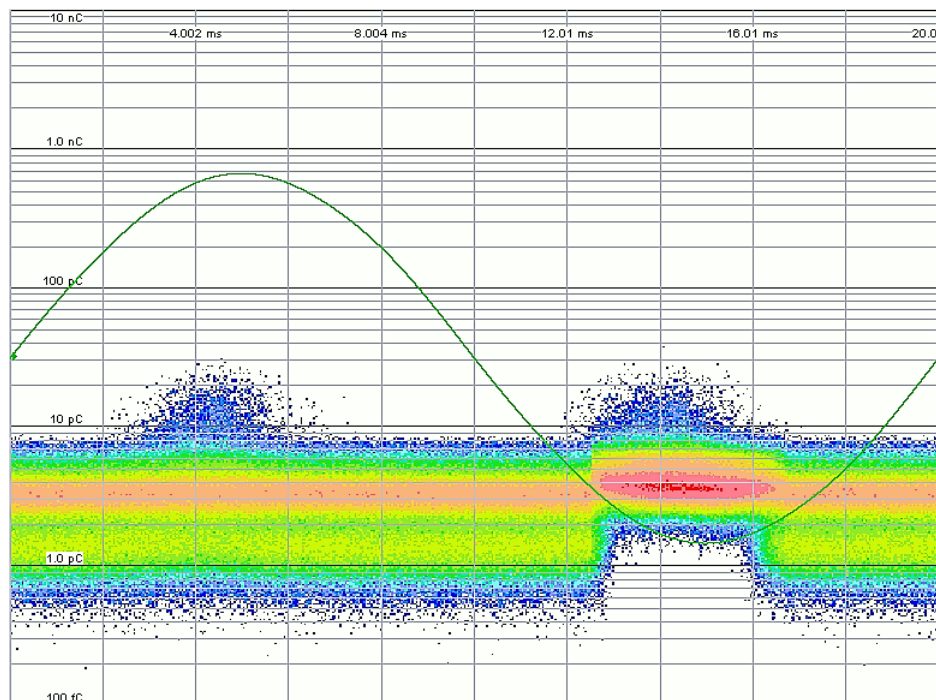


Figura II.3: Descargas Parciais à Tensão de 26,8 kV na Subida de Tensão, 13,9 pC

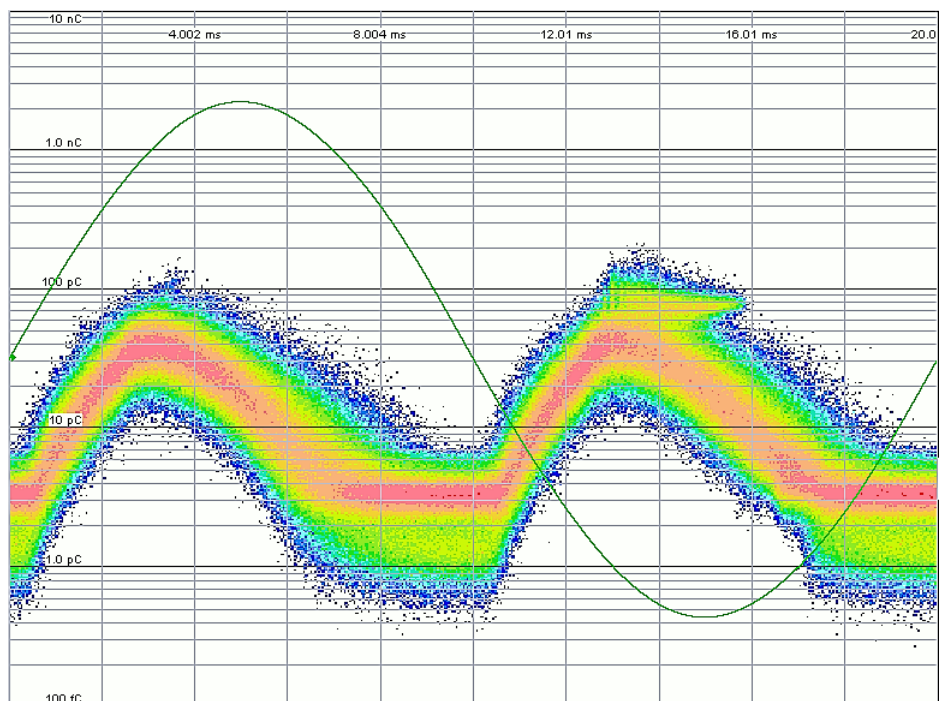


Figura II.4: Descargas Parciais à Tensão de 36 kV na Subida de Tensão, 118 pC

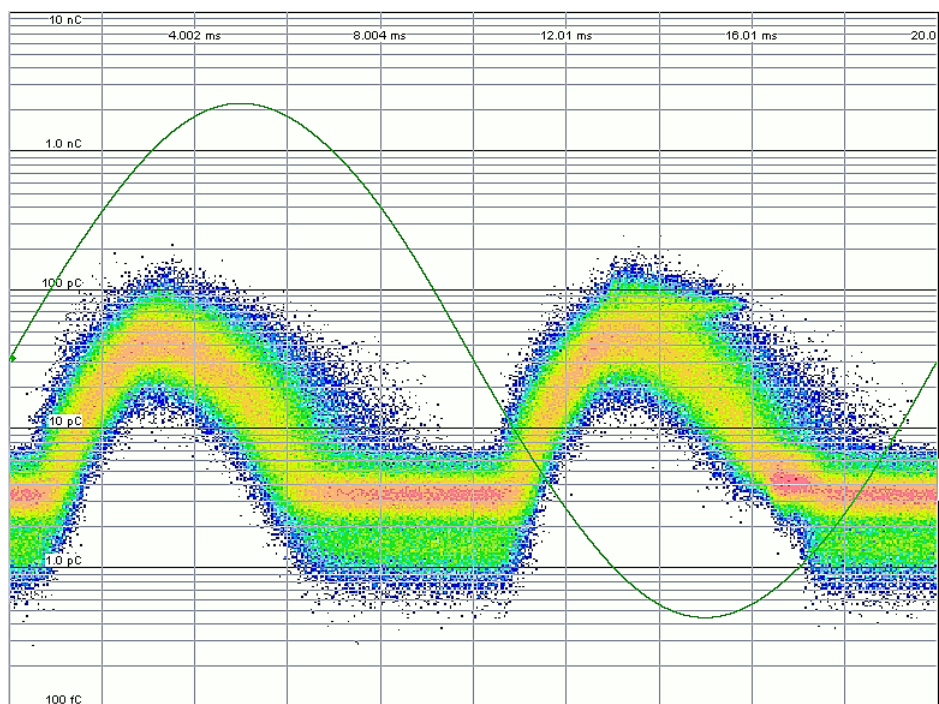


Figura II.5: Descargas Parciais à Tensão de 36 kV na Descida de Tensão, 122 pC

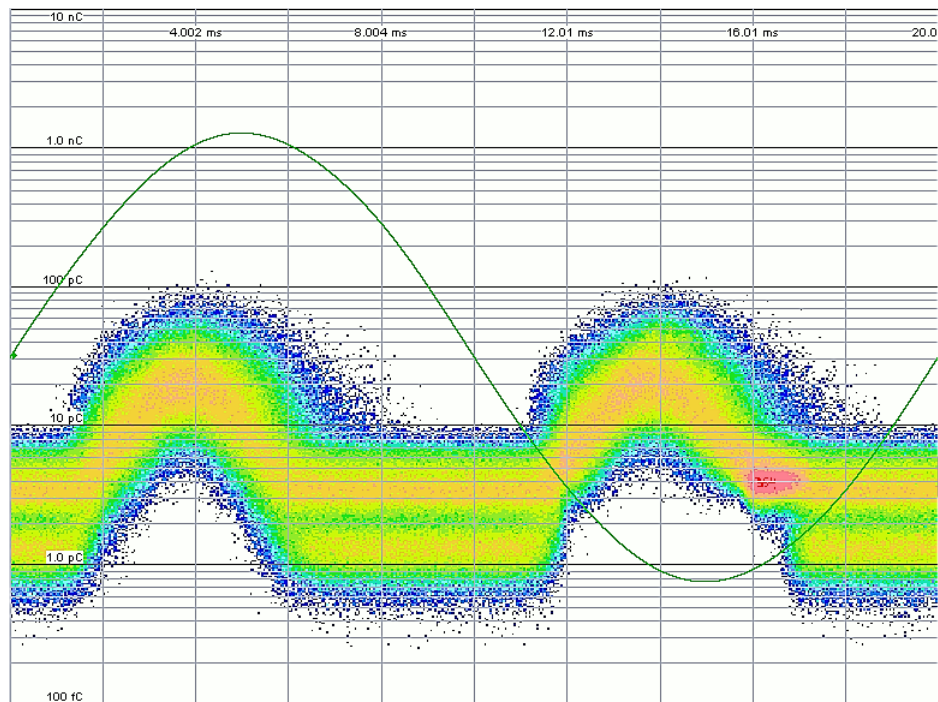


Figura II.6: Descargas Parciais à Tensão de 32 kV na Descida de Tensão, 78,8 pC

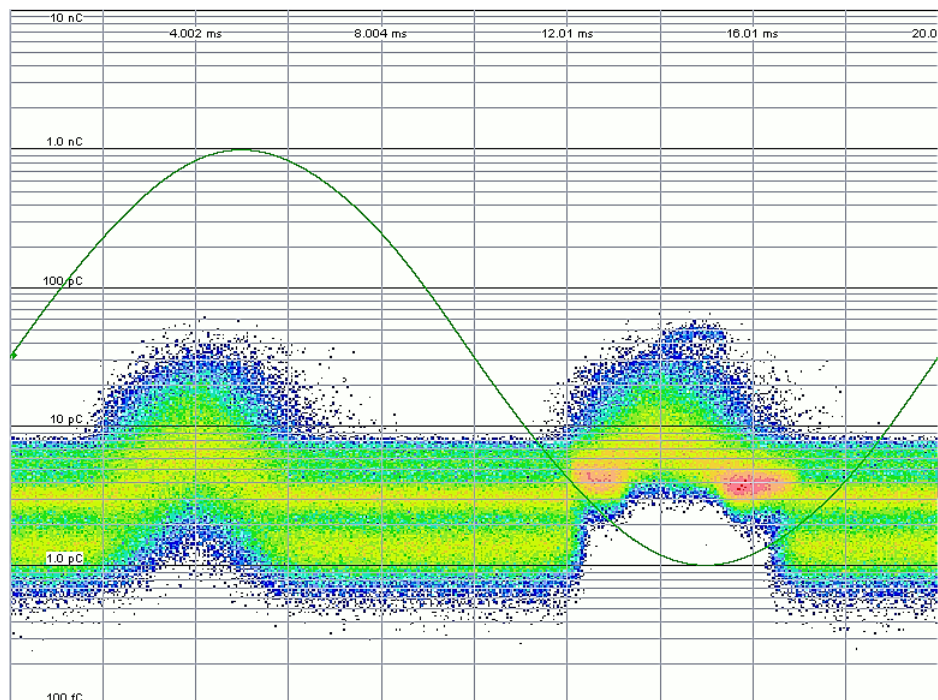
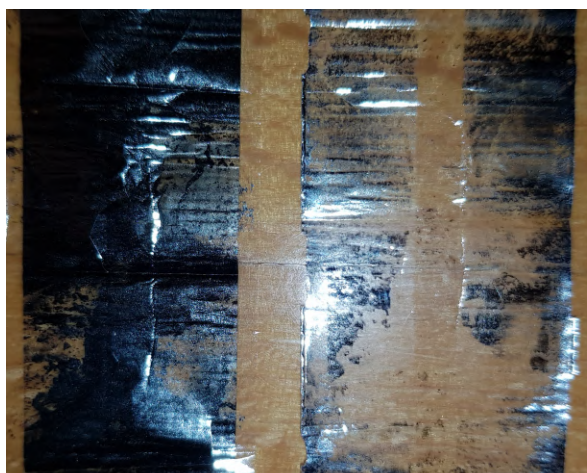


Figura II.7: Descargas Parciais à Tensão de 30 kV na Descida de Tensão, 43,6 pC

CONDENSADORES ABERTOS

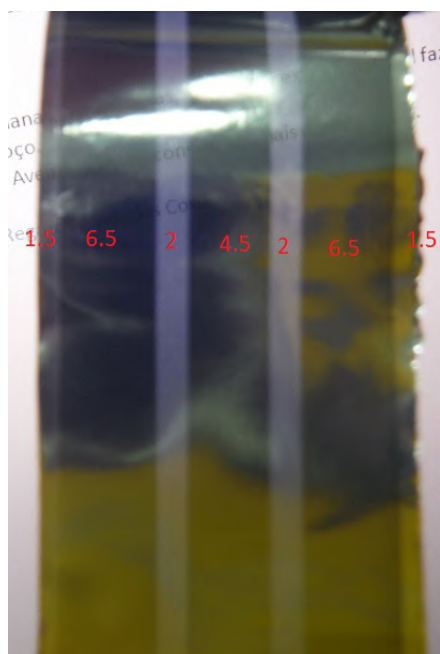


a Condensador de 470 nF Utilizado Anteriormente com o Filme Colado



b Condensador de 470 nF Utilizado Anteriormente com o Filme Separado

Figura III.1: Condensador de 470 nF Utilizado Anteriormente



a Condensador de 470 nF Utilizado com o Filme Colado



b Condensador de 470 nF Utilizado com o Filme Separado

Figura III.2: Condensador de 470 nF Utilizado

CIRCUITO DE ENSAIO



a Transformador, Resistência e Condensador



b Peça no Circuito de Ensaio



c Torre de Comunicação Entre o Computador e o Equipamento

Figura IV.1: Circuito de Ensaio

A N E X O



PEÇA FINAL



Figura V.1: Peça Final em Ar



a Tubo de Suporte (320 mm × 130 mm)



b Peça Dentro do Tubo em Silicone

Figura V.2: Peça Final em Silicone