



**João Miguel Gomes Batista**

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de  
Computadores

**Melhoria do projeto e fabricação de  
dispositivos condutivos ou isolantes de AT**

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

Orientador: Mário Fernando da Silva Ventim Neves,  
Professor Auxiliar FCT-UNL

Coorientador: David José da Rocha Domingues,  
Professor ISEC



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro 2018**



## **Melhoria do projeto e fabricação de dispositivos condutivos ou isolantes de AT**

Copyright ©2018 João Miguel Gomes Batista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem 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.



# Agradecimentos

Esta dissertação de mestrado caracterizou-se pelo trabalho e persistência, no entanto houve o contributo de várias pessoas na sua execução, que direta ou indiretamente relacionadas com este projeto, tiveram (e têm) especial significado para mim, pelo que lhes expresse particulares agradecimentos.

Em primeiro lugar agradeço profundamente ao meu orientador, professor Mário Ventim Neves, que me concedeu a oportunidade de participar num projeto de implementação industrial e pelo apoio técnico e moral que me deu.

Um obrigado ao meu coorientador professor David Domingues, que sempre foi muito prestável durante o projeto.

Esta tese foi facilitada pela empresa Indisol, à qual fico bastante agradecido, pois foi a unidade de fabrico e de ensaios dos modelos de isoladores, pontos prioritários nesta dissertação.

Ao engenheiro Luís Gomes, da empresa Indisol, fico muito agradecido, pois sempre se disponibilizou incondicionalmente a fornecer todas as informações necessárias à dissertação.

Uma grande palavra de apreço e agradecimento para a Catarina Brites, Henrique Serra e Rodrigo Braga, de Engenharia Mecânica, que me auxiliaram e deram bases dos seus cursos.

Agradeço a todas as pessoas que durante estes cinco anos contribuíram para a minha formação e deixo um sentido obrigado aos meus Amigos, pelas experiências e pelo apoio que me deram.

Um Grande Obrigado aos meus pais, que são um Exemplo para mim e a quem ficarei eternamente grato, pois deram-me todas as condições, com muito sacrifício, para alcançar o sonho de ser engenheiro Eletrotécnico.

Ao meu irmão Rafael pela sua imensa paciência, cumplicidade, amizade mútua e por me ter ajudado nas alturas mais difíceis deste último ano. Um especial obrigado!

Obrigado por olhares sempre por mim Avô\*

A ti te dedico o concretizar deste objetivo!



# Resumo

Nos postos de subestação é possível aumentar ou diminuir algumas grandezas elétricas, como a corrente ou tensão. Nestes locais essa operação é assegurada por transformadores e por forma a garantir a passagem de alta tensão para o seu interior, são utilizados isoladores de travessia. Apesar destes zelarem pela integridade dos materiais em contacto e passagem de tensão entre paredes, neste ambiente é comum originarem-se defeitos devido a descargas parciais. A reprodução mais comum das descargas parciais acontece quando o campo elétrico, no interior da peça, é superior ao campo de disrupção do material. Para evitar estes problemas, é necessário desenvolver métodos para os detetar.

Conforme o isolador de travessia, para um sistema trifásico de tensão nominal 36 kV, produzido pela fábrica Indisol foi delineado o desenvolvimento de uma deteção do sinal das tensões a que o isolador está sujeito, por meio de uma cadeia resistiva. Para alcançar uma solução foram implementadas três tipologias de cadeias resistivas no interior do isolador de travessia, por um *software* de desenho. Estas foram estudadas através de um *software* de elementos finitos onde se fizeram simulações elétricas, com análise de duas grandezas (campo elétrico e diferença de potencial elétrico) em cenários normais e críticos. Esses cenários permitiram concluir que a geometria dos materiais dentro do isolador foi crucial para obter o melhor resultado.

Nos resultados das simulações o isolador com a segunda cadeia resistiva destacou-se, no entanto, o modelo final correspondeu ao isolador com a terceira cadeia pela conjugação dos resultados e execução da sua montagem em fábrica.

Pelos ensaios em fábrica observou-se que o modelo proposto teve uma boa resposta às descargas parciais e a sua estrutura mecânica foi aprovada, porém, não passou no ensaio do impulso a 170 kV (ensaio que certifica a comercialização do isolador). Todavia, como a tensão de falha (165 kV) está muito perto da tensão do ensaio, a peça será aplicável, com mínimas alterações futuras por parte da empresa e segundo as suas exigências.

Palavras chave: Alta tensão, isolador de travessia, cadeia resistiva, descargas parciais, deteção de sinal, campo elétrico, diferença de potencial elétrico.



# Abstract

At substation stations it is possible to control electrical quantities such as current or voltage. This control operation is ensured by transformers and the indoor high voltage transition is supported by bushings. Despite these objects insulating the incoming or outgoing high voltage conductor across grounded walls, this environment it's propitious having problems due to partial discharges. The most common partial discharges inception happens when the electric field intensity it's greater than the dielectric strength of the material. So, to avoid these issues, some detection methods must be developed.

Assuming this master thesis will be focused on a bushing for a three-phase system, with nominal voltage of 36 kV, produced by Indisol company, it was outlined that it would be developed a signal detection of bushing voltage through resistive chain path. In order to achieve a solution were designed three resistive chain path typologies in bushing by a drawing software. In these typologies electric field and voltage were studied with electrical simulations in a finite elements' software, where normal and critical scenarios have been added. It was concluded that the geometry of the materials inside the bushing was crucial to reach the best results.

The best simulation results were from the second resistive chain path, even so it was chosen the third because its setting-up in bushing together with simulations results has reached the desired model.

Regarding the trials made in the factory it has been noticed that the model proposed had a good performance on partial discharges and its mechanical structure was approved. However, in the lightning impulse withstand voltage, at 170 kV (corresponding to the trial that confirms the commercialization) the same target has not been achieved. Still, the bushing's threshold voltage (165 kV) approaches the required trial's voltage, so with small changes from the company the bushing will reach such demand.

Keywords: High Voltage, Bushing, resistive chain path, partial discharges, signal detection, electric field, voltage.



# Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

AT – Alta tensão

BT – Baixa tensão

C.A. – Corrente alternada

$C_a$  – Carga de prova

$C_k$  – Condensador de acoplamento

CC – Cabo de conexão

C.C. – Corrente contínua

CD – *Coupling Device* (Dispositivo de acoplamento)

d.d.p – Diferença de potencial

DGA – Análise de gases dissolvidos

DP – Descarga Parcial

DUT – *Device under test* (carga de prova)

$E$  – Campo elétrico local

$E_d$  – Campo elétrico de disrupção

$\hat{E}_{mean}$  – Média de picos de campo elétrico

$\hat{E}_{max}$  – Campo elétrico máximo

GDT – *Gas discharge tube* (objeto de proteção elétrica)

GIS - *Gas Insulated Substation* (Subestação isolada a gás)

HPLC – *High-Performance Liquid Chromatography* (Cromatografia de alta desempenho)

IEC - *International Electrotechnical Commission* (Comissão Eletrotécnica internacional)

$I_0$  – Corrente de saturação

MI – *Measure Instrument* (Instrumento de medida)

$n_A$  – Número de elétrons que se dirigem para o ânodo

PCB – *Printed Circuit Board* (Placa de circuito integrado)

SMD – *Surface Mounted Device* (Dispositivos eletrônicos montados superficialmente)

Terra – Ponto de referência com potencial de zero volt

TCR - *Temperature Coefficient of Resistance* (Coeficiente de temperatura da resistência)

$Z_{mi}$  – Impedância de medida de descargas parciais

1D – Uma dimensão

2D – Duas dimensões

3D – Três dimensões

## Símbolos gregos

$\alpha$  – 1º coeficiente de ionização de Townsend

$\Gamma$  – 2º coeficiente de ionização de Townsend

$\varepsilon$  – Constante dielétrica (propriedade de materiais isolantes)

$\sigma$  – Densidade superficial de carga

# Índice de Matérias

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos .....	2
1.2	Motivação .....	2
1.3	Estrutura .....	2
<b>2</b>	<b>Estado da Arte.....</b>	<b>5</b>
2.1	Distribuição de campo elétrico e potencial elétrico .....	5
2.1.1	Campos elétricos uniformes e não uniformes .....	5
2.1.2	Métodos de simulação .....	7
2.2	Descargas Parciais .....	7
2.2.1	Princípios da descarga parcial .....	9
2.2.2	Deteção de descargas parciais .....	11
2.2.3	Consequências das descargas parciais.....	16
2.3	Isoladores de AT.....	16
2.3.1	Tipos.....	16
2.3.2	Aplicações .....	21
2.3.3	Ensaio .....	22
2.4	Papel das Resistências em AT .....	24
2.4.1	Resistências de filme grosso .....	24
2.4.2	Resistências de filme fino .....	25
2.4.3	Aplicações .....	26
2.5	Sumário .....	26
<b>3</b>	<b>Modelação do sistema .....</b>	<b>29</b>
3.1	Dimensionamento teórico do sistema .....	29
3.1.1	Dados de estudo antes dos ensaios .....	29
3.1.2	Dados de estudo após os ensaios .....	31
3.2	Parte A: Dimensionamento do modelo em <i>software</i> de desenho.....	34
3.2.1	Caso Geral.....	34
3.2.2	Alteração da geometria da malha .....	35
3.2.3	Tipos de cadeias resistivas .....	35
3.3	Parte B – Dimensionamento do modelo em <i>software</i> de elementos finitos.....	38
3.3.1	Informação essencial para resultados de simulações.....	38
<b>4</b>	<b>Simulações e análise de resultados.....</b>	<b>43</b>
4.1	Contexto inicial .....	43
4.1.1	Incertezas do <i>software</i> de elementos finitos .....	43
4.1.2	Metodologia utilizada.....	43
4.1.3	Pontos auxiliares no <i>software</i> de elementos finitos.....	44
4.2	1ª Cadeia de oito resistências à tensão de funcionamento 36 kV com conector isolante.....	46
4.2.1	Caso A: Isolador com aro da malha reduzido e sem anomalias .....	46
4.2.2	Caso A: Isolador com aro da malha reduzido e anomalias.....	57
4.2.3	Caso B: Isolador com aro da malha enrolado e sem anomalias.....	67

4.2.4	Caso B: Isolador com aro da malha enrolado e anomalias .....	72
4.3	2ª Cadeia de oito resistências à tensão de funcionamento 36 kV com conector isolante.....	79
4.3.1	Caso A: Isolador com aro da malha reduzido e sem anomalias .....	79
4.3.2	Caso A: Isolador com aro da malha reduzido e anomalias.....	88
4.3.3	Caso B: Isolador com aro da malha enrolado e sem anomalias.....	95
4.3.4	Caso B: Isolador com aro da malha enrolado e anomalias.....	100
4.4	Comparação das duas primeiras cadeias de oito resistências .....	105
4.5	3ª Cadeia de oito resistências à tensão de funcionamento 36 kV com conector isolante.....	114
4.5.1	Isolador sem anomalias .....	114
4.5.2	Isolador com anomalias.....	120
4.6	Escolha da melhor cadeia resistiva .....	126
4.7	Cadeia de dez resistências à tensão de funcionamento de 36 kV com conector isolante.....	131
4.7.1	Isolador sem anomalias .....	131
4.8	Cadeia de dez resistências à tensão de sobrecarga de 70 kV com conector isolante .....	140
4.8.1	Isolador sem anomalias .....	140
4.8.2	Isolador com anomalias.....	145
4.9	Análise do modelo final.....	152
<b>5</b>	<b>Ensaio em fábrica e análise de resultados .....</b>	<b>155</b>
5.1	Pontos a conhecer na fábrica .....	155
5.1.1	Ambiente de teste de ensaio .....	155
5.1.2	Local de ensaios .....	157
5.2	Ensaio às DP's e rigidez dielétrica na frequência industrial .....	158
5.2.1	Isolador 1 com 3ª cadeia resistiva .....	158
5.2.2	Isolador 2 com 3ª cadeia resistiva .....	160
5.2.3	Isolador 3 com 1ª cadeia resistiva .....	163
5.3	Escolha do melhor modelo .....	164
5.4	Ensaio do impulso atmosférico.....	166
5.5	Resumo final.....	169
<b>6</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>171</b>
6.1	Trabalhos futuros.....	173
<b>7</b>	<b>Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>175</b>
<b>8</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>177</b>
8.1	Anexo I.....	177
8.2	Anexo II.....	180
8.3	Anexo III .....	182
8.4	Anexo IV .....	184
8.5	Anexo V .....	185

# Índice de Figuras

Figura 2.1-Comparação entre campos uniformes e não uniformes. A - Campo uniforme entre duas placas paralelas. B - Campo não uniforme entre dois elétrodos pontiagudos (adaptado de [3]).	6
Figura 2.2-Esquema de um cabo coaxial (Fonte: [4]).	7
Figura 2.3-Descargas parciais em isoladores. A - Modelo elétrico de uma descarga parcial no interior do isolador. B - Circuito equivalente (Adaptado de: [6]).	8
Figura 2.4-Categorias de DP's. A: externa, B: externa-efeito coroa, C: interna (Fonte: [7]).	9
Figura 2.5-Mecanismo de Townsend: Evolução de tensão/corrente numa descarga em alta tensão (adaptado de [2]).	10
Figura 2.6-Avalanche de eletrões em campo uniforme iniciada pelo “eletrão-mãe” (Fonte: [3]).	10
Figura 2.7-Circuitos de deteção de DP's de acordo com a norma IEC 60270. A - Circuito A. B - Circuito B (Fonte: [8]).	12
Figura 2.8-Exemplo de deteção de DP's com resolução de ângulo de fase. (Adaptado de:[10]).	12
Figura 2.9-Deteção de DP's. A-Representação sinusoidal. B-Representação elíptica (Fonte: [12]).	13
Figura 2.10-Descarga por efeito de coroa com respetivo padrão (Adaptado: [12]).	13
Figura 2.11-Descarga à superfície do isolador com respetivo padrão (Adaptado: [12]).	13
Figura 2.12-Descarga interna com respetivo padrão (Adaptado: [12]).	14
Figura 2.13-Descarga em arborescência elétrica com respetivo padrão (Adaptado: [12]).	14
Figura 2.14-Descarga devido a componentes flutuantes com respetivo padrão (Adaptado: [12]).	14
Figura 2.15-Padrão do ruído de contacto (Adaptado: [12]).	14
Figura 2.16-Exemplo de deteção de DP's com resolução temporal. (Fonte: [13])	15
Figura 2.17-Estrutura de um isolador de travessia do tipo não-condensador (adaptado de [15]).	16
Figura 2.18-Potencial elétrico na travessia do tipo não-condensador. A-Distribuição radial segundo a medida (a). B - Distribuição axial segundo a medida (b) (Fonte: [13]).	18
Figura 2.19-Exemplo de representação de linha de fuga num isolador polimérico (Adaptado de: [16]).	18
Figura 2.20-Controlo de campo elétrico através de material termo retrátil (adaptado de [15]).	19
Figura 2.21-Conector <i>plug-in</i> (Fonte: [17]).	19
Figura 2.22-Isolador de travessia do tipo condensador (Adaptado de: [15]).	20
Figura 2.23-A - Distribuição de campo elétrico num isolador de travessia capacitivo e não capacitivo. B - Campo elétrico na travessia que varia radialmente (Adaptado de: [15]).	20
Figura 2.24-Exemplo de aplicação de travessia num transformador (Adaptado de [18]).	21
Figura 2.25-Ensaio de impulso atmosférico (Fonte: [21]).	23
Figura 2.26-Constituição Resistência filme grosso (adaptado de [23]).	25
Figura 2.27-Constituição Resistência filme fino (adaptado de [23]).	26
Figura 3.1-Divisor de tensão com N resistências.	29
Figura 3.2-Exemplo de d.d.p. a aplicar no estudo das resistências.	30
Figura 3.3-Exemplo deteção de sinal	31
Figura 3.4-Resistência a utilizar. A - Modelo HVC2512 utilizado na Indisol. B - Circuito RC equivalente da resistência (Fonte: Indisol).	32
Figura 3.5-Local a partir de onde é feita a deteção de sinal (Fonte: Indisol).	33
Figura 3.6-Componentes de deteção de tensão da travessia. A - Exemplo de PCB. B - Exemplo de BNC (Fonte: Indisol).	33
Figura 3.7-Exemplo de conector isolante utilizado em fábrica.	33

Figura 3.8-Vista frontal do modelo 3D de isolador de travessia. A - Sem conector isolante. B – Com conector isolante. ....	34
Figura 3.9-Modelo 3D do isolador de travessia. A - Vista superior. B - Vista inferior .....	34
Figura 3.10-Conjunto Condutor de AT, malha com ligação à terra através de insertos. A - Vista frontal. B - Vista superior. ....	35
Figura 3.11-Malha com ângulo de curvatura dos aros alterados. A – Caso de estudo com 20°. B – Caso de estudo com 300°. ....	35
Figura 3.12-1ªCadeia de oito resistências. A-Cadeia isolada. B-Vista superior. C-Vista isométrica. ....	36
Figura 3.13-2ªCadeia de oito resistências. A-Cadeia isolada. B-Vista superior. C-Vista isométrica. ....	36
Figura 3.14-3ªCadeia de oito resistências. A-Cadeia isolada. B-Vista superior. C-Vista isométrica. ....	37
Figura 3.15-1ªCadeia de dez resistências. A-Cadeia isolada. B-Vista superior. C-Vista isométrica.....	37
Figura 3.16-2ªCadeia de dez resistências. A-Cadeia isolada. B-Vista superior. C-Vista isométrica.....	37
Figura 3.17-3ªCadeia de dez resistências. A-Cadeia isolada. B-Vista superior. C-Vista isométrica.....	38
Figura 3.18-Exemplo de <i>Mesh</i> utilizada nas simulações.....	39
Figura 3.19-Exemplo da localização das bolhas de ar associadas ao estudo das resistências. ....	39
Figura 3.20-2º Exemplo da localização das bolhas de ar associadas ao estudo das primeiras resistências. ....	39
Figura 3.21-Exemplo da localização da bolha de ar associada ao aro da malha .....	40
Figura 3.22-Exemplo bolha de ar associada ao condutor.....	40
Figura 3.23-Exemplo de linha de estudo usada para R5, com bolha de ar a meio do percurso. ....	40
Figura 3.24-Ferramentas de auxílio no estudo do campo eléctrico e d.d.p. A - Plano de corte (a vermelho) na resistência. B - Linha 3D entre o condutor central e resistência. ....	41
Figura 3.25-Ferramentas de auxílio. A – Exemplo plano vertical auxiliar. B - Linha horizontal 2D auxiliar .....	41
Figura 4.1-Gráfico do potencial eléctrico 3D. A - Vista lateral. B - Vista superior.....	44
Figura 4.2-Gráfico 3D do Campo Eléctrico. A – Segundo a direção x. B - Segundo a direção y. C - Segundo a direção z. ....	44
Figura 4.3-Campo Eléctrico. A – Segundo direção x. B - Segundo a direção y. C - Segundo a direção z .....	45
Figura 4.4-Norma do campo eléctrico do isolador.....	45
Figura 4.5-Campo Eléctrico entre a fonte e extremidade da malha. A - Segundos as três direções. B - Norma do Campo Eléctrico. ....	46
Figura 4.6-Estudo do potencial eléctrico do isolador. A - Potencial eléctrico. B – Linha equipotenciais. ....	47
Figura 4.7-Potencial Eléctrico entre o condutor e malha.....	47
Figura 4.8-Norma do campo eléctrico do isolador.....	48
Figura 4.9-Campo eléctrico entre o condutor de AT e a extremidade da malha. ....	48
Figura 4.10-Linha de estudo entre a fonte e R1. ....	49
Figura 4.11-Estudo num plano 2D que intersecta a fonte e R1. A – Campo eléctrico. B - Potencial eléctrico. ....	49
Figura 4.12-Estudo no percurso entre a fonte e R1. A - Campo eléctrico. B - Potencial eléctrico.....	50
Figura 4.13-Linha de estudo entre a fonte e R2 .....	50
Figura 4.14- Estudo no percurso entre a fonte e R2. A - Campo eléctrico. B - Potencial eléctrico.....	51
Figura 4.15-Linha de estudo entre a fonte e R3. ....	51
Figura 4.16- Estudo no percurso entre a fonte e R3. A - Campo eléctrico. B - Potencial eléctrico.....	52
Figura 4.17-Linha de estudo entre a fonte e R4. ....	52
Figura 4.18- Estudo no percurso entre a fonte e R4. A - Campo eléctrico. B - Potencial eléctrico.....	53
Figura 4.19-Linha de estudo entre a fonte e R5. ....	53
Figura 4.20- Estudo no percurso entre a fonte e R5. A - Campo eléctrico. B - Potencial eléctrico.....	54

Figura 4.21-Linha de estudo entre a fonte e R6. ....	54
Figura 4.22- Estudo no percurso entre a fonte e R6. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	55
Figura 4.23-Linha de estudo entre a fonte e R7. ....	55
Figura 4.24- Estudo no percurso entre a fonte e R7. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	56
Figura 4.25-Linha de estudo entre a fonte e R8. ....	56
Figura 4.26- Estudo no percurso entre a fonte e R8. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	57
Figura 4.27- Cenário de anomalia. A - Campo elétrico. B – Detalhe do campo elétrico bolha de ar tangente ao aro da malha. ....	58
Figura 4.28-Estudo no percurso entre o condutor de AT e a malha com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	58
Figura 4.29-Linha de estudo entre o condutor de AT e a malha com 2ª anomalia. ....	59
Figura 4.30-Estudo no percurso entre o condutor de AT e a malha, antes da introdução da 2ª anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	59
Figura 4.31-Estudo no percurso entre o condutor de AT e 2ª anomalia na malha. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	60
Figura 4.32-Linha de estudo entre o centro do isolador e o condutor de AT com anomalia. ....	60
Figura 4.33-Estudo no percurso entre o centro do isolador e condutor de AT, antes da introdução de anomalia no condutor de AT. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	61
Figura 4.34-Estudo no percurso entre o centro do isolador e condutor de AT, com anomalia no condutor de AT. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	61
Figura 4.35-Estudo num plano 2D que intersecta a fonte, R1 e anomalia. A – Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	62
Figura 4.36-Estudo no percurso entre a fonte e R1 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ..	62
Figura 4.37-Estudo no percurso entre a fonte e R2 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ..	63
Figura 4.38-Estudo no percurso entre a fonte e R3 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ..	63
Figura 4.39-Estudo no percurso entre a fonte e R4 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ..	64
Figura 4.40-Estudo no percurso entre a fonte e R5 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ..	64
Figura 4.41-Estudo no percurso entre a fonte e R6 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ..	65
Figura 4.42-Estudo no percurso entre a fonte e R7 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ..	65
Figura 4.43-Estudo num plano 2D que intersecta a fonte, R8 e anomalia. A – Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	66
Figura 4.44-Caso A: Presença de anomalia no percurso entre o condutor de AT e a resistência R8. A - Campo elétrico. B - Potencial Elétrico. ....	66
Figura 4.45-Estudo do isolador com aro da malha enrolado. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	67
Figura 4.46-Linha 2D de auxílio, tangente ao aro da malha arredondado ....	67
Figura 4.47-Estudo no percurso entre a fonte e o aro da malha. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	68
Figura 4.48-Estudo num plano 2D que intersecta a fonte e R1. A – Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	68
Figura 4.49-Estudo no percurso entre a fonte e R1. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	69
Figura 4.50-Estudo no percurso entre a fonte e R2. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	69
Figura 4.51-Estudo no percurso entre a fonte e R3. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	70
Figura 4.52-Estudo no percurso entre a fonte e R4. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	70
Figura 4.53-Estudo no percurso entre a fonte e R5. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	71
Figura 4.54-Estudo no percurso entre a fonte e R6. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico ....	71
Figura 4.55-Estudo no percurso entre a fonte e R7. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	72
Figura 4.56-Estudo no percurso entre a fonte e R8. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	72

Figura 4.57- Cenário de anomalia. A - Campo elétrico. B – Detalhe do campo elétrico bolha de ar tangente ao aro da malha.....	73
Figura 4.58-Estudo no percurso entre o condutor de AT e a malha com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	73
Figura 4.59-Estudo no percurso entre o condutor de AT e 2ª anomalia na malha. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	74
Figura 4.60-Cenário de anomalia num plano 2D que intersecta o condutor de AT e a bolha de ar tangente a este. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	74
Figura 4.61-Estudo no percurso entre o centro do isolador e condutor de AT, com anomalia no condutor de AT. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	75
Figura 4.62-Estudo no percurso entre a fonte e R1 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ..	75
Figura 4.63-Estudo no percurso entre a fonte e R2 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ..	76
Figura 4.64-Estudo no percurso entre a fonte e R3 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ..	76
Figura 4.65-Estudo no percurso entre a fonte e R4 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ..	77
Figura 4.66-Estudo no percurso entre a fonte e R5 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ..	77
Figura 4.67-Estudo no percurso entre a fonte e R6 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ..	78
Figura 4.68-Estudo no percurso entre a fonte e R7 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ..	78
Figura 4.69-Estudo no percurso entre a fonte e R8 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ..	79
Figura 4.70-Estudo do isolador com aro da malha reduzido. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	80
Figura 4.71-Estudo no percurso entre a fonte e o aro da malha. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	80
Figura 4.72-Estudo num plano 2D que intersecta a fonte e R1. A – Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	81
Figura 4.73-Linha de estudo entre a fonte e R1. ....	81
Figura 4.74-Estudo no percurso entre a fonte e R1. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	81
Figura 4.75-Linha de estudo entre a fonte e R2. ....	82
Figura 4.76-Estudo no percurso entre a fonte e R2. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	82
Figura 4.77-Linha de estudo entre a fonte e R3. ....	82
Figura 4.78-Estudo no percurso entre a fonte e R3. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	83
Figura 4.79-Linha de estudo entre a fonte e R4. ....	83
Figura 4.80-Estudo no percurso entre a fonte e R4. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	84
Figura 4.81-Linha de estudo entre a fonte e R5. ....	84
Figura 4.82-Estudo no percurso entre a fonte e R5. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	85
Figura 4.83-Linha de estudo entre a fonte e R6. ....	85
Figura 4.84-Estudo no percurso entre a fonte e R6. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	86
Figura 4.85-Linha de estudo entre a fonte e R7. ....	86
Figura 4.86-Estudo no percurso entre a fonte e R7. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	87
Figura 4.87-Linha de estudo entre a fonte e R8. ....	87
Figura 4.88-Estudo no percurso entre a fonte e R8. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	88
Figura 4.89- Cenário de anomalias. Campo elétrico com bolha de ar tangente ao aro da malha .....	88
Figura 4.90-Estudo no percurso entre o condutor de AT e a malha com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	89
Figura 4.91-Linha de estudo entre o condutor de AT e a malha com 2ª anomalia. ....	89
Figura 4.92-Estudo no percurso entre o condutor de AT e a malha, antes da introdução da 2ª anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	90
Figura 4.93-Estudo no percurso entre o condutor de AT e 2ª anomalia na malha. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	90

Figura 4.94-Linha de estudo entre o centro do isolador e o condutor de AT com anomalia.....	91
Figura 4.95-Estudo no percurso entre o centro do isolador e condutor de AT, antes da introdução de anomalia no condutor de AT. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	91
Figura 4.96-Estudo no percurso entre o centro do isolador e condutor de AT, com anomalia no condutor de AT. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	91
Figura 4.97-Estudo no percurso entre a fonte e R1 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ..	92
Figura 4.98-Estudo no percurso entre a fonte e R2 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ..	92
Figura 4.99-Estudo no percurso entre a fonte e R3 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ..	93
Figura 4.100-Estudo no percurso entre a fonte e R4 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.	93
Figura 4.101-Estudo no percurso entre a fonte e R5 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.	94
Figura 4.102-Estudo no percurso entre a fonte e R6 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.	94
Figura 4.103-Estudo no percurso entre a fonte e R7 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.	95
Figura 4.104-Estudo no percurso entre a fonte e R8 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.	95
Figura 4.105-Caso B: Estudo das grandezas no percurso entre o condutor e a extremidade da malha. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	96
Figura 4.106-Estudo no percurso entre a fonte e R1. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	96
Figura 4.107-Estudo no percurso entre a fonte e R2. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	97
Figura 4.108-Estudo no percurso entre a fonte e R3. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	97
Figura 4.109-Estudo no percurso entre a fonte e R4. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	98
Figura 4.110-Estudo no percurso entre a fonte e R5. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	98
Figura 4.111-Estudo no percurso entre a fonte e R6. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	99
Figura 4.112-Estudo no percurso entre a fonte e R7. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	99
Figura 4.113-Estudo no percurso entre a fonte e R8. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	100
Figura 4.114-Estudo no percurso entre o condutor de AT e a malha com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	100
Figura 4.115-Estudo no percurso entre o condutor de AT e 2ª anomalia na malha. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	101
Figura 4.116-Estudo no percurso entre o centro do isolador e condutor de AT, com anomalia no condutor de AT. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	101
Figura 4.117-Estudo no percurso entre a fonte e R1 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.	102
Figura 4.118-Estudo no percurso entre a fonte e R2 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.	102
Figura 4.119-Estudo no percurso entre a fonte e R3 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.	103
Figura 4.120-Estudo no percurso entre a fonte e R4 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.	103
Figura 4.121-Estudo no percurso entre a fonte e R5 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.	104
Figura 4.122-Estudo no percurso entre a fonte e R6 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.	104
Figura 4.123-Estudo no percurso entre a fonte e R7 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.	105
Figura 4.124-Estudo no percurso entre a fonte e R8 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.	105
Figura 4.125-Diferença de potencial elétrico entre o condutor de AT e cada resistências da primeira e segunda cadeias resistivas com o seu desvio-padrão. ....	112
Figura 4.126-Estudo num plano 2D que intersecta a fonte e R1. A – Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	114
Figura 4.127-Linha de estudo entre a fonte e R1. ....	114
Figura 4.128-Estudo no percurso entre a fonte e R1. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	115
Figura 4.129-Linha de estudo entre a fonte e R2. ....	115
Figura 4.130-Estudo no percurso entre a fonte e R2. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	115

Figura 4.131-Linha de estudo entre a fonte e R3. ....	116
Figura 4.132-Estudo no percurso entre a fonte e R3. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	116
Figura 4.133-Linha de estudo entre a fonte e R4. ....	116
Figura 4.134-Estudo no percurso entre a fonte e R4. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	117
Figura 4.135-Linha de estudo entre a fonte e R5. ....	117
Figura 4.136-Estudo no percurso entre a fonte e R5. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	117
Figura 4.137-Linha de estudo entre a fonte e R6. ....	118
Figura 4.138-Estudo no percurso entre a fonte e R6. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	118
Figura 4.139-Linha de estudo entre a fonte e R7. ....	119
Figura 4.140-Estudo no percurso entre a fonte e R7. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	119
Figura 4.141-Linha de estudo entre a fonte e R8. ....	119
Figura 4.142-Estudo no percurso entre a fonte e R8. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	120
Figura 4.143-Linha de estudo entre o centro do isolador e o condutor de AT com anomalia. ....	120
Figura 4.144-Estudo das grandezas antes da introdução da segunda anomalia junto ao condutor de AT. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	121
Figura 4.145-Presença de anomalia junto ao condutor de AT. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	121
Figura 4.146 Estudo num plano 2D que intersecta a fonte e R1 em cenário de anomalia. A – Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	122
Figura 4.147-Estudo no percurso entre a fonte e R1 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	122
Figura 4.148-Estudo no percurso entre a fonte e R2 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	123
Figura 4.149-Estudo no percurso entre a fonte e R3 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	123
Figura 4.150-Estudo no percurso entre a fonte e R4 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	124
Figura 4.151-Estudo no percurso entre a fonte e R5 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	124
Figura 4.152-Estudo no percurso entre a fonte e R6 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	125
Figura 4.153-Estudo no percurso entre a fonte e R7 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	125
Figura 4.154-Estudo num plano 2D que intersecta o condutor de AT e a resistência R8 em cenário de anomalia. A – Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	126
Figura 4.155-Estudo no percurso entre a fonte e R8 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	126
Figura 4.156-Diferença de potencial elétrico entre o condutor de AT e cada resistências da segunda e terceira cadeias resistivas com o seu desvio-padrão. ....	130
Figura 4.157-Estudo num plano 2D que intersecta a fonte e R1. A – Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	131
Figura 4.158-Linha de estudo entre a fonte e R1 ....	132
Figura 4.159-Estudo no percurso entre a fonte e R1. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	132
Figura 4.160-Linha de estudo entre a fonte e R2 ....	132
Figura 4.161-Estudo no percurso entre a fonte e R2. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	133
Figura 4.162-Linha de estudo entre a fonte e R3 ....	133
Figura 4.163-Estudo no percurso entre a fonte e R3. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	133
Figura 4.164-Linha de estudo entre a fonte e R4 ....	134
Figura 4.165-Estudo no percurso entre a fonte e R4. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	134
Figura 4.166-Linha de estudo entre a fonte e R5 ....	134
Figura 4.167-Estudo no percurso entre a fonte e R5. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	135
Figura 4.168-Linha de estudo entre a fonte e R6 ....	135
Figura 4.169-Estudo no percurso entre a fonte e R6. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	135

Figura 4.170-Linha de estudo entre a fonte e R7 .....	136
Figura 4.171-Estudo no percurso entre a fonte e R7. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	136
Figura 4.172-Linha de estudo entre a fonte e R8 .....	136
Figura 4.173-Estudo no percurso entre a fonte e R8. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	137
Figura 4.174-Linha de estudo entre a fonte e R9 .....	137
Figura 4.175-Estudo no percurso entre a fonte e R9. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	137
Figura 4.176-Linha de estudo entre a fonte e R10 .....	138
Figura 4.177-Estudo no percurso entre a fonte e R10. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	138
Figura 4.178-Estudo num plano 2D que intersecta a fonte e R1. A – Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ...	140
Figura 4.179-Estudo no percurso entre a fonte e R1. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	141
Figura 4.180-Estudo no percurso entre a fonte e R2. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	141
Figura 4.181-Estudo no percurso entre a fonte e R3. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	142
Figura 4.182-Estudo no percurso entre a fonte e R4. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	142
Figura 4.183-Estudo no percurso entre a fonte e R5. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	143
Figura 4.184-Estudo no percurso entre a fonte e R6. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	143
Figura 4.185-Estudo no percurso entre a fonte e R7. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	144
Figura 4.186-Estudo no percurso entre a fonte e R8. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	144
Figura 4.187-Estudo no percurso entre a fonte e R9. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	145
Figura 4.188-Estudo no percurso entre a fonte e R10. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	145
Figura 4.189-Cenário de anomalia num plano 2D que intersecta o condutor de AT e a bolha de ar tangente a este. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	146
Figura 4.190-Linha de estudo entre o centro do isolador e o condutor de AT com anomalia.....	146
Figura 4.191-Estudo no percurso entre o centro do isolador e condutor de AT, antes da introdução de anomalia no condutor de AT. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	147
Figura 4.192-Estudo no percurso entre o centro do isolador e condutor de AT, com anomalia no condutor de AT. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico. ....	147
Figura 4.193-Estudo no percurso entre a fonte e R1. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	148
Figura 4.194-Estudo no percurso entre a fonte e R2. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	148
Figura 4.195-Estudo no percurso entre a fonte e R3. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	149
Figura 4.196-Estudo no percurso entre a fonte e R4. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	149
Figura 4.197-Estudo no percurso entre a fonte e R5. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	150
Figura 4.198-Estudo no percurso entre a fonte e R6. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	150
Figura 4.199-Estudo no percurso entre a fonte e R7. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	151
Figura 4.200-Estudo no percurso entre a fonte e R8. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	151
Figura 4.201-Estudo no percurso entre a fonte e R9. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	152
Figura 4.202-Estudo no percurso entre a fonte e R10. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.....	152
Figura 5.1-Montagem que simula a aplicação na realidade. ....	156
Figura 5.2-Circuito elétrico equivalente do sistema em montagem. ....	156
Figura 5.3-Local de ensaios elétricos dos isoladores da Indisol. ....	157
Figura 5.4-Circuito de deteção de DP's. A-Fonte de tensão C.A. (1) ligada ao filtro (2). B-Filtro (3) ligado à impedância de medida. C-Pia central (4) que alberga a travessia a testar. ....	157
Figura 5.5-Deteção de DP's no isolador 1 com base na resolução em ângulo de fase segundo um sinal C.A. aplicado a 70 kV. ....	158

Figura 5.6-Deteção de DP's no isolador 1 com base na resolução em ângulo de fase segundo um sinal C.A. aplicado a 43,2 kV. ....	159
Figura 5.7-Deteção de DP's no isolador 1 com base na resolução em ângulo de fase segundo um sinal C.A. aplicado a 24,9 kV. ....	159
Figura 5.8-Vista em planta do perfil frontal do isolador 1 em RX. ....	160
Figura 5.9-Vista em planta do perfil superior do isolador 1 em RX. ....	160
Figura 5.10-Deteção de DP's no isolador 2 com base na resolução em ângulo de fase segundo um sinal C.A. aplicado a 70 kV. ....	161
Figura 5.11-Deteção de DP's no isolador 2 com base na resolução em ângulo de fase segundo um sinal C.A. aplicado a 43,2 kV. ....	161
Figura 5.12-Deteção de DP's no isolador 2 com base na resolução em ângulo de fase segundo um sinal C.A. aplicado a 24,9 kV. ....	162
Figura 5.13-Vista em planta do perfil frontal do isolador 2 em RX. ....	162
Figura 5.14-Vista em planta do perfil superior do isolador 2 em RX. ....	163
Figura 5.15-Deteção de DP's no isolador 3 com base na resolução em ângulo de fase segundo um sinal C.A. aplicado a 18,67 kV. ....	163
Figura 5.16-Vista 1 em planta do perfil superior do isolador 3 em RX. ....	164
Figura 5.17-Vista 2 em planta do perfil superior do isolador 3 em RX. ....	164
Figura 5.18-Medida da resistência equivalente C.A. ....	165
Figura 5.19-Modelo do isolador de travessia 1. ....	166
Figura 5.20-Ensaio do impulso, andares com condensador. ....	167
Figura 5.21-Circuito do ensaio do impulso atmosférico. A-Montagem do circuito. B-Ligação de AT que submete a travessia ao impulso. ....	167
Figura 5.22-Aspetto exterior da travessia, após o ensaio do impulso. ....	168
Figura 5.23-Resultado físico da travessia após o ensaio do impulso (interior). ....	168
Figura 5.24-Ensaio de impulso atmosférico a 170 kV. ....	169
Figura 8.1-Desenho técnico molde do isolador de travessia. ....	177
Figura 8.2-Desenho técnico conjunto malha e braços, que ligam ao potencial nulo. ....	178
Figura 8.3-Desenho técnico inserto M6. ....	179
Figura 8.4-Excerto do catálogo de resistências página 1. ....	180
Figura 8.5-Excerto do catálogo de resistências página 2. ....	181
Figura 8.6-Ensaio de rigidez dielétrica e impulso atmosférico de acordo com a tensão nominal da travessia. ....	182
Figura 8.7-Ensaio das descargas parciais de acordo com a tensão nominal da travessia. ....	183
Figura 8.8-Fluido dielétrico PF-5052 segundo a 3M. ....	184
Figura 8.9-Características dos dois conjuntos de 15 impulsos à tensão de pico 125 kV. ....	185
Figura 8.10-Série com os primeiros cinco impulsos de polaridade positiva à tensão de pico 125 kV. ....	185
Figura 8.11-Série com os segundos cinco impulsos de polaridade positiva à tensão de pico 125 kV. ....	186
Figura 8.12-Série com os terceiros cinco impulsos de polaridade positiva a 125 kV. ....	186
Figura 8.13-Série com os primeiros cinco impulsos de polaridade negativa à tensão de pico 125 kV. ....	186
Figura 8.14-Série com os segundos cinco impulsos de polaridade negativa à tensão de pico 125 kV. ....	187
Figura 8.15-Série com os terceiros cinco impulsos de polaridade negativa à tensão de pico 125 kV. ....	187
Figura 8.16-Ensaio de impulso com tensão de pico 135 kV. ....	187
Figura 8.17-Ensaio de impulso com tensão de pico 145 kV. ....	188
Figura 8.18-Ensaio de impulso com tensão de pico 165 kV. ....	188

## Índice de Tabelas

Tabela 3.1-Valores de grandezas associadas aos materiais do conjunto travessia. ....	38
Tabela 4.1-Resultados da 1ª cadeia resistiva no cenário sem anomalias.....	106
Tabela 4.2-Resultados da 2ª cadeia resistiva no cenário sem anomalias.....	107
Tabela 4.3-Resultados da 1ª cadeia resistiva no cenário com anomalias .....	108
Tabela 4.4-Resultados 2ª cadeia resistiva cenário com anomalias .....	110
Tabela 4.5-Resultados da 2ª e 3ª cadeia resistiva em cenário sem anomalias .....	127
Tabela 4.6-Resultados da 2ª e 3ª cadeia resistiva em cenário com anomalias.....	128
Tabela 4.7-Resultados do modelo final no regime de funcionamentos normal.....	139
Tabela 4.8-Resultados do modelo final em regime de sobrecarga nos cenários de presença e ausência de anomalias. ....	153
Tabela 5.1-Medições em C.C. e C.A. da resistência equivalente da travessia. ....	165
Tabela 5.2-Ensaio feitos nas duas réplicas do modelo 1 .....	166
Tabela 5.3-Condições atmosféricas do ensaio de impulso atmosférico. ....	167
Tabela 5.4-Resultados ao ensaio do impulso atmosférico.....	170
Tabela 6.1- Comparação das três cadeias resistivas segundo o campo elétrico para oito e dez resistências.....	172



# 1 Introdução

A alta tensão (AT) é uma área de engenharia com grande papel no quotidiano da sociedade, pois é nesta faixa e em muito alta tensão que é feita a transmissão de energia. Para fazer a transmissão e distribuição de energia, linhas de AT são ligadas a transformadores presentes nas subestações. Nestas subestações a ligação entre o interior do transformador e as linhas de transmissão é assegurada por isoladores de AT, pelo que é comum utilizar-se isoladores de travessia que têm a designação de *bushing*, em inglês. Os isoladores, pelas suas propriedades elétricas, conferem uma proteção aos condutores das linhas de transmissão de energia. Porém, apesar dessa proteção, a integridade do isolador pode ser diminuída mediante o ambiente a que está sujeito, por via de diversos fatores externos: poluição, humidade ou descargas elétricas atmosféricas. Além disso, segundo *Septyani* [1], os isoladores ligados nas paredes de transformadores de subestações estão frequentemente sujeitos a sobretensões, esforços mecânicos e picos de correntes. Os fatores referidos aceleram a probabilidade de ocorrência de descargas parciais, fenómeno que contribui bastante para a destruição destes materiais de natureza dielétrica, o qual é explicado no capítulo seguinte. Em casos extremos as fraturas dos isoladores podem não ser detetadas e danificar todo o sistema das subestações. Os fenómenos mencionados são consequência de uma distribuição irregular de campo elétrico local ( $E$ ), ponto que compromete a funcionalidade do material isolante.

Visto que a origem das falhas no isolador é detetada muito tardiamente há a necessidade de elaborar formas de deteção destes defeitos. Para realizar uma deteção fidedigna são necessárias medições constantes das grandezas elétricas da peça, de modo a analisar o comportamento da mesma, a prever e evitar defeitos futuros.

Em conjunto com a Indisol, empresa de carácter industrial que se dedica ao dimensionamento e desenvolvimento de isoladores elétricos de AT, verificou-se a necessidade de aperfeiçoar a deteção do sinal das tensões nos seus isoladores. A peça de estudo neste projeto é um isolador de travessia de Trafo de tensão nominal 36 kV. Este tipo de isolador de travessia é bastante utilizado para atravessar placas metálicas com espessura reduzida, a que se sugere a implementação de uma cadeia resistiva, com finalidade de detetar o sinal da tensão do mesmo. O isolador alterado, caso resulte, quando aplicado nos transformadores de subestações, será distinto de outros produzidos pela empresa devido à implementação da deteção de sinal.

Na presente dissertação far-se-á um estudo deste sistema através de um modelo do isolador com a cadeia resistiva implementada e das sucessivas simulações elétricas com auxílio de um *software* de elementos finitos. Para aproximar os resultados das simulações, dos resultados expectáveis dos ensaios em fábrica, propõe-se que o modelo do isolador seja tridimensional, o qual será feito através de um *software* de desenho. Os cenários de falhas no interior do isolador, bem como alteração da dimensão da sua malha corresponderão aos casos de estudo.

Com este projeto deposita-se a esperança de alcançar um modelo que possa atingir os objetivos pretendidos (ensaios em fábrica), e que daí resulte um isolador de travessia com a funcionalidade desejada.

## 1.1 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo implementar uma deteção do sinal da tensão da rede elétrica por uma cadeia resistiva e, com a sua introdução, observar a distribuição de campo elétrico e diferenças de potencial elétrico. Para isso será necessário dimensionar um modelo tridimensional com a cadeia resistiva num *software* de desenho. Com isto propõe-se fazer uma análise do comportamento da cadeia no interior do isolador de travessia através de simulações elétricas, parte essencial deste projeto. Posteriormente a essa análise será indicado qual(is) o(s) modelo(s) a ensaiar. Mais se acrescenta que serão os resultados em fábrica que confirmarão, ou não, a coerência com os modelos dimensionados.

Este projeto vem colmatar as carências no setor industrial dos isoladores, como uma ponte para renovar e trazer novos horizontes à área energética em Portugal e no mundo. O principal objetivo é fazer a leitura do valor da tensão a que o isolador está sujeito através da cadeia resistiva, para prevenir eventuais danos futuros, sendo que para isso há que testar a peça com ensaios de choque e à frequência da rede elétrica.

## 1.2 Motivação

Em conjunto com a empresa de isoladores de AT, Indisol, procura-se a melhoria de um isolador de travessia constituído por elementos resistivos à tensão de 36 kV.

O interesse pela área de AT, juntamente com o tema da dissertação, foram as premissas na intenção de realizar este projeto. A possibilidade de resolução de um problema de elevada complexidade, aliada a uma futura utilização a nível industrial da peça planificada foram pontos aliciantes para a realização desta dissertação.

De modo a melhorar o comportamento do isolador serão ensaiadas as soluções que através de um *software* de elementos finitos se aproximem das características ideais: cadeia resistivas com campos elétricos uniformes, que não comprometam o funcionamento do isolador de travessia às tensões de ensaios.

## 1.3 Estrutura

Este texto contempla a seguinte estrutura:

Capítulo 1: No presente capítulo é evidenciado o objeto de estudo, o objetivo da dissertação, bem como a motivação para desenvolver um projeto nesta área de energias.

Capítulo 2: Abordagem ao atual estado da arte, onde são explícitos os campos de estudo relacionados com o projeto, tal como algumas matérias auxiliares e justificativas para alguns resultados posteriores.

Capítulo 3: É expressa modelação do sistema, a metodologia utilizada para obter os resultados numéricos e considerações para os ensaios em fábrica.

Capítulo 4: Exposição dos resultados dos vários cenários de estudo desta dissertação elaborados pelo *software* de elementos finitos, tal como a sua análise e comparação de resultados.

Capítulo 5: Análise dos resultados dos ensaios em fábrica, na sequência da previsão feita no capítulo anterior. Informação do ensaio do impulso atmosférico que constitui a meta para comercializar o produto.

Capítulo 6: Conclusões sobre a dissertação, tal como alguns trabalhos futuros.

Capítulo 7: Contém a revisão bibliográfica do texto.

Capítulo 8: Anexos que complementam a informação relativa aos ensaios da fábrica.



# 2 Estado da Arte

## 2.1 Distribuição de campo elétrico e potencial elétrico

“O campo elétrico é uma região espacial onde uma carga elétrica sofre uma força em qualquer ponto dessa região” [2]. Outra definição de campo elétrico corresponde à força electrostática aplicada por unidade de carga positiva, localizada num ponto específico do dielétrico. A unidade segundo o Sistema Internacional é o  $\frac{V}{m}$  (volt por metro), equivalente a  $\frac{N}{C}$  (newton por coulomb). Cargas simétricas presentes no campo elétrico são submetidas à mesma força, porém com sentidos opostos.

A tensão entre dois pontos corresponde ao trabalho por unidade de carga, proveniente da força associada ao campo elétrico local, necessário para mover uma carga unitária entre esses pontos, a qual é descrita pela equação 2.1:

$$U_{AB} = \int_A^B E \, dl \quad (2.1)$$

De que se obtém a expressão de campo elétrico uniforme:

$$E = \frac{U_{AB}}{d_{AB}} \quad (2.2)$$

### 2.1.1 Campos elétricos uniformes e não uniformes

A uniformidade do campo elétrico revela-se caso haja um gradiente de tensão igual em todos os pontos da região abrangida pelo campo elétrico, isto é, todos os pontos dessa área são submetidos à mesma força (em magnitude e direção) [2].

É possível medir o grau de uniformidade do campo elétrico,  $\eta$ , também conhecido pelo fator *Schwaiger*, pelo rácio da média de picos de campo elétrico ( $\hat{E}_{mean}$ ) com o campo elétrico máximo ( $\hat{E}_{max}$ ), apresentado na equação 2.3 [3]:

$$\eta = \frac{\hat{E}_{mean}}{\hat{E}_{max}} = \frac{\bar{v}}{d} \cdot \frac{1}{\hat{E}_{max}} \quad (2.3)$$

O coeficiente  $\eta$  é adimensional e pode ser usado como grau de comparação entre os campos formados nas diferentes configurações de elétrodos. Apenas regista valores entre zero e um, com o majorante a representar uniformidade de campo [3]. Como se confirma pela Figura 2.1, a configuração dos elétrodos tem bastante influência na distribuição do campo e na sua tensão.

Os campos uniformes distinguem-se dos demais, porque as possíveis quebras no isolamento não se relacionam com a ocorrência de descargas parciais intrínsecas ao dielétrico. O comportamento dos campos não uniformes é diferente, pois nos momentos de pré-descarga o isolamento apresenta comportamentos instáveis.

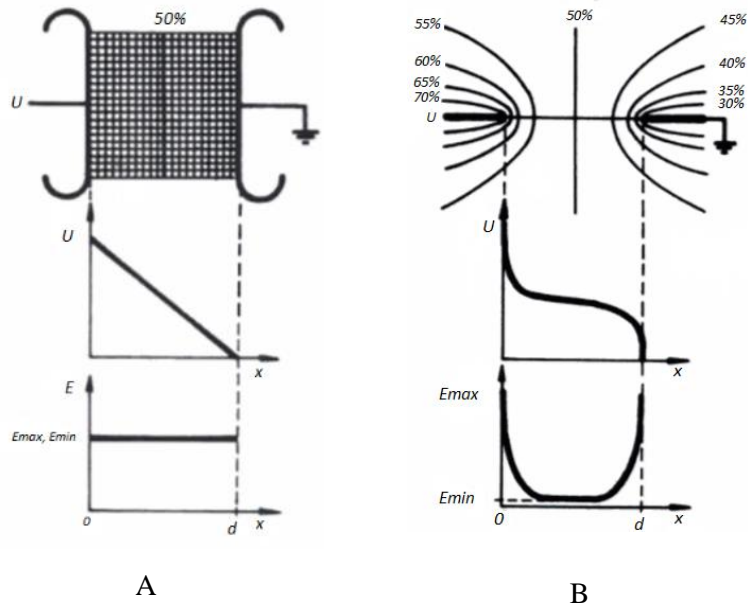


Figura 2.1-Comparação entre campos uniformes e não uniformes. A - Campo uniforme entre duas placas paralelas. B - Campo não uniforme entre dois elétrodos pontiagudos (adaptado de [3]).

Um exemplo onde a distribuição de campo elétrico é não uniforme acontece nos isoladores de AT isolados por  $SF_6$  (em estado gasoso) e nesse caso o seu valor depende do formato geométrico e permitividade dos componentes isolantes [3].

Em cabos coaxiais verifica-se a não-uniformidade de campo elétrico descrita pela equação 2.4,

$$E(r) = \frac{U}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \times \frac{1}{r} \quad (2.4)$$

onde  $U$  corresponde à tensão aplicada entre os elétrodos,  $R_2$  corresponde ao raio total do fio,  $R_1$  corresponde ao raio do condutor interior e  $r$  é a distância de ionização variável entre  $R_1$  e  $R_2$ , tal como se observa pela Figura 2.2. A ionização ocorre quando  $E(r)$  é maior que o campo de ruptura ( $E_d$ ). Da equação 2.4 o campo elétrico tem o seu valor máximo quando  $r$  é mínimo ( $r=R_1$ ). Caso aconteça ionização no valor máximo de campo elétrico este fenómeno verifica-se junto ao condutor interior, o que se traduz numa coroa de gás ionizado, que é equivalente a  $R_1$  crescer e à intensidade de campo elétrico diminuir. No entanto, se  $R_1$  crescer instantaneamente para o comprovado valor limiar de  $0,368 R_2$  causa instabilidade na manga ionizada e o risco de ocorrência de descargas elétricas por efeito de coroa (explicado mais à frente) é muito maior [4]. Para evitar esses fenómenos são bastante utilizados os anéis de Nicholson nas linhas de transmissão de energia, os quais protegem os isoladores de arcos elétricos [5].

Os campos elétricos em AT têm efeitos cruciais no desempenho dos materiais isoladores, com hipótese de provocar ruptura, ponto que é abordado a seguir com maior detalhe.

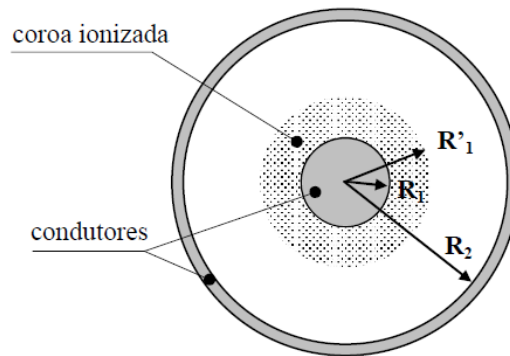


Figura 2.2-Esquema de um cabo coaxial (Fonte: [4]).

### 2.1.2 Métodos de simulação

Para a resolução de problemas existem métodos coerentes e meios para simular essas resoluções e comprovar os resultados. A intensidade díspar de campo elétrico é um dos problemas associados à distribuição de campo e, de modo a entender o que potencia este fenómeno são feitas análises ao sistema com o auxílio de métodos numéricos computacionais, das quais se destacam [3], [5]:

- Método de elementos finitos:

Com *software* especializado, a região em estudo é dividida em conjuntos de figuras geométricas que permitem entender as propriedades do objeto, a disposição de campo elétrico ou outras grandezas elétricas;

- Método de diferenças finitas:

Consiste numa abordagem matemática que chega a uma solução numérica aproximada através da resolução de equações diferenciais parciais, particularmente utilizada em cenários com campos simétricos de uma ou duas dimensões.

Estes métodos avaliam o cenário a que o material isolante está sujeito. Na presença de problemas existe a possibilidade de alterar e redimensionar a abordagem dos métodos a fim de obter melhorias.

## 2.2 Descargas Parciais

Os isoladores elétricos são materiais que suportam elevados campos elétricos sem fluidez de carga elétrica, ou seja, têm como principal função bloquear a passagem de corrente elétrica através dos seus altos valores de resistividade. Porém, quando submetidos frequentemente a altas tensões, poderá haver a ocorrência de descargas parciais (DP's). Este fenómeno sucede-se numa zona do dielétrico (gás, sólido ou líquido) em que a sua intensidade do campo elétrico ultrapassa o valor do campo de disrupção do mesmo material. Este campo de disrupção corresponde à intensidade de campo elétrico a que o isolador tem de estar sujeito para ocorrer ionização e o dielétrico deixar de assumir comportamento isolante. DP segundo *Arora e Mosch* [3] é definida como “uma descarga elétrica que não estabelece contacto total entre o par de eléctrodos de um sistema que está sujeito a um campo elétrico”.

As DP's subdividem-se em três categorias, consoante o local onde ocorrem, sendo que podem ser observadas na Figura 2.4 e são descritas de seguida.

- Descargas parciais internas [6]:

Podem ocorrer em cavidades ou vazios gasosos de isoladores líquidos ou sólidos que tenham diferenças de constantes dielétricas ( $\epsilon_r$ ) no seu interior. Este fator proporciona que esses buracos fiquem preenchidos com gás (sendo indefinido qual é). Na presença de campos elétricos não uniformes há DP's que podem originar arborescências elétricas (disrupções que ocorrem continuamente no interior do isolador), as quais provém da elevada frequência destas descargas em espaços vazios e alastram-se no meio isolante. A ocorrência destes fenómenos causa danos intrínsecos à função do isolador do material.

Na Figura 2.3 A é possível observar as capacidades que são formadas devido à geometria do material isolante e na Figura 2.3 B o seu circuito equivalente. Da análise deste circuito entende-se que quando a capacidade  $C_c$  estiver carregada à tensão  $V_c$ , o interruptor  $S$  fecha e ocorre uma DP no vazio, que eletricamente corresponde à capacidade  $C_c$ . Esta DP é reproduzida pela corrente  $I_c$  e a resistência  $R_c$  no circuito equivalente define um valor finito para essa corrente.

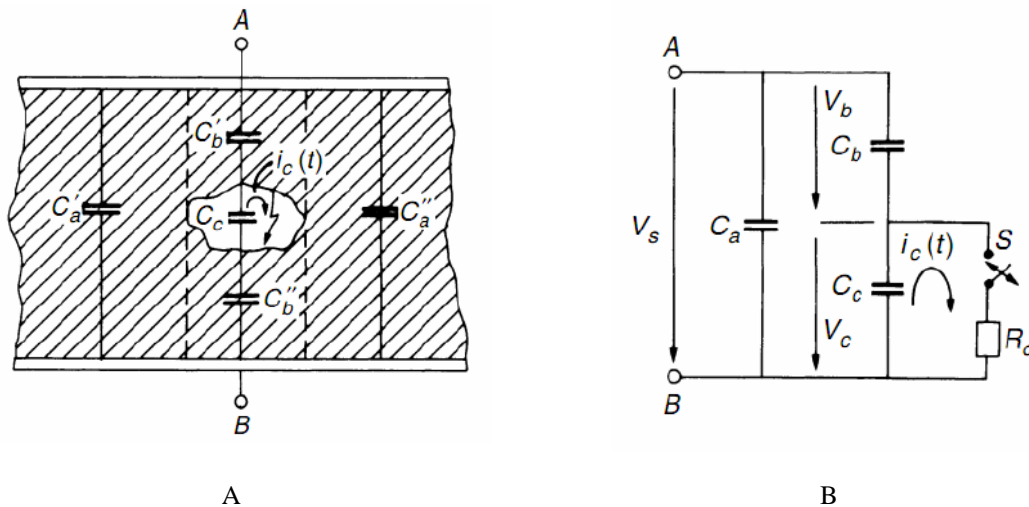


Figura 2.3-Descargas parciais em isoladores. A - Modelo elétrico de uma descarga parcial no interior do isolador. B - Circuito equivalente (Adaptado de: [6])

- Descargas parciais externas ou superficiais:

Estas descargas superficiais acontecem como resultado da interação de sólidos ou líquidos com meios gasosos, devido à permissividade elétrica dos últimos ser maior que a dos primeiros. Daí que este tipo de DP ocorra sobre a superfície do dielétrico no caso de um forte campo elétrico resultante dessa interação [3].

- Descargas por efeito de coroa:

Este é um caso muito peculiar pelo impacto visual e audível que produz. Estes tipos de descargas acontecem pela ionização de gases presentes entre dois elétrodos. Ocorrem geralmente entre elétrodos assimétricos, sendo um bastante curvilíneo e o outro uma superfície bastante plana. Como as pontas agudas são pontos afiados, possuem diminutos raios de curvatura e conseqüentemente provocam um campo elétrico não uniforme de elevada intensidade nas vizinhanças [2],[6].



Figura 2.4-Categorias de DP's. A: externa, B: externa-efeito coroa, C: interna (Fonte: [7]).

É de referir que em campos elétricos fracamente não-uniformes num meio gasoso ( $\eta$  perto de 0,5), as DP's têm uma probabilidade muito reduzida de ocorrerem. Já em campos extremamente não uniformes é mais provável acontecer uma DP na zona onde o campo elétrico aplicado seja maior ou igual ao valor do campo de disrupção do material [3].

### 2.2.1 Princípios da descarga parcial

O fenómeno das DP's pode ser entendido como o colapso do isolador. Uma condição essencial para a sua ocorrência é o campo elétrico ser obrigatoriamente superior à rigidez dielétrica ( $E_d$ ) do meio, para que dessa forma ocorra disrupção.

O mecanismo de Townsend reflete este tipo de descargas num meio gasoso com dois elétrodos de placas paralelas. Neste mecanismo a ionização resulta da incidência de radiação UV na superfície do cátodo.

Considere-se um par de elétrodos (ânodo e um cátodo), ligados a uma fonte de tensão variável. Estes elétrodos têm associado um campo elétrico uniforme em todos os pontos da superfície que varia proporcionalmente com a tensão que lhe é aplicada, como se verifica pela equação 2.2. Este fenómeno encontra-se espelhado na Figura 2.5.

No início, zona linear I, a corrente na cavidade cresce de forma linear com a tensão aplicada. Neste intervalo são emitidos cada vez mais fotoelétrões do cátodo para o ânodo na mesma proporção que a tensão aumenta e como tal a corrente também aumenta no valor de  $I = \epsilon n$ , onde  $n$  é o número de eletrões que atingem o ânodo por segundo. Porém a saturação é atingida na tensão  $V_1$ , pois o número de eletrões que se dirigem para o ânodo ( $n_A$ ) por unidade de tempo é igual, pelo que a corrente é constante, a qual se denomina de corrente de saturação ( $I_0$ ).

Na zona de saturação (zona II), mesmo que a tensão aumente, a corrente não cresce, pois, o número de eletrões que se dirigem para o ânodo por unidade de tempo é constante. Neste patamar a tensão ainda não é elevada o suficiente, de modo a que possibilite a ionização dos átomos (resultante da colisão com moléculas de gás) e formação de novos eletrões.

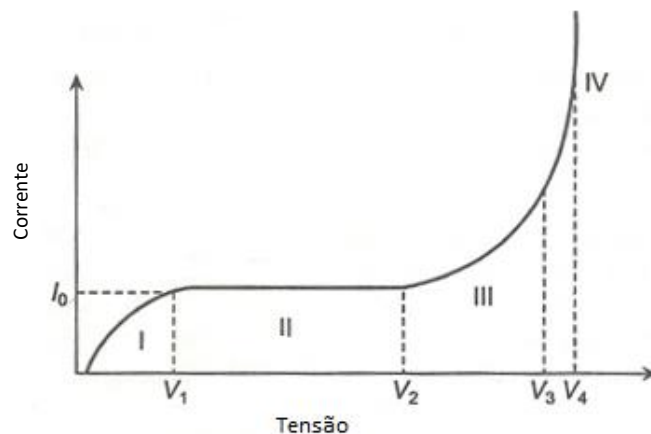


Figura 2.5-Mecanismo de Townsend: Evolução de tensão/corrente numa descarga em alta tensão (adaptado de [2]).

Na zona III o aumento da tensão permite a agitação dos eletrões, de modo a permitir nova ionização e fluidez de mais eletrões por segundo em direção ao ânodo, pelo que a corrente é descrita pela equação 2.5:

$$I_A = \epsilon n_A = \epsilon n_0 e^{\alpha d} = I_0 e^{\alpha d} \quad (2.5)$$

onde  $I_0$  corresponde à corrente inicial provocada no cátodo através da radiação UV. Esta cresce exponencialmente devido ao fator  $\alpha$ , que corresponde ao primeiro coeficiente de ionização de Townsend, definindo  $e^{\alpha d}$  como o número de eletrões produzidos por um “eletrão-mãe” que se direciona do cátodo para o ânodo e cuja multiplicação de eletrões pode ser observada na Figura 2.6. No seu percurso este eletrão choca com moléculas de gás, das quais são removidos eletrões, iniciando-se o processo de ionização. Esses eletrões removidos repetirão o processo do seu antecessor, criando uma avalanche de eletrões em direção ao ânodo denominada teoria da avalanche.

Por outras palavras, se o campo elétrico aplicado no cátodo for maior que o campo elétrico de disrupção  $E_d$ , inicia-se o fenómeno da avalanche.

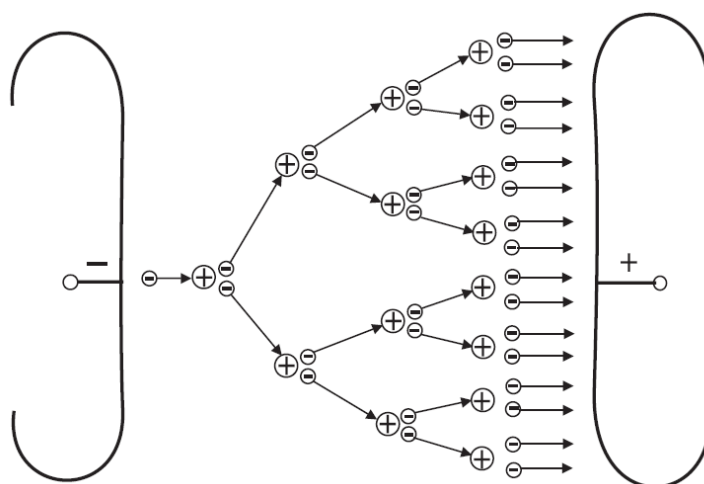


Figura 2.6-Avalanche de eletrões em campo uniforme iniciada pelo “eletrão-mãe” (Fonte: [3]).

Porém ao observar que a corrente era influenciada por iões, Townsend sugeriu que havia um segundo mecanismo a afetar a corrente, onde surge  $\gamma$ , o segundo coeficiente de ionização. Esse coeficiente reflete o número de eletrões removidos do cátodo pelo choque com iões positivos.

Através do efeito dos dois coeficientes de ionização a expressão do crescimento da corrente, que tem influência na origem da descarga parcial é:

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.6)$$

Se o denominador da equação 2.6 for zero:  $\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$ , define a circunstância necessária para o início da descarga, pois é quando a corrente tende para valores infinitos. Geralmente  $e^{\alpha d} \gg 1$ , portanto pode se aproximar  $e^{\alpha d} - 1 \approx e^{\alpha d}$ , daí que esta condição é aproximada a  $\gamma e^{\alpha d} \approx 1$  e é reconhecida como critério de Townsend. Ambos os coeficientes de Townsend dependem da intensidade de campo elétrico entre o cátodo e ânodo [2],[6].

### 2.2.2 Detecção de descargas parciais

Como referido anteriormente as descargas parciais regulares provocam danos graves no dielétrico, isto é, se um isolador elétrico for sujeito continuamente a esforços mecânicos, térmicos e elétricos através de elevados campos elétricos pode entrar em disrupção. Os principais resultados deste fenómeno são interferência eletromagnética, ruído, geração de gases e perdas de potência.

A análise destes fenómenos promove um diagnóstico do estado do material e antecipa defeitos futuros. Pelos problemas que as descargas parciais representam foi necessário delinear técnicas do seu reconhecimento. Inicialmente apenas era possível registar as descargas pulsantes através de oscilógrafos, porém com o evoluir da tecnologia alguns métodos desenvolveram-se bastante, distinguindo-se em diretos e indiretos [3],[8].

- Método Direto

Para fazer uma deteção direta do estado do dielétrico conecta-se a este um circuito elétrico para se observar a intensidade de carga da DP. Os circuitos usados na medida das descargas parciais estão divididos em dois tipos, sendo que apenas é descrito o utilizado nos ensaios em fábrica.

O circuito utilizado na Indisol está de acordo com a norma IEC 60270 [9], que é o circuito A, como se observa pelo exemplo da Figura 2.7 A. Este circuito é alimentado por uma fonte de AT C.A., à qual está ligada em série uma impedância que funciona como filtro, pois apesar do circuito estar contido dentro de uma gaiola de Faraday de modo a excluir perturbações exteriores, a fonte C.A. pode estar sujeita a ruído, e portanto, o filtro serve para limpar o sinal proveniente da fonte. Em série com esse filtro está: o objeto a testar,  $C_a$  (ou *DUT – Device under test*), que está em paralelo com um condensador de acoplamento  $C_k$  e o mesmo está em série com uma impedância de medida ( $Z_{mi}$ ).

Ora este ensaio consiste em registar a ocorrência dos eventos de DP's por meio do conjunto  $Z_{mi}$ , onde CD é o dispositivo de acoplamento, CC o cabo de conexão e MI o instrumento de medida. Isto sucede-se quando em resposta aos pulsos de tensão aplicados há a ocorrência de arcos elétricos que podem criar DP's na travessia. Estes fenómenos proporcionam uma alteração da capacidade relativa entre  $C_k$  e  $C_a$ , ou seja, uma movimentação de carga elétrica para a armadura inferior de  $C_k$  (condensador de acoplamento) devido à diminuição da capacidade do dispositivo de estudo ( $C_a$ ). Esta modificação da capacidade relativa é amostrada por um pulso de corrente (ocorrência de nano segundos) e é detetada na impedância de medida. O valor de corrente registada é sucessivamente passado por *software* para carga elétrica, assinalando-se no instrumento de medida o valor da descarga parcial em pC (pico coulomb). Esta carga é designada de “carga aparente”, por ser no instrumento de medida que é espelhado o valor das DP's da travessia e não diretamente na própria [3]. De referir que para este circuito funcionar, a capacidade de acoplamento ( $C_k$ ) tem de ser maior que a capacidade do objeto de estudo ( $C_a$ ).

A única diferença entre os dois circuitos da detecção direta consiste onde é colocada a impedância de medida. No circuito A, a impedância de medida é colocada em série com o condensador de acoplamento, e no circuito B é colocada em série com o dielétrico em estudo, como se observa pela Figura 2.7. Apesar dos resultados com o circuito B serem mais precisos, este circuito tem uma desvantagem: se houver uma falha na carga de prova ( $C_a$ ), a impedância de medida será danificada e daí ser o primeiro circuito o mais usado.

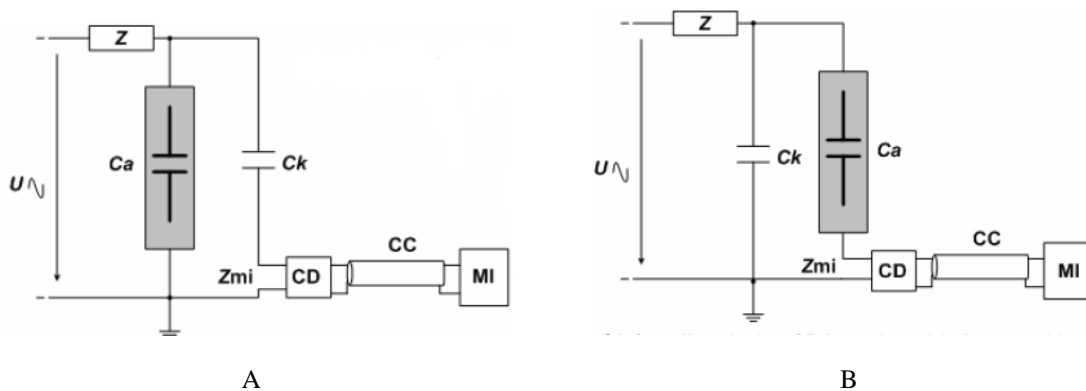


Figura 2.7-Circuitos de detecção de DP's de acordo com a norma IEC 60270. A - Circuito A. B - Circuito B (Fonte: [8]).

A detecção elétrica das DP's pode ser feita de duas maneiras:

- Detecção com resolução em ângulo de fase [10],[11]:

Esta detecção é feita pelo circuito clássico de detecção de DP's, circuito A, numa largura de banda até 250 kHz. Este método amostra a onda de tensão original da fonte de alimentação C.A. sobreposta pelos pulsos de corrente (intervalados entre  $1 \mu s$ ), que caracterizam as DP's em amplitude e fase em que ocorrem, tal como se observa na Figura 2.8.

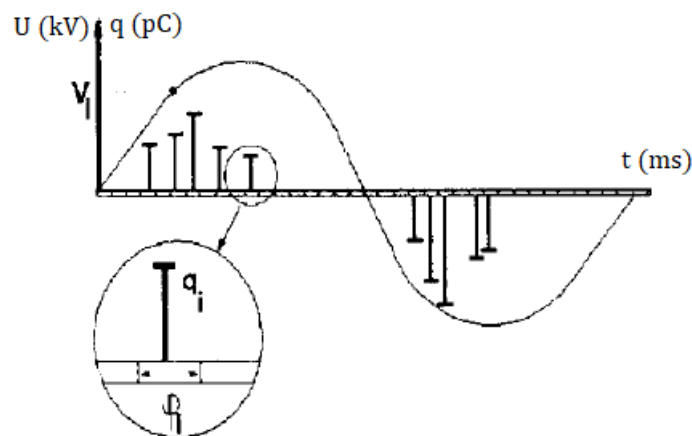


Figura 2.8-Exemplo de detecção de DP's com resolução de ângulo de fase. (Adaptado de:[10]).

Com os dados referidos e análise da distribuição estatística das suas ocorrências é possível estabelecer uma correspondência entre os pulsos das DP's e o tipo de descarga parcial. As Figura 2.9 A e B contêm ambas o sinal de resposta (com representações diferentes) registado nos aparelhos de detecção de DP's. Nesta segunda figura a letra 'o' designa o sinal na fase quando este é um real puro e, os operadores '+' e '-' atribui a imaginários puros positivo e negativo, respetivamente. De assinalar que na

representação da elipse a onda percorre o sentido horário, ao contrário do que acontece no conhecido referencial cartesiano.

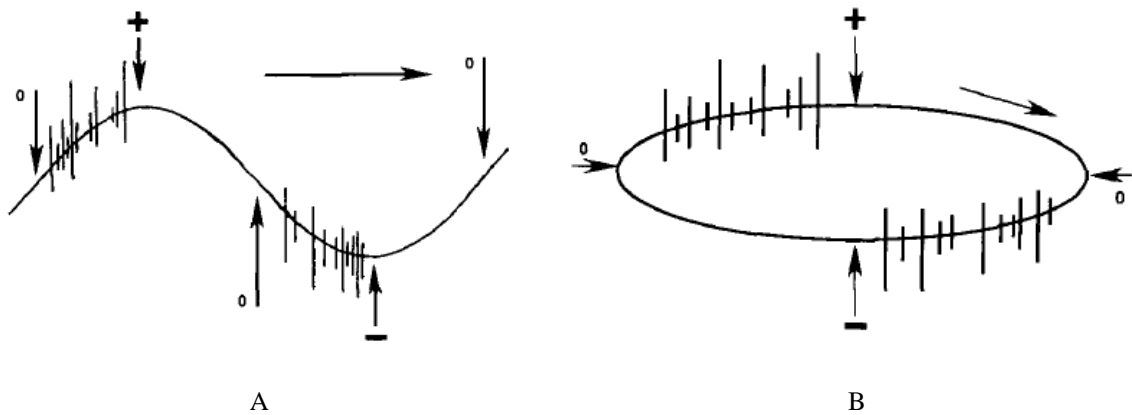


Figura 2.9-Deteção de DP's. A-Representação sinusoidal. B-Representação elíptica (Fonte: [12]).

Segundo os estudos de *Gulski* [10], [11] e de *Natrrass* [12] atribuem-se DP's a vários padrões, dos quais se destacam:

- Descarga por efeito de coroa: descarga que ocorre unicamente na metade de um ciclo, de forma assimétrica, alinhada com a tensão máxima, com intensidade e frequência constantes. A DP e o padrão encontram-se representados na Figura 2.10.

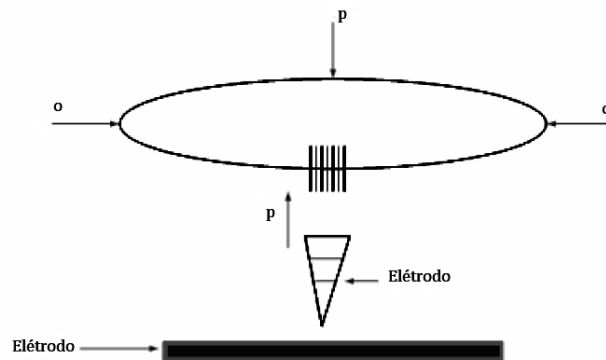


Figura 2.10-Descarga por efeito de coroa com respetivo padrão (Adaptado: [12]).

- Descarga externa da interação com gás ou óleo: as descargas estão em avanço à tensão de teste e a sua ocorrência é proporcional com tensão de teste. A intensidade das descargas e sua localização num ciclo é aleatória. A DP e o padrão encontram-se representados na Figura 2.11.

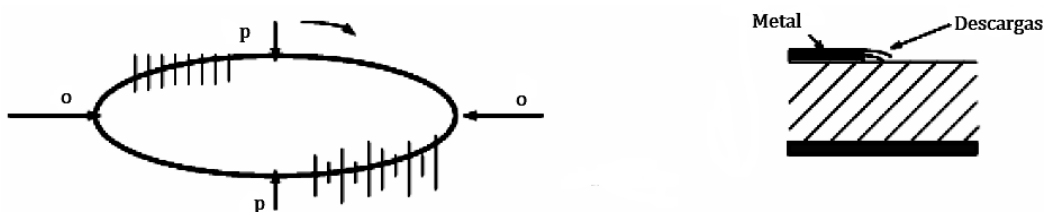


Figura 2.11-Descarga à superfície do isolador com respetivo padrão (Adaptado: [12]).

- Descargas internas em cavidades gasosas ou de óleo: descargas que acontecem simetricamente no primeiro e terceiro quadrante, com amplitudes que oscilam bastante durante o ciclo. A DP e o padrão encontram-se representados na Figura 2.12.

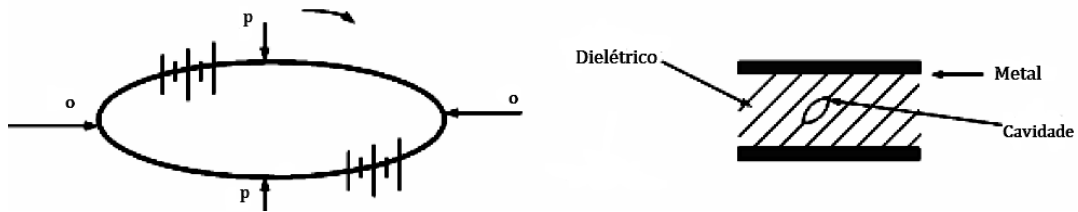


Figura 2.12-Descarga interna com respetivo padrão (Adaptado: [12]).

- Descargas por arborescências elétricas: as descargas estão em avanço com a tensão de teste, mas são assimétricas no ciclo e não têm um comportamento linear quanto à sua amplitude e localização. A DP e o padrão encontram-se representados na Figura 2.13.

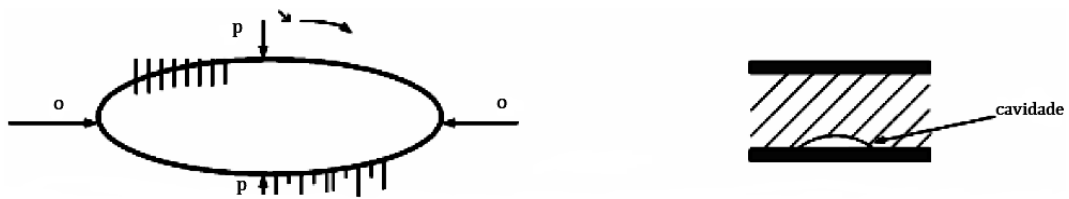


Figura 2.13-Descarga em arborescência elétrica com respetivo padrão (Adaptado: [12]).

- Descargas por mau contacto: é igual ao padrão da descarga interna porque devido à má conexão dos condutores existem cavidades gasosas ou com óleo. A DP e o padrão encontram-se representados na Figura 2.14.

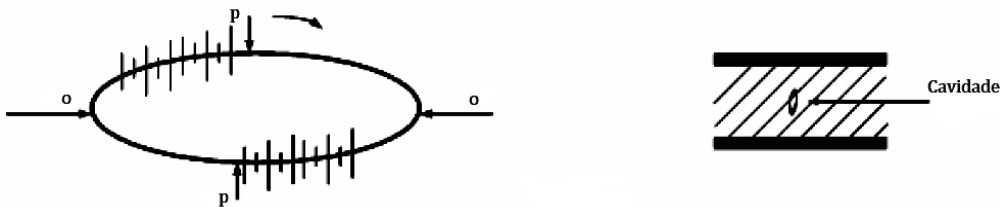


Figura 2.14-Descarga devido a componentes flutuantes com respetivo padrão (Adaptado: [12]).

- Descargas provenientes de ruído associado à fraca ligação terra do isolador: as descargas têm uma distribuição simétrica no ciclo de tensão, mas irregular na amplitude e com valor nulo nas tensões de pico. O padrão desta descarga encontra-se representado na Figura 2.15.

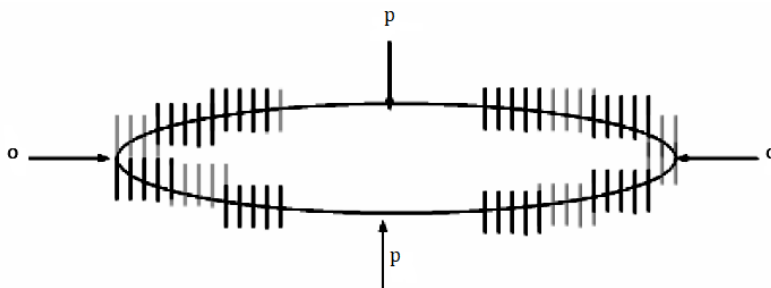


Figura 2.15-Padrão do ruído de contacto (Adaptado: [12]).

Com estes padrões predefinidos a análise das DP's com resolução em ângulo de fase constitui um ponto de comparação para melhorar a conceção e posterior desempenho dos isoladores.

➤ Detecção com resolução temporal [11],[13]:

Esta deteção é feita pelo circuito B de deteção de DP's, representado na Figura 2.7 B numa largura de banda entre os 500 e os 1000 MHz. Este processo consiste em observar o comportamento que o pulso da DP estabelece no domínio do tempo, pelas seguintes características: amplitude do pico, área do pulso, tempo de subida e descida, e largura do pulso à meia altura. Da análise destes atributos classifica-se o tipo de descarga associada e inspeciona-se os seus estragos no isolador. Contudo este método tem algumas diferenças em relação ao anterior: tem a desvantagem de não ser fácil de usar nas medições de DP's em ambientes industriais; nos transformadores de potência, o pulso é distorcido no caminho entre a DP e o seu meio de deteção, o que torna o sinal incoerente. Mas fora desse contexto, a interpretação do sinal apresenta relação direta com as características físicas da DP. Até mesmo o estado de envelhecimento do isolador é reconhecido por este método.

Por último *Gulski* [11] afirma que as interferências externas a altas frequências são menos influentes que na banda de frequências dos circuitos de deteção de DP's clássicos. Um exemplo desta deteção está exposto na Figura 2.16.

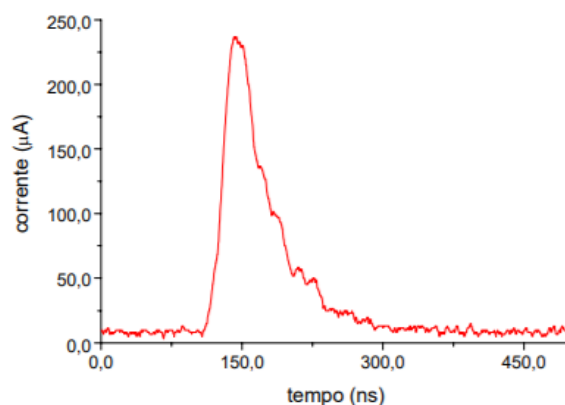


Figura 2.16-Exemplo de deteção de DP's com resolução temporal. (Fonte: [13])

• Método Indireto

Nesta técnica as medições são feitas com auxílio de ferramentas auxiliares, que não fazem parte de um circuito elétrico como no método anterior A deteção nesta categoria divide-se em três métodos: óptico, acústico e químico:

➤ Método óptico:

A luz emitida pela descarga é registada por um tubo fotomultiplicador<sup>1</sup>, que faz um estudo relativo à frequência. Este método tem a vantagem sobre outros de não sofrer interferência eletromagnética. Porém um baixo nível de sensibilidade revela resultados pouco fiáveis, o que limita a sua aplicação [14].

➤ Método acústico.

O ruído acústico reproduzido nas descargas por efeito de coroa é matéria de estudo deste método. Com transdutores vibrantes e sensores ultrassónicos é possível fazer uma recolha do ruído e localizar as descargas por efeito de coroa num ambiente GIS. No entanto o ruído a que são submetidas altera a sua sensibilidade ao longo do tempo, impedindo uma deteção coerente durante o tempo de aplicação desejado [3],[8].

<sup>1</sup> Tubo fotomultiplicador – dispositivo eletrónico que converte a luz recebida (fotões) em impulsos elétricos, que são amplificados para posterior processamento do sinal [28].

➤ Método químico:

Esta técnica é menosprezada por ser apenas aplicada em componentes com isolamento de óleo. As descargas parciais podem ser detetadas quimicamente por duas formas: análise de gases dissolvidos (DGA) e cromatografia de alto desempenho (HPLC). O teste de DGA identifica os gases resultantes da ruptura do óleo que conseqüentemente auxiliam na previsão acerca do tipo de falha. O teste de HPLC mede a degradação do isolamento de papel, especificamente da celulose e as suas subcomponentes. Estes tipos de teste químicos são inconclusivos quanto à origem e intensidade da descarga [14].

### 2.2.3 Consequências das descargas parciais

Além da conhecida razão para a ocorrência de descargas parciais estas podem ocorrer devido a defeitos de fabrico: produção irregular da estrutura do isolante, que sucede numa distribuição de campo não uniforme. Estas descargas trazem anomalias, como reações químicas de gases (oxigénio, ozono e seus radicais) e emissão de iões contra a superfície da cavidade. Esses fatores têm como conseqüências: a degradação térmica, alteração dos campos eletromagnéticos, fissura na estrutura polimérica do isolador e conseqüentemente perda das propriedades isolantes do material [7]. Visto que o princípio das descargas depende sempre do material em questão (dielétrico), testes periódicos para deteção e prevenção auxiliam o prolongamento do tempo de vida destes dispositivos essenciais na AT.

## 2.3 Isoladores de AT

Os isoladores têm um papel fundamental na AT, pois protegem elétrica e mecanicamente os condutores.

### 2.3.1 Tipos

Existem dois tipos de isoladores [15]:

- Isoladores de apoio: costumam estar dispostos em cadeia nos postes de AT e têm como função suportar os condutores;
- Isoladores de travessia: corresponde ao isolador, que se irá estudar nesta dissertação. São isoladores ocios, que permitem a passagem e isolamento de um condutor entre dois meios, que estejam separados por paredes ou barreiras, tal como na Figura 2.17. Na indústria os isoladores de travessia são muitas vezes designados informalmente apenas por “travessias”. Acompanhando esta designação industrial, neste texto será usado várias vezes o nome substantivo “travessia” com o sentido de “isolador de travessia”.

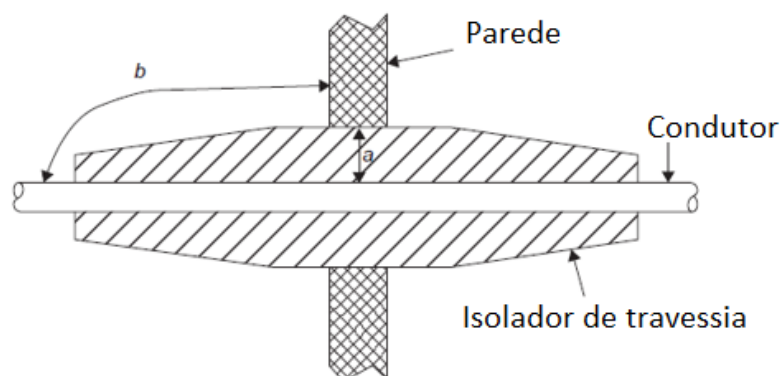


Figura 2.17-Estrutura de um isolador de travessia do tipo não-condensador (adaptado de [15]).

É dado adquirido que no passado as travessias acima de 30 kV apresentavam problemas. Assim foi implementado um novo modelo, onde a carcaça passou a ser constituída por uma massa isolante, o que aumentou a constante dielétrica do meio. Ora considerando um tubo com um fluxo de densidade de carga constante (equação 2.7), se a constante dielétrica do meio sobe o campo elétrico desce na mesma proporção.

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (2.7)$$

Desta forma este novo modelo passou a obedecer às exigências para tensões acima de 30 kV [5],[15]. As travessias são distinguidas pelas suas constituições e formatos.

### 2.3.1.1 Isolador de travessia não-capacitivo

Este tipo de isolador é constituído por um condutor envolvido por material isolante (dielétrico), em geral costuma ser porcelana, vidro ou polímero. O modelo constituído por polímero é mais utilizado que as outras devido às seguintes características: menor peso, fácil construção, baixo custo e pelas suas propriedades hidrofóbicas<sup>2</sup>, algo que as favorece por manterem o desempenho em condições ambientais adversas. Um exemplo de um polímero é a resina *epoxy*, que é o dielétrico constituinte da travessia de estudo deste texto.

Da observação do exemplo de uma travessia que atravessa uma parede, presente na Figura 2.17, retira-se que o estudo radial do campo elétrico no seu interior faz-se segundo a medida (a) e o resultado está exposto na Figura 2.18 A. Já a superfície exterior da travessia sofre a ação de um campo elétrico axial do meio envolvente segundo a medida (b) e cujo estudo está representado na Figura 2.18 B.

Pela Figura 2.18 A percebe-se que radialmente o campo elétrico é bastante intenso devido à elevada queda de tensão que há num curto raio, algo que pode proporcionar uma DP e conseqüente redução do tempo de vida. Na Figura 2.18 B percebe-se que a subida da tensão no exterior da travessia, segundo a medida (b) é não uniforme. O aumento repentino de tensão é explicado pela curta linha de fuga que a travessia tem e não está preparada para a elevada tensão a que está submetida. A reduzida linha de fuga implicitamente aumenta a concentração de campo elétrico sobre o isolador, algo que em casos extremos pode desencadear arcos elétricos na sua superfície exterior e se a tensão aplicada aumentar, torna-se incomportável. De acordo com o ambiente em que esteja inserido, se o isolador contiver água na sua superfície exterior, cria um canal condutor nesse espaço que torna a peça mais vulnerável ao contornamento [15].

---

<sup>2</sup> Propriedades hidrofóbicas – característica de um material que não se dissolve na presença de água.

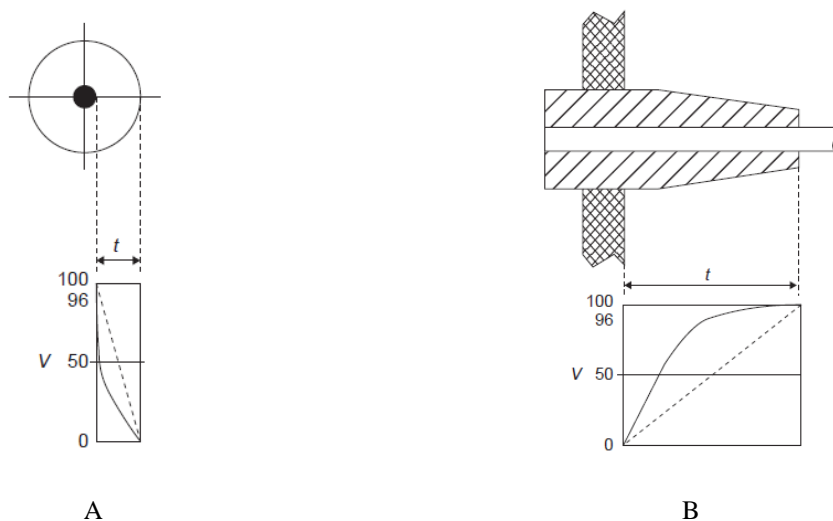


Figura 2.18-Potencial elétrico na travessia do tipo não-condensador. A-Distribuição radial segundo a medida (a). B - Distribuição axial segundo a medida (b) (Fonte: [13]).

A linha de fuga, também denominada de linha de isolamento, é a distância que a corrente tem de fazer entre os terminais de AT e Terra, percorrendo um caminho que corresponde à interface entre a superfície do isolador e o seu meio envolvente. A unidade da linha de fuga é explícita em mm/kV.

Nestes isoladores é prioritário aumentar o máximo possível a linha de fuga para aumentar a resistência à superfície do isolador e minimizar a intensidade das correntes de fuga. Modelos comuns deste tipo de isolador têm a sua camada exterior moldada numa série de capas concêntricas, com formas achatadas que permitem aumentar o comprimento da linha de fuga. Um exemplo da aplicação referida é o isolador polimérico com capas de silicone que está representado na Figura 2.19 e tem excelentes desempenhos em ambientes de poluição [16].

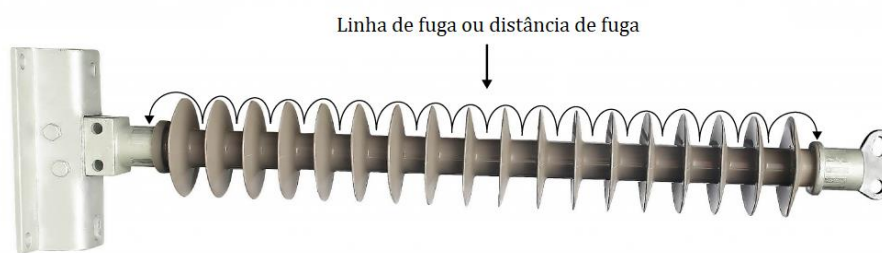


Figura 2.19-Exemplo de representação de linha de fuga num isolador polimérico (Adaptado de: [16]).

Tendo em conta as aplicações das travessias, para obter uma distribuição mais uniforme na sua superfície exterior, são abordadas duas soluções:

- Proteção Termo retrátil

O isolador é envolto por uma proteção termo retrátil, feita de um material isolante (borracha ou silicone), que a altas temperaturas contrai e adere totalmente à superfície do isolador aumentando o isolamento (pois a constante dielétrica  $\epsilon$  também aumenta). Como este material filtra a travessia do ar,

consequentemente o campo de disrupção do isolador sobe e, a probabilidade de ocorrência de DP's e contornamento na superfície diminui. O material em questão está representado na Figura 2.20.

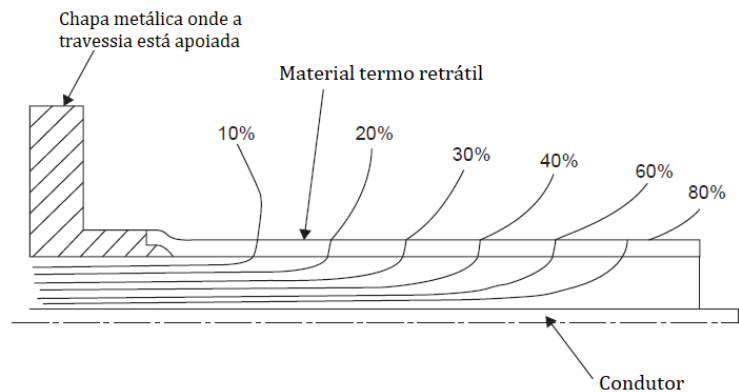


Figura 2.20-Controlo de campo elétrico através de material termo retrátil (adaptado de [15]).

- Conector *Plug in*:

Em aplicações que se faça a ligação de cabos de AT a equipamentos elétricos (transformadores, motores ou aparelhagens) através da travessia, é prioritário anular a sua linha de fuga com a utilização de uma proteção, denominada em inglês de “*separable connector plug-in*”, cujo exemplo está visível na Figura 2.21. Esta proteção é composta por dois materiais: o material interior é dielétrico (para isolar a superfície exterior da travessia) e o material exterior é condutor (para estar ao mesmo potencial da parede que vai atravessar). O conector tem um formato em “T”, onde pelo orifício inferior é ligado o cabo de AT, no da esquerda é ligada a travessia, que fará a extensão desse cabo ao aparelho elétrico respetivo e no da direita fica tapado. O objetivo de ter um sistema equipotencial (que costuma ser a terra) é que assim o campo elétrico do isolador não sofre interferências exteriores por estar completamente isolado [17].

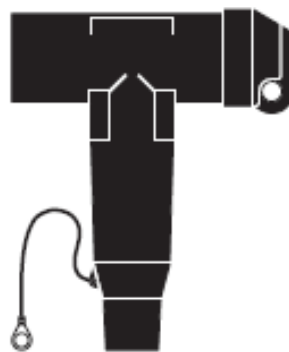


Figura 2.21-Conector *plug-in* (Fonte: [17]).

Segundo a constituição do material isolante, os isoladores de travessia do tipo não-capacitivo dividem-se em:

- Compósito:

A travessia é composta por duas ou mais camadas coaxiais de diferentes tipos de dielétricos;

- A óleo:

Na travessia o espaço entre o condutor e o isolante sólido é cheio com óleo de isolamento;

- Sólido:

A travessia é composta somente por um material isolante, que pode ser maciço, por exemplo cerâmico. É neste tipo que a travessia de estudo se enquadra, por ser composta apenas por resina *epoxy*.

### 2.3.1.2 Isolador de travessia capacitivo

A constituição do isolador de travessia capacitivo é feita com várias (N) camadas cilíndricas condutoras, concêntricas com o condutor cilíndrico que atravessa a travessia como se observa na Figura 2.22. As camadas estão eletricamente flutuantes, e as suas alturas vão decrescendo do condutor para a superfície exterior. Cada face de uma camada concêntrica adjacente à seguinte forma a capacidade de um condensador. Assim, entre o condutor vivo e a parede passam a existir N+1 condensadores em série, concêntricos e de alturas decrescentes.

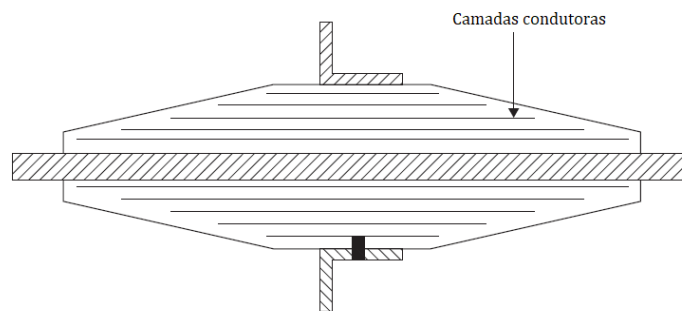


Figura 2.22-Isolador de travessia do tipo condensador (Adaptado de: [15]).

Cada camada metálica terá cargas simétricas numa e noutra face, mas na face exterior a carga distribui-se por uma menor área, tendo por isso maior densidade superficial de carga ( $\sigma$ ). Portanto, o campo elétrico à superfície do metal, em módulo, é maior na face exterior de uma camada que na interior.

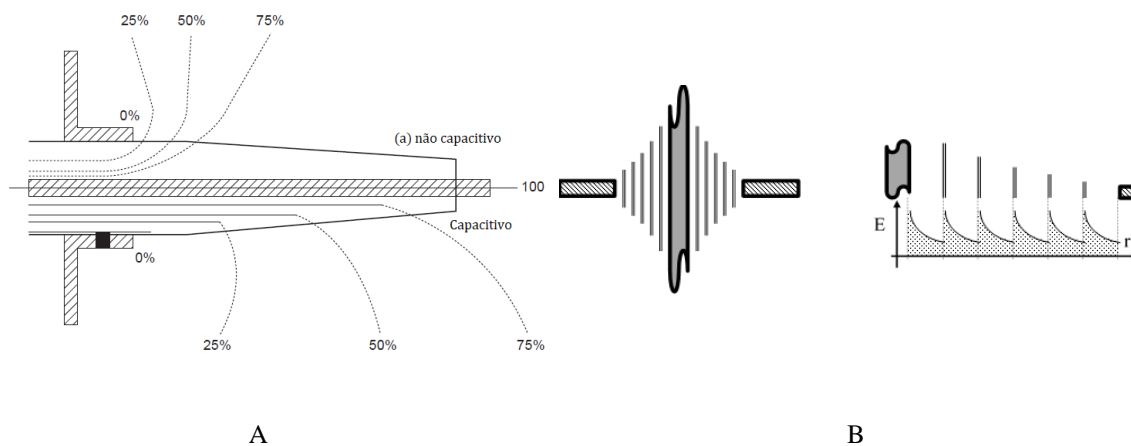


Figura 2.23-A - Distribuição de campo elétrico num isolador de travessia capacitivo e não capacitivo. B - Campo elétrico na travessia que varia radialmente (Adaptado de: [15]).

Numa estrutura cilíndrica o campo decresce inversamente com o raio, sendo que o seu gráfico apresenta o comportamento de uma hipérbole, porém o súbito aumento de  $\sigma$  ao atravessar uma camada causa súbitas subidas de campo elétrico, alterando o comportamento do gráfico previsto. O integral espacial do campo, que é a tensão, é assim maior do que seria se não houvesse as camadas condutoras. Ou seja, para a mesma tensão (mesmo integral), é necessária menor distância de integração (menor tamanho da peça), como se verifica na Figura 2.23 B.

Estas travessias do tipo condensador podem ser classificadas como [15]:

- Resina envolta em papel (RBP: *Resin bonded paper bushing*):

Nesta travessia o isolamento é composto por papel (do tipo celulose), revestido em resina epóxida, que é enrolado sob a forma de calor e com pressão à volta do condutor. Este tipo de isolamento é propício à criação de cavidades entre as camadas que poderão surgir pelo encolhimento térmico ou fraco revestimento da resina. Em funcionamento, a entrada de humidade leva à degradação do papel e crescente instabilidade da travessia [15].

- Papel impregnado a óleo (OIP: *Oil-impregnated paper bushing*):

Estes tipos de travessias são extremamente utilizados no campo dos transformadores elevadores para altas tensões. Esta travessia é característica por envolver o condutor com camadas condutoras intercaladas com camadas de papel extremamente resistentes, para vaziar a humidade e ser mais fácil a absorção do óleo (isolante líquido). A rigidez dielétrica é assegurada pela absorção do óleo no papel após secar em vácuo e, portanto, menor é a possibilidade de origem de DP's [15].

### 2.3.2 Aplicações

As aplicações destes dispositivos estão associadas ao seguinte tipo de travessias [15]:

- Travessias não capacitivas:

Geralmente utilizados em transformadores isolados a óleo utilizam-se as travessias não-capacitivas que asseguram a passagem do condutor de AT para o seu interior, como se observa na Figura 2.24 (corresponde ao isolador a estudar nesta dissertação). No modelo em estudo deste texto uma parte da travessia será isolada pelo gás hexafluoreto de enxofre,  $SF_6$ .

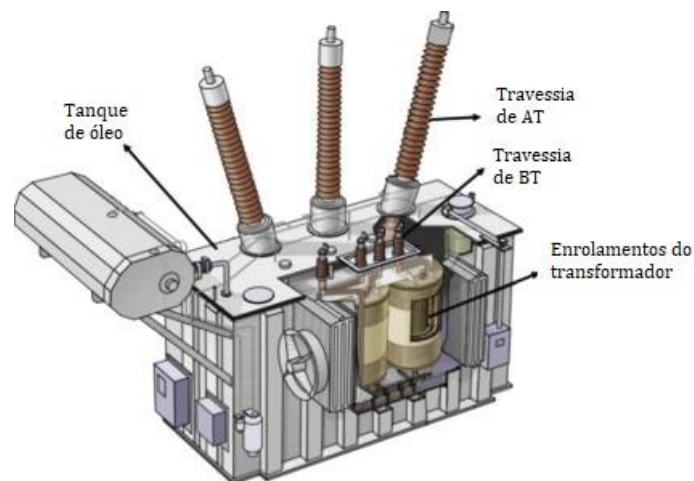


Figura 2.24-Exemplo de aplicação de travessia num transformador (Adaptado de [18]).

- Travessias para equipamentos de manobra:

Para este tipo de aplicação utilizam-se travessias não capacitivas sólidas de porcelana, pela melhor resistência aos danos mecânicos e elétricos. A travessia penetra a parede com objetivo de aproximar o condutor do outro meio e ter uma diferença de potencial (d.d.p) mínima do condutor para o meio isolante. Esta é conectada num dos meios a um dispositivo de proteção (disjuntor ou seccionador), que em caso de sobretensão ou corrente de fuga dispara evitando defeitos nos equipamentos elétricos seguintes. Os isoladores aplicados a esta tecnologia possuem elétrodos internos conseguindo uma distribuição de campo elétrico mais uniforme, conferindo estabilidade a este material;

- Travessias de corrente contínua:

As travessias de resina envoltas em papel são bastante utilizadas em linhas de transmissão de energia a longas distâncias. O seu formato pode ser ajustado pela resistividade do material requerido para a função. As travessias que sejam constituídas unicamente por papel ao invés das constituídas por óleo sofrem de campos mais intensos pela sua elevada resistividade. Para aliviar o possível desgaste do material enrola-se a travessia com papel prensado [15].

### 2.3.3 Ensaios

A má conceção e deficiente manutenção resultam na disrupção do isolador. Nos isoladores que estão expostos ao meio ambiente há uma degradação contínua pela humidade e poluentes que se instalam nas suas superfícies externas. Para um bom desempenho destes materiais elétricos fazem-se ensaios de diagnóstico para obter informação quanto ao seu estado, tal como a manutenção necessária. Nos isoladores de travessia para a sua utilização ser aprovada fazem-se inspeções periódicas, cujo resultado tem de estar de acordo com as normas IEC 60137 e IEC 60060-1 [19], [20]. Visto que os isoladores são sujeitos a esforços elétricos e mecânicos fazem-se diferentes tipos de ensaios para avaliar o seu desempenho, que são de seguida descritos [6], [15].

#### 2.3.3.1 Ensaios de rotina:

- Ensaios de capacidade e fator de dissipação dielétrica:

É dos ensaios mais utilizados nos sistemas de AT, em que o fator de dissipação,  $\tan(\delta)$ , traduz a qualidade do isolador. Através do fator de dissipação é possível observar as perdas no isolamento e indicar a presença de humidade nas travessias que no seu isolamento possuam papel. Para avaliar a capacidade da travessia e as perdas dielétricas são aplicadas diferentes tensões no isolador de acordo com a sua tensão nominal.

- Medida de descargas parciais:

Esta simulação é de extrema importância, porque as descargas parciais são as principais causas de falha das travessias. As descargas parciais são medidas pela amplitude dos seus impulsos, fornecendo descrição relativa ao estado da travessia;

- Ensaios de impulsos atmosféricos:

Para simular as descargas atmosféricas a travessia é sujeita a impulsos de tensão de choque com polaridade e magnitude específicas, de modo a observar-se as alterações das características dielétricas do isolador em regime de sobretensão. Neste tipo de ensaio aplicam-se dois conjuntos de 15 impulsos de tensão, um com polaridade positiva e outro com polaridade negativa. Este ensaio também conhecido pelo 1,2/50 compreende os seguintes pontos: a onda de choque em  $T_1=1,2 \mu s$  tem de estar à tensão de pico, que se assume como a abcissa que corresponde a 90 % da onda, pela reta tangente e, em  $T_2=50 \mu s$  a onda tem de estar a 50 % da tensão de pico, como se observa pela Figura 2.25 [21].

Para se assegurar a integridade dos outros dispositivos a que a travessia será conectada é bastante comum fazer-se este ensaio de rotina, que está de acordo com a norma IEC 60060-1 [19].

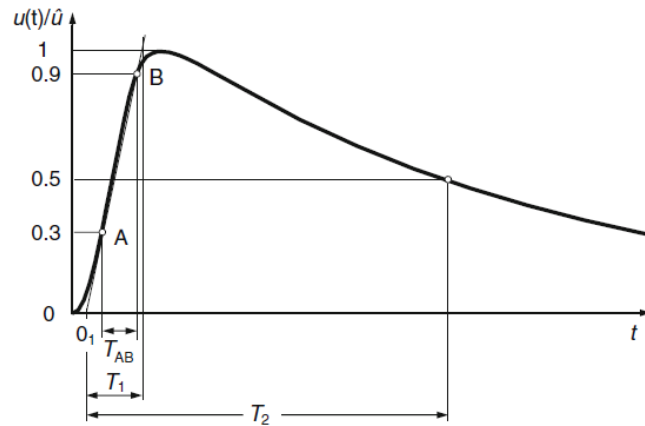


Figura 2.25-Ensaio de impulso atmosférico (Fonte: [21]).

- Ensaio de estabilidade térmica:

Temperaturas de funcionamento elevadas são consequências de sobretensões, logo através destas e correntes elevadas avalia-se as perdas dielétricas que traduzem a gravidade provocada no material. Em condições normais a travessia dissipa as perdas dielétricas sob a forma de calor, o que, em caso extremo leva à disrupção do isolador;

- Ensaio de aumento de temperatura:

Estes ensaios analisam o comportamento térmico das travessias ao serem percorridas por correntes nominais, isto é, se o limite térmico foi ultrapassado e quais as consequências materiais.

### 2.3.3.2 Ensaio de manutenção

As principais razões para deterioração dos isoladores de travessia são as DP's, cuja origem pode dar-se pela degradação do material provocada por fenómenos atmosféricos. Desses fenómenos destacam-se: infiltração de humidade que reduz as características dielétricas do isolador, sobretensões originadas pelo efeito das descargas atmosféricas e poluição. Para prever e diagnosticar a ocorrência destes fenómenos é feita uma manutenção ao material de modo a avaliar a continuação ou reforma da travessia. Esta manutenção costuma ser feita em períodos de três a cinco anos para todas as travessias, através dos ensaios abaixo descritos [15]:

- Influência do potencial a elevadas frequências:

Consegue detetar problemas térmicos e o efeito coroa em travessias não capacitivas do tipo compósito;

- Inspeção visual:

Averigua visualmente o estado do isolador de travessia, ao nível de fissuras, contaminação na superfície e quantidade de óleo;

- Ensaio do óleo e compósito:

Observa-se a presença de humidade no óleo, que preenche o interior da travessia, e caso exista é removido o óleo, seca a superfície e renovada com novo óleo.

A aplicação de travessias em AT é um ponto chave para o funcionamento de bastantes equipamentos de difícil mobilidade que se encontram em locais diferentes da fonte de alimentação, pois conseguem fazer a ligação eléctrica independentemente das barreiras entre os terminais.

## 2.4 Papel das Resistências em AT

As resistências no campo de AT são uma matéria pouco explorada, porém devido à sua aplicação nesta dissertação são abordadas informações inerentes como: tipos, obtenção do sinal através destas e alguns fatores que influenciam a detecção do sinal.

Para analisar o comportamento das travessias existem poucos casos onde se façam estudos através de resistências devido às exigentes características necessárias a estas componentes. No entanto, existem já algumas dimensionadas para aguentar intensos campos elétricos e elevadas d.d.p a que têm de estar sujeitas nesse ambiente. O comportamento da travessia através das resistências é amostrado pela sua tensão, para isso é prioritário uma elevada precisão que garanta a veracidade do resultado.

Num estudo concreto, através de um divisor de tensão aplicado sobre uma cadeia resistiva, foi obtida a tensão nominal da travessia. Esta cadeia resistiva, que estava anexada à travessia, foi submetida a elevados campos elétricos. Para se utilizarem divisores resistivos em circuitos de corrente alternada e tensões bastante altas é vital as resistências obedecerem aos seguintes pontos [22]:

- Diminutos coeficientes de temperatura da resistência (TCR):

Quanto menor for este coeficiente, menos o valor nominal da resistência varia de acordo com a variação de temperatura. Este ponto é bastante importante, visto que em AT os materiais aquecem bastante e os divisores são dimensionados de acordo com os valores nominais das resistências.

- Reduzidos valores de auto aquecimento:

Isto significa que a corrente e consequentemente a potência tem de ser bastante baixa para evitar que a resistência dissipe calor. Em AT independentemente do número de componentes da cadeia, a tensão de cada resistência ronda perto dos milhares de volt. Ora, observando os dois fatores que resultaram no estudo de Marx [22] e paralelamente da equação 2.8 conclui-se que para ter potências mínimas os valores nominais das resistências terão de ser bastante elevados.

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (2.8)$$

Desta forma as resistências que obedecem a estas condições são: as resistências de filme grosso e resistências de filme fino [23].

### 2.4.1 Resistências de filme grosso

Uma das resistências em AT mais utilizada é a do tipo filme grosso, corresponde à sobreposição de dois filmes, um condutor e outro resistivo para obter a resistência necessária para tensões bastante elevadas. São compostas por um substrato em cerâmico, onde se deposita o material resistivo, que corresponde a uma mistura de metais e materiais não condutivos. A camada resistiva é disposta sobre o substrato a temperaturas bastante elevadas, para lhe conferir impermeabilidade e rigidez, precavendo de fatores externos como a humidade. A espessura da camada é na ordem dos 100  $\mu\text{m}$ , sendo que a constituição desta camada é feita de um modo sequencial para obter esquemas de condutores padrão e valor de resistência equilibrados.

O molde é feito por uma tecnologia de corte a laser, que consiste em enfraquecer a camada que intercala o substrato e o filme resistivo através de um teste destes materiais resistivos a impulsos intensos de luz. Os cortes feitos no material desviam as linhas de corrente, o que significa que o valor nominal da resistência aumentou.

Este modelo é um chip SMD<sup>3</sup>, de baixo preço de produção, daí que estas sejam as resistências mais utilizadas. Na produção da resistência, a geometria e tipo de tinta resistiva utilizada ditam o valor nominal, pelo que é hábito alcançar valores na ordem dos mega ohms (M $\Omega$ ) [23],[24]. Na Figura 2.26 está um esquema deste tipo de resistência.

Com o projeto destas resistências (corte e dimensionamento) surgem dois problemas principais: maior dispersão de campo elétrico junto das zonas de maior concentração de corrente elétrica, que leva à origem de pontos em sobreaquecimento acompanhados de fissuras e ocorrência de arcos elétricos que abrangem toda a zona delimitada pela resistência. Estes problemas podem ser resolvidos por um sobredimensionamento da resistência, através do aumento das suas dimensões, porém nem sempre é possível devido aos recursos de espaço para a aplicação e conseqüente aumento de custos [24]. De referir que estas serão as resistências a utilizar, no modelo a elaborar, para efeitos de simulações e ensaios na fábrica.

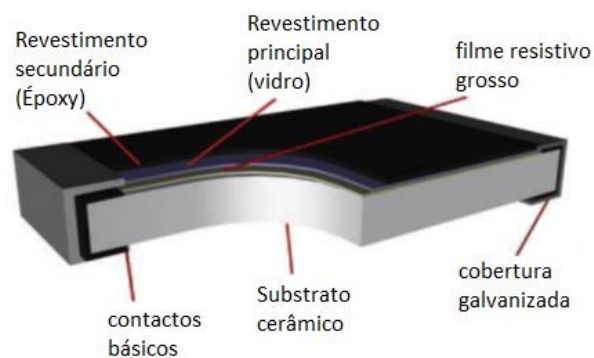


Figura 2.26-Constituição Resistência filme grosso (adaptado de [23]).

#### 2.4.2 Resistências de filme fino

Tal como as resistências anteriores, também as de filme fino são constituídas por filmes metálicos dispostos sobre uma base cerâmica, como se observa na Figura 2.27. No entanto a base também pode ser constituída por alumínio, silício ou vidro. A camada da resistência é uniforme, o que lhe dá estabilidade mesmo havendo processos de corte. Com espessuras bastante reduzidas (0,1  $\mu\text{m}$ ) e calibração eletrónica a laser, o perímetro das suas pistas pode ser alterado o que influencia o seu valor nominal. Também estas resistências são um modelo de chip SMD.

Estes tipos de resistências apresentam uma maior precisão face às anteriores, um menor coeficiente de temperatura da resistência, apresentando melhor desempenho que as de filme grosso. Porém estas características são contra balanceadas com o seu elevado custo de produção [23].

<sup>3</sup> SMD (Surface Mounted Device)– Método de montagem em circuito eletrónico que possui terminais curtos montados no próprio componente [29].

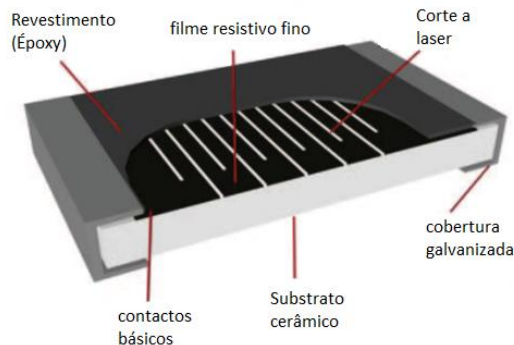


Figura 2.27-Constituição Resistência filme fino (adaptado de [23]).

### 2.4.3 Aplicações

Como já referido a única aplicação conhecida destas resistências é o uso de divisores resistivos com o objetivo de ver que tensão está associada à travessia.

Marx [22] fez um estudo de um divisor de tensão resistivo blindado por um sistema de controlo de temperatura, para obter a tensão de uma travessia de tensão nominal 100 kV. Este divisor resumiu-se a uma cadeia de 101 resistências, com uma resistência equivalente de  $1\text{ G}\Omega$ , num ambiente isolado a  $SF_6$  e montado sobre um sistema de eléctrodos homogéneo para proporcionar uniformidade de campo eléctrico. Nesse estudo foram utilizadas resistências de  $10\text{ M}\Omega$ , sendo que para amostrar a tensão foi utilizada uma resistência de baixa tensão, no valor de  $100\text{ K}\Omega$ , que esteve numa proporção de 1:10000 face à resistência total. Neste estudo que incidiu na alteração das propriedades eléctricas do modelo das resistências de filme grosso à base de polímeros (modelo similar ao descrito atrás), ficou provado que a resistividade destas resistências varia com a temperatura (há uma relação linear obtida por equação diferencial), tal como varia com os picos de tensão a que estão sujeitas. Isto reflete a precisão da resistência, pois quanto menor for o TCR, maior é a precisão da resistência. Porém, foi concluído que o valor deste tipo de resistência pode ser equilibrado pelas propriedades de expansão do meio isolante.

Nas travessias é possível obter-se os valores das suas sobretensões com resistências de valores elevados, porém estas podem originar DP's.

Pela análise feita, conclui-se que as suas dimensões e geometrias são variáveis decisivas nos estudos com estas componentes, sendo que as resistências de filme fino têm grande desempenho pelas suas aplicações bastante frequentes em dispositivos curtos e compactos [23].

## 2.5 Sumário

As matérias exploradas neste capítulo são o suporte técnico dos campos de estudo que servirão de auxílio, para delinear a metodologia correta neste trabalho. Obteve-se um conhecimento das principais características do isolador de travessia. Inicialmente, os problemas (descargas parciais) nestas travessias são imperceptíveis fisicamente, pelo que através de deteção do sinal da sua tensão pode-se entender o seu estado de funcionamento. As resistências são uma forma de obtenção de sinal, porém no âmbito de AT são reduzidos os estudos, pois casualmente podem potenciar descargas parciais. Em suma, a implementação da deteção do sinal da tensão por uma cadeia resistiva resultará da sugestão de modelos que agreguem resultados de campo eléctrico e tensão que não coloquem em causa o isolador e com razoável encaixe no seu interior, devido às limitações espaciais.

A inevitável abordagem de tentativa e erro, da segunda parte do projeto, tentará transparecer uma relação entre a arquitetura da deteção de sinal, os resultados a obter via *software* de elementos finitos e os ensaios em fábrica. De acordo com o estado da arte o principal objetivo passa por obter diminutos campos elétricos no interior do isolador de travessia, após a introdução da cadeia resistiva, por forma a fazer uma deteção do sinal da tensão precisa. Para alcançar esse desígnio terá de haver uma distribuição uniforme de campo eléctrico, pois as DP's nestes isoladores ocorrem como consequência de campos eléctricos extremamente não-uniformes que ultrapassam a rigidez dieléctrica do material. Sendo que nos estudos referidos atrás está comprovado que as DP's colocam em causa o sistema isolador-condutor e diminuem o seu tempo de vida. Desta forma espera-se ampliar o registo de projetos em AT com componentes resistivas.



# 3 Modelação do sistema

No presente capítulo é apresentada a metodologia utilizada para obter o modelo tridimensional do isolador de travessia. São também abordados alguns pontos sobre o *software* de elementos finitos, como informações sobre os materiais do modelo e técnicas usadas para avaliar as grandezas de estudo.

Este modelo foi feito num *software* de desenho, com base nos desenhos técnicos do molde e de algumas componentes da peça fornecidas pela empresa, que se encontram no Anexo I. Após a elaboração dessas componentes, no seguimento do capítulo, são delineados esquemas de cadeias resistivas a introduzir no modelo de travessia. Posteriormente esses modelos são importados para o *software* de elementos finitos, sobre os quais serão realizadas simulações de campo e potencial elétrico.

## 3.1 Dimensionamento teórico do sistema

### 3.1.1 Dados de estudo antes dos ensaios

Para um sistema trifásico, a tensão nominal deste isolador de travessia é de 36 kV. Da correspondência trocada com a empresa há a informação de que as linhas de energia têm na verdade uma tensão composta de 30 kV, pelo que por questões de segurança há um aumento de 20% (6 kV) na designação do equipamento. Visto que, num isolador só passa o condutor de uma das três fases, a tensão desse condutor corresponde à tensão simples e o seu valor é obtido pela equação 3.1.

O isolador de travessia produzido pela fábrica Indisol tem a seguinte tensão simples,  $U_s$ :

$$U_s = \frac{U_c}{\sqrt{3}} \tag{3.1}$$

$$U_s = 17,32 \text{ kV}$$

Fica definido segundo a empresa que a escolha da cadeia resistiva recai num conjunto de dez resistências de 20 M $\Omega$  devido à experiência que têm de outras aplicações anteriores. Estipula-se que as (N) resistências estão em série e que, independentemente do seu número, têm de ter todas o mesmo valor nominal.

Primeiro será feito um estudo para o número de resistências no cenário mais crítico que será com oito resistências, um número de resistências menor face ao estipulado. Da observação do exemplo da Figura 3.1 e da equação 3.2, que apresenta a tensão de uma resistência através de um divisor de tensão, conclui-se que quanto menor for o número de resistências em série no circuito elétrico, maior é a tensão aos seus terminais. Implicitamente também o campo elétrico incidente nas resistências será maior.

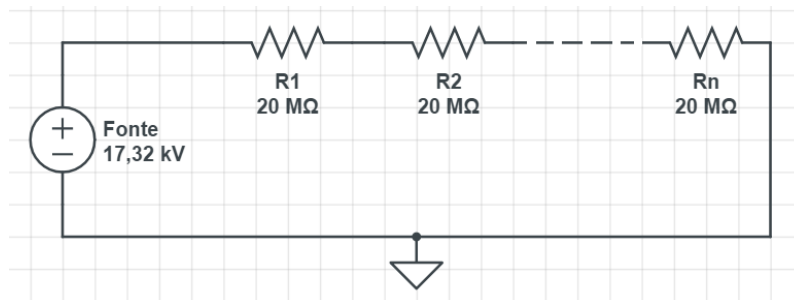


Figura 3.1-Divisor de tensão com N resistências.

$$U_{R_N} = \frac{R_N}{R_N + R_1 + R_2} \cdot U_{Fonte} \quad (3.2)$$

$$U_{R_N} = \frac{R}{8R} \cdot U_{Fonte} \Leftrightarrow U_{R_N} = \frac{U_{Fonte}}{8} = 2165 \text{ V}$$

Como as resistências são todas iguais a tensão em cada uma delas será a mesma, logo, para conjuntos de oito resistências cada uma tem uma d.d.p de 2165 V aos seus terminais, em regime de funcionamento normal. Como a análise destas componentes será feita por meio de linhas 3D entre o condutor e cada resistência, o objetivo será encontrar um modelo que tenha o menor campo elétrico incidente, e que a d.d.p entre o condutor de AT e a resistência esteja em ordem com a tensão teórica. O valor teórico da d.d.p da resistência  $n$  é descrita segundo a equação 3.3:

$$\begin{aligned} d. d. p_{Fonte-R_N} &= U_{Fonte} - (U_{Fonte} - (U_{R_1} + \dots + U_{R_N})) = U_{R_1} + \dots + U_{R_N} \Leftrightarrow \\ d. d. p_{Fonte-R_N} &= n \cdot U_{R_N} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Segundo o exemplo da Figura 3.2 a d.d.p entre o condutor de AT e R2 será:

$$d. d. p_{Fonte-R_2} = 2 \times 2165 = 4330 \text{ V}$$

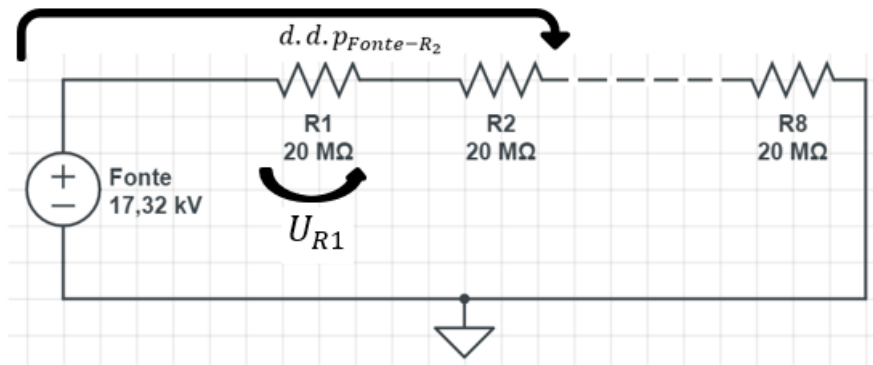


Figura 3.2-Exemplo de d.d.p. a aplicar no estudo das resistências.

A escolha do modelo de resistência é feita segundo a sua potência dissipada (equação 2.8) para o ensaio mais intenso, que assegura valores de tensões e potências dissipadas que não colocam em causa estas componentes no cenário de funcionamento normal, em resina *epoxy*. Designou-se que o modelo de resistência a utilizar é o *HVC2512*, no valor de 20 MΩ, apesar da tensão máxima a que estará sujeita no ensaio de 70 kV (7000 V), ser muito superior à sua tensão nominal máxima de trabalho (3000 V), e da potência máxima, a que estará sujeita (2,45 W), ser superior à sua potência nominal dissipada (2 W). As características do modelo estão presentes no Anexo II.

$$P_{máxima} = \frac{7000^2}{20 \times 10^6} = 2,45 \text{ W}$$

As características referidas atrás são meramente indicativas, pois são os valores máximos a que estão sujeitas num ambiente a ar e neste trabalho estas estarão embebidas na resina *epoxy*. Nas resistências a dissipação de energia depende da tensão aos seus terminais, do valor nominal da resistência, bem como da sua temperatura limite de funcionamento. Como a condutividade térmica da resina é superior à do ar (dez vezes mais) [25], haverá mudanças no comportamento da potência dissipada destas componentes. Segundo a condutividade térmica, os coeficientes de transferência de calor na resina são maiores que no ar e, portanto, há maior dissipação de calor no primeiro meio do que no segundo, para a mesma temperatura de funcionamento e igual intervalo de tempo. Como tal na resina para o mesmo valor de potência dissipada a resistência está termicamente aliviada e, portanto, o seu corpo atinge uma temperatura menor do que se estivesse num ambiente a ar. Seguindo esta analogia, as resistências no meio de resina *epoxy* podem dissipar potências mais elevadas que os níveis estipulados

por catálogo no meio de ar, para atingirem a temperatura limite (temperatura que delimita a potência máxima da resistência). Neste caso isso é uma vantagem para o uso destas componentes no interior da travessia e vai de acordo com o testemunho da empresa em relação a experiências anteriores, onde estas resistências não tiveram problemas num ambiente de *epoxy*.

Os ensaios em fábrica a que a travessia será submetida e a informação dos seus passos estão no Anexo III, de acordo com a norma IEC 61869 [26], cujos parâmetros dos quatro ensaios são:

- Ensaio à tensão de 24,9 kV, no qual os níveis admissíveis de descargas parciais do isolador têm de ser menores que 5 pC;
- Ensaio à tensão de 43,2 kV, no qual os níveis admissíveis de descargas parciais do isolador têm de ser menores que 10 pC;
- Ensaio à tensão máxima de 70 kV durante 1 minuto, que verifica a rigidez dielétrica da peça. Neste ensaio observa-se se o campo num defeito (bolhas de ar na resina) é comparável à tensão de ruptura e conseqüentemente possibilidade de rutura física no meio dielétrico. Se não houver problemas audíveis ou visíveis na travessia o ensaio é aceite.
- Ensaio de impulso atmosférico à tensão de pico de 170 kV, em  $1,2 \mu\text{s}$  a onda aplicada na peça tem de estar à tensão de pico e após  $50 \mu\text{s}$  tem de estar a 50 % dessa tensão máxima. Este é um ensaio de rotina que certifica a peça num regime de sobretensões. Neste ensaio apenas são permitidos dois arcos elétricos na peça, sem falhas internas, para ser aprovada.

Os dois primeiros ensaios servem unicamente para observar a ocorrência de DP's e caso sejam aprovados o terceiro ensaio pode ser executado, tal como o quarto ensaio também só será realizado se a travessia cumprir os requisitos do terceiro.

### 3.1.2 Dados de estudo após os ensaios

Esta parte insere-se fora do contexto de simulações, com vista a aplicar na prática (caso o modelo delineado seja bem-sucedido) a deteção de sinal.

Para entendimento, quando se refere no corpo do texto, o substantivo “circuito” ou “resistência equivalente de AT” serve para designar a cadeia de dez resistências no interior da travessia e o substantivo “circuito de baixa tensão” (BT) para designar o circuito do PCB, que inclui  $R_L$ .

A deteção do sinal da tensão da travessia, que está submetida a AT, faz a sua leitura em BT. Para isto utiliza-se um divisor resistivo aplicado numa resistência de valor nominal menor ( $R_L$ ), que é ligada em série à última resistência de  $20 \text{ M}\Omega$  da cadeia. Para ser fiável planeia-se que entre a resistência equivalente ( $200 \text{ M}\Omega$ ) e  $R_L$  há uma proporção de 1:10000, logo  $R_L$  tem um valor de  $20 \text{ k}\Omega$ , tal como se observa o esquema equivalente na Figura 3.3.

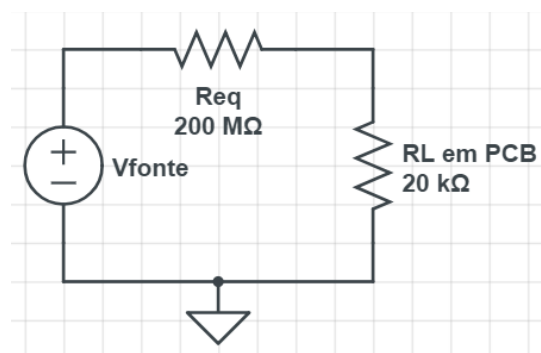


Figura 3.3-Exemplo deteção de sinal

Em BT a tensão de  $R_L$  representa a tensão da travessia numa relação dez mil e uma vezes menor (equação 3.5).

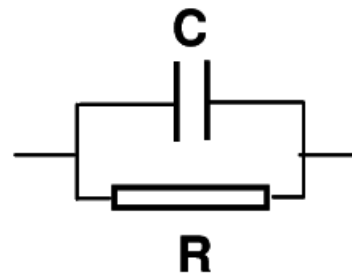
$$U_{R_L} = \frac{20 \times 10^3}{20 \times 10^3 + 200 \times 10^6} \cdot U_{Fonte} \Leftrightarrow U_{R_L} = \frac{1}{10001} \cdot U_{Fonte} \Leftrightarrow U_{Fonte} = U_{R_L} \times 10001 \quad (3.5)$$

Como em C.A. pode haver diminuição do valor nominal da resistência equivalente de AT, para fazer a detecção de sinal da tensão é necessário que no circuito de BT  $R_L$  seja integrado futuramente num PCB (placa de circuito integrado, representada na Figura 3.6 A) no interior da peça. Neste PCB para precaver eventuais descidas da  $R_{eq}$  estão algumas resistências de ajuste em paralelo com  $R_L$ , que servem de calibração do seu valor real, face ao valor dimensionado. Além disso no PCB está um GDT<sup>4</sup>, que atua como proteção deste pequeno circuito de BT.

Como o modelo da resistência (representado na Figura 3.4 A) possui capas de estanho nos seus terminais (elétrodos), funciona como um circuito RC paralelo, tal como o exemplificado na Figura 3.4 B. Ora desta forma a resistência corresponde a uma impedância, que tem componente resistiva e capacitiva. A componente capacitiva pode alterar a amplitude e fase do sinal da rede, desse modo para compensar essa alteração pode ser adicionado em paralelo um condensador no PCB. Mediante os valores reais podem ser feitas correções no exterior da peça, ligando as resistências ou condensadores necessários ao fio que provém do furo. Estas alterações no exterior servem de teste, para que no futuro se integre o PCB dentro da peça e, após isso, o furo será tapado e estão reunidas as condições para efetuar a detecção de sinal.



A



B

Figura 3.4-Resistência a utilizar. A - Modelo HVC2512 utilizado na Indisol. B - Circuito RC equivalente da resistência (Fonte: Indisol).

Para enviar o sinal de tensão de  $R_L$  liga-se um multímetro de bancada de alta precisão à travessia, por meio do furo representado na Figura 3.5. Esta conexão resume-se a ligar o PCB que está no interior da travessia, a um BNC<sup>5</sup> (Figura 3.6 B) que será anexado na superfície exterior junto do pequeno furo e ao qual posteriormente será ligado o multímetro.

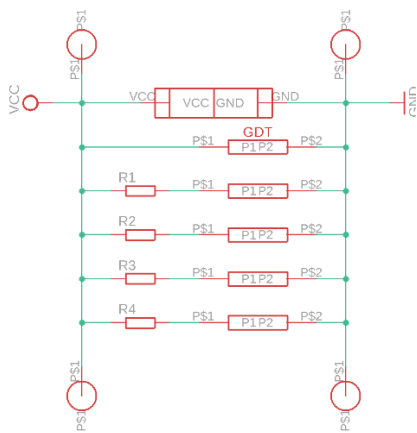
<sup>4</sup> GDT – Proteção passiva eletrônica. No caso de sobretensões assume o comportamento de um curto-circuito, protegendo os outros componentes de picos de corrente.

<sup>5</sup> BNC – Conector para cabos coaxiais, bastante utilizado em radiofrequência. Neste caso servirá para apresentar a tensão de  $R_L$  no osciloscópio.

Zona de contacto do BNC,  
que vai conectar com o PCB



Figura 3.5-Local a partir de onde é feita a deteção de sinal (Fonte: Indisol).



A



B

Figura 3.6-Componentes de deteção de tensão da travessia. A - Exemplo de PCB. B - Exemplo de BNC (Fonte: Indisol).

Para isolar e conectar a travessia ao transformador utiliza-se em fábrica o conector *plug in* (Figura 3.7), que corresponde ao modelo “*Tee conector*” para a interface B, que está de acordo com a norma EN 50180 [17]. No seguimento do texto emprega-se a denominação “conector isolante” para este modelo.



Figura 3.7-Exemplo de conector isolante utilizado em fábrica.

## 3.2 Parte A: Dimensionamento do modelo em *software* de desenho

Visto que foi dada liberdade para alterar algumas componentes deste sistema a fim de observar qual o melhor caso de estudo, geometricamente as alterações ocorreram sobre a malha e a cadeia resistiva.

### 3.2.1 Caso Geral

Com o objetivo de fazer a melhor aproximação do modelo produzido na fábrica (até ao momento sem a deteção de sinal de tensões) é feito um modelo tridimensional com base nas vistas superior e frontal dos desenhos técnicos de produção da travessia, presentes no Anexo I. Nas seguintes figuras são feitas exposições do núcleo duro da travessia (*software* de desenho), utilizado em todos os cenários. Nas Figura 3.8 e Figura 3.9 podem-se observar as vistas superior, frontal e inferior do isolador de travessia. As simulações do capítulo seguinte são feitas com o conector isolante, onde é encaixada a travessia. Na Figura 3.8 A está representada a vista frontal do isolador sem o conector, para se entender a forma cônica onde no seu interior passa o condutor de AT.

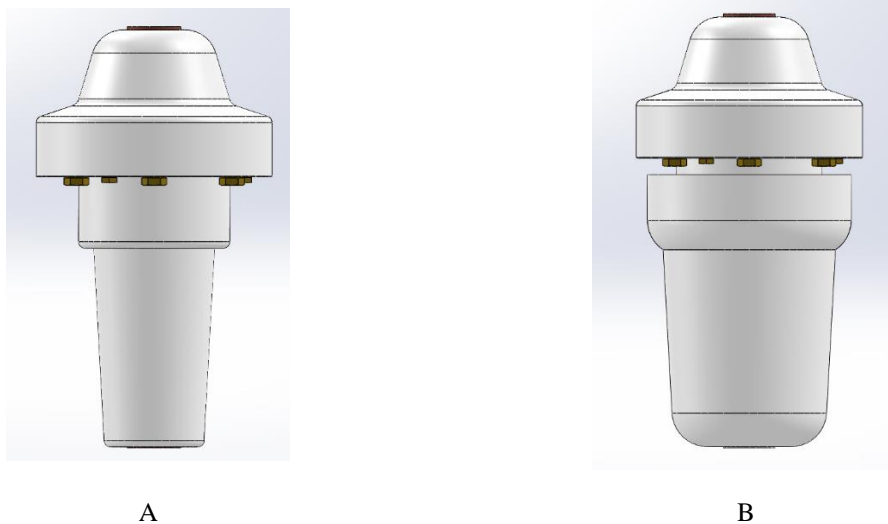


Figura 3.8-Vista frontal do modelo 3D de isolador de travessia. A - Sem conector isolante. B – Com conector isolante.

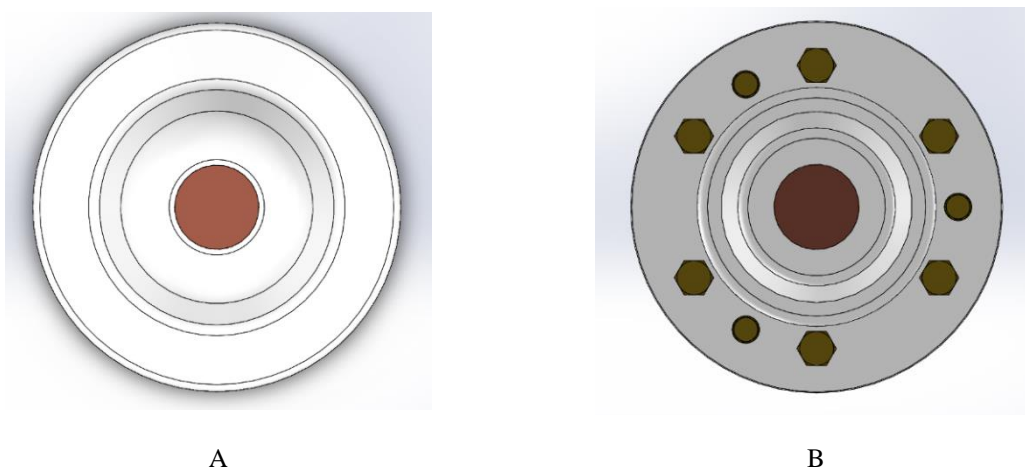


Figura 3.9-Modelo 3D do isolador de travessia. A - Vista superior. B - Vista inferior

Na Figura 3.10 A e B estão representadas duas vistas dos materiais no interior da travessia, que com exceção à malha, nunca mudam a sua geometria.

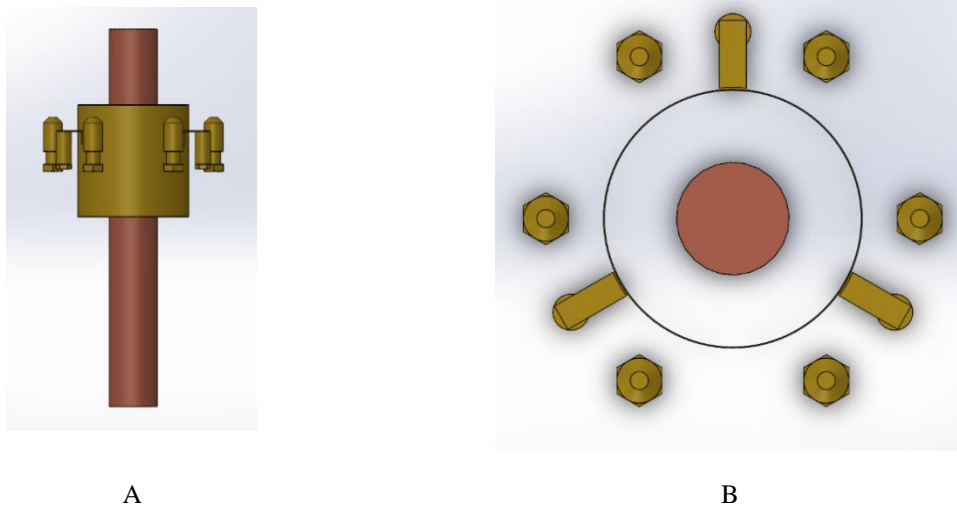


Figura 3.10-Conjunto Condutor de AT, malha com ligação à terra através de insertos. A - Vista frontal. B - Vista superior.

### 3.2.2 Alteração da geometria da malha

Para efeito de simulações e análise no capítulo seguinte será alterada a geometria dos aros superior e inferior da malha, onde se testará o ângulo da sua curvatura, no caso mínimo de  $20^\circ$  e máximo de  $300^\circ$ , como se observa na Figura 3.11.

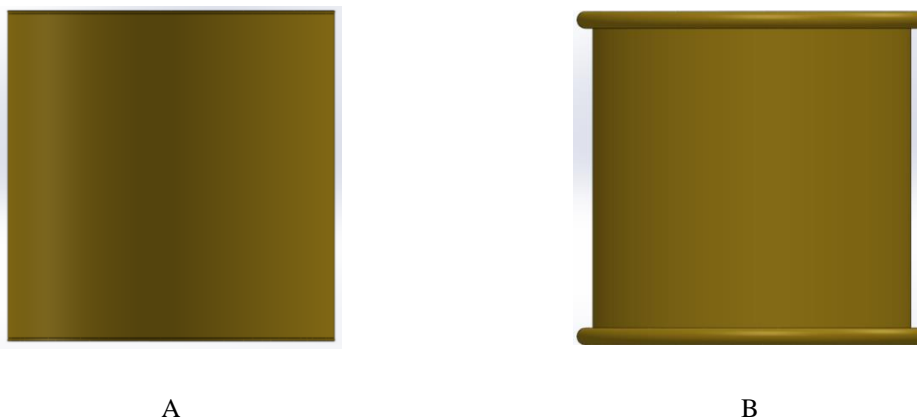


Figura 3.11-Malha com ângulo de curvatura dos aros alterados. A – Caso de estudo com  $20^\circ$ . B – Caso de estudo com  $300^\circ$ .

### 3.2.3 Tipos de cadeias resistivas

A escolha da cadeia resistiva a utilizar no modelo final com dez resistências, irá recair sobre a que se destacar no estudo com oito. Em seguida encontram-se expostas figuras das cadeias resistivas, da sua ligação à malha e ao condutor de AT, para os dois conjuntos, de oito e dez resistências. As cadeias resistivas estão elaboradas com base em trajetórias que correspondem a hélices. Visto que todas as cadeias estão dispostas no interior do isolador é irrelevante colocar figuras do seu exterior.

Na primeira cadeia resistiva do conjunto de oito resistências coloca-se a primeira e a última resistência quase perpendiculares a um plano horizontal para entender as consequências nas grandezas

de estudo. Na Figura 3.12 A observa-se a cadeia num ambiente isolado, em B conectada no interior do isolador e em C numa vista isométrica<sup>6</sup>

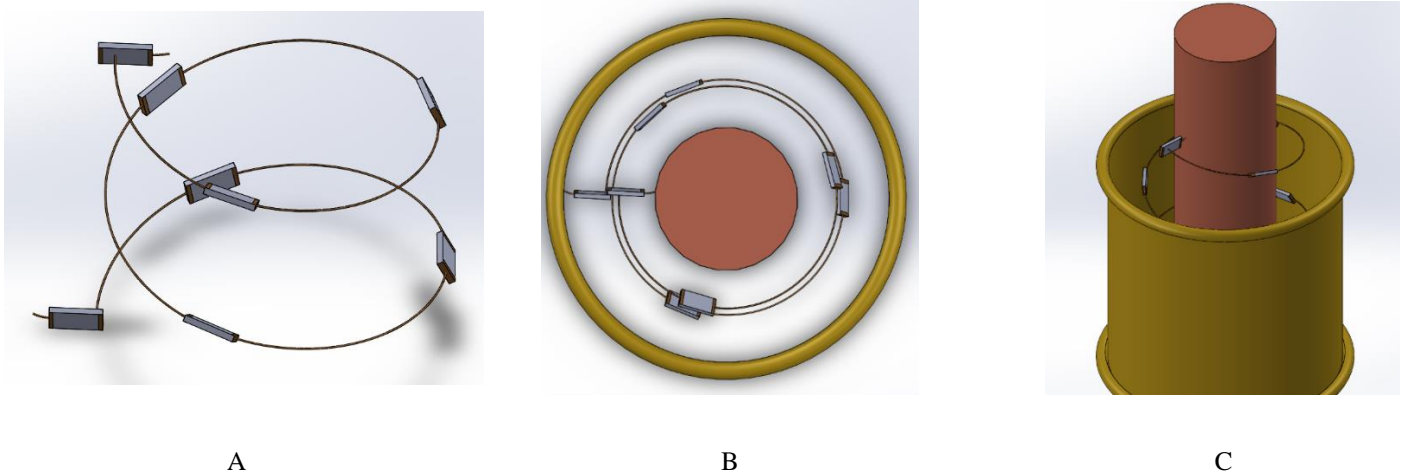


Figura 3.12-1ª Cadeia de oito resistências. A-Cadeia isolada. B-Vista superior. C-Vista isométrica.

Com a segunda cadeia resistiva tenta-se avaliar a resposta do sistema quando a mesma ocupa o maior espaço possível dentro do isolador. Na Figura 3.13 A observa-se a cadeia isolada, em B integrada no interior do isolador e em C numa vista isométrica.

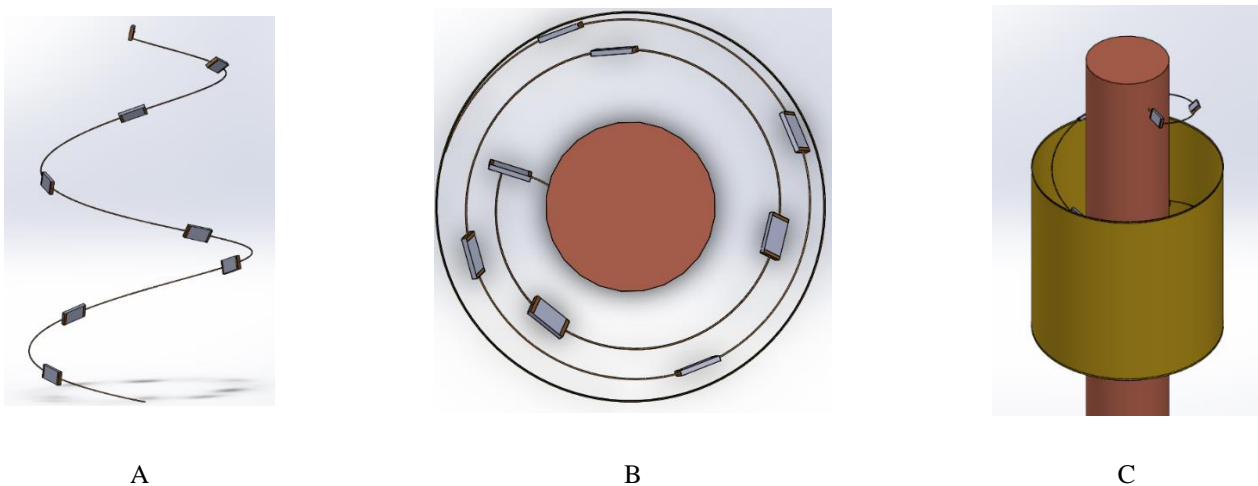
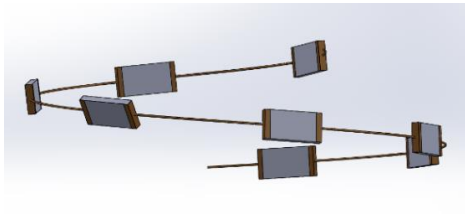


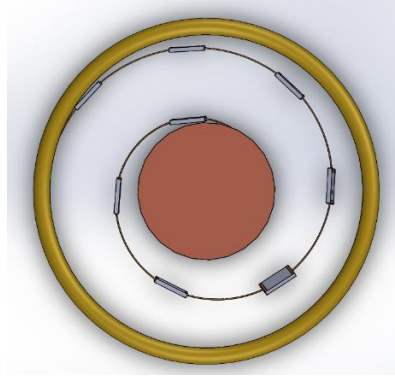
Figura 3.13-2ª Cadeia de oito resistências. A-Cadeia isolada. B-Vista superior. C-Vista isométrica.

Na terceira cadeia resistiva opta-se por dispor o circuito elétrico na parte superior do isolador, para concluir quanto ao comportamento das resistências quando não estão circundadas pela malha. Na Figura 3.14 A observa-se a cadeia isolada, em B ligada aos restantes componentes do interior do isolador e em C numa vista isométrica.

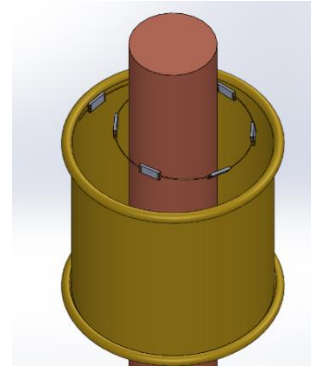
<sup>6</sup> A vista isométrica é um caso específico que resulta da projeção cilíndrica ortogonal. Ocorre quando há uma projeção desfasada, relativa a um plano, propositada e o seu sistema de eixos fica na vista, vista do plano, de forma equiangular a 120 °.



A



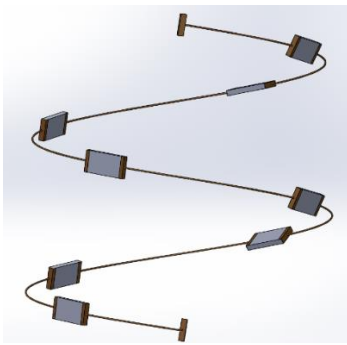
B



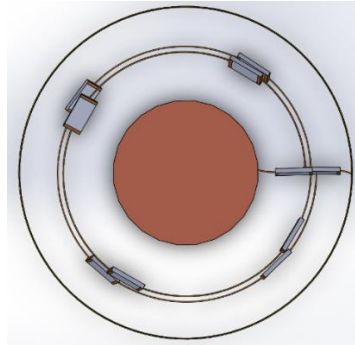
C

Figura 3.14-3ª Cadeia de oito resistências. A-Cadeia isolada. B-Vista superior. C-Vista isométrica.

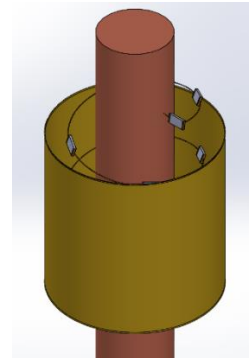
Nas três cadeias para os conjuntos de dez resistências simplesmente foi aumentado o número de componentes, como se observa pelas Figura 3.15, Figura 3.16 e Figura 3.17.



A

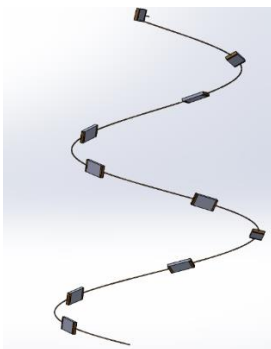


B

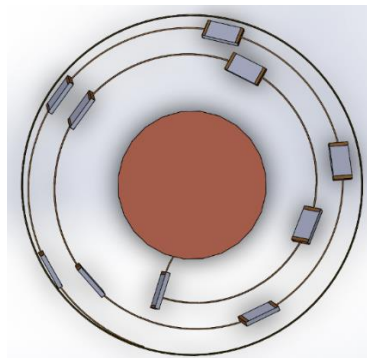


C

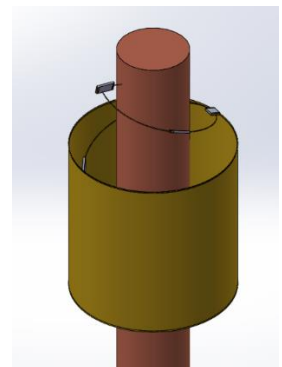
Figura 3.15-1ª Cadeia de dez resistências. A-Cadeia isolada. B-Vista superior. C-Vista isométrica.



A

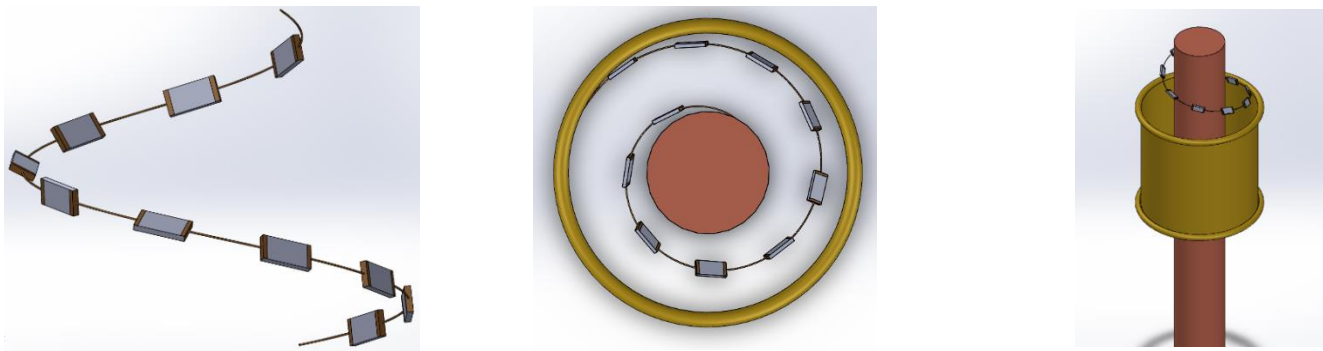


B



C

Figura 3.16-2ª Cadeia de dez resistências. A-Cadeia isolada. B-Vista superior. C-Vista isométrica.



A B C  
 Figura 3.17-3ªCadeia de dez resistências. A-Cadeia isolada. B-Vista superior. C-Vista isométrica.

### 3.3 Parte B – Dimensionamento do modelo em *software* de elementos finitos

As simulações no software de elementos finitos serão feitas consoante as propriedades elétricas do sistema, porém para distinguir o modelo final é necessário introduzir casos de estudo. No seguimento apresenta-se informação pertinente acerca das grandezas e técnicas a utilizar para simplificar as simulações com esses casos de estudo.

#### 3.3.1 Informação essencial para resultados de simulações

No software de elementos finitos é necessário definir valores de algumas grandezas intrínsecas ao domínio dos materiais presentes neste isolador de travessia, como se pode observar na Tabela 3.1. Alguns dos valores representados são fornecidos pela empresa e outros retirados de fonte fidedigna [27].

Tabela 3.1-Valores de grandezas associadas aos materiais do conjunto travessia.

Domínios	Natureza	Constante dielétrica ( $\epsilon_r$ )	Condutividade ( $\sigma$ ) (S. m)	Resistividade ( $\rho$ ) ( $\Omega$ .m)	Coefficiente de <i>Poisson</i>	Campo disrupção ( $E_d$ ) (MV/m)
SF6 (gás)	SF6	1,5	-	-	-	
Molde	<i>Epoxy</i>	4	-	-	-	10
Proteção (silicone)	Silicone	4	-	-	-	
Proteção (alumínio)	Alumínio	1	3,77 E7	-	0,33	
Conjunto Malha+braços+insertos	Latão	1	-	-	0,33	
Ar (interior dos insertos)	Ar	1	-	-	-	3
Fios	Cobre	1	5,99 E7	-	0,35	
Resistências	Cerâmico	7	-	7612	-	
	Estanho	1	8,77 E6	-	-	
Condutor de AT	Cobre	1	-	1,66 E-8	-	

Posteriormente é necessário criar uma *mesh* que estabelece uma rede a envolver os materiais presentes nesta peça, de maneira a obter um estudo electroestático sobre esta. A *mesh* corresponde a uma rede de estudo que divide a peça em figuras, no exterior e interior, neste caso triângulos e sobre cada triângulo é feita a análise discriminada do tipo de simulação, de acordo com o material em que está a incidir. Na Figura 3.18 encontra-se um exemplo da *mesh* utilizada para simulações.

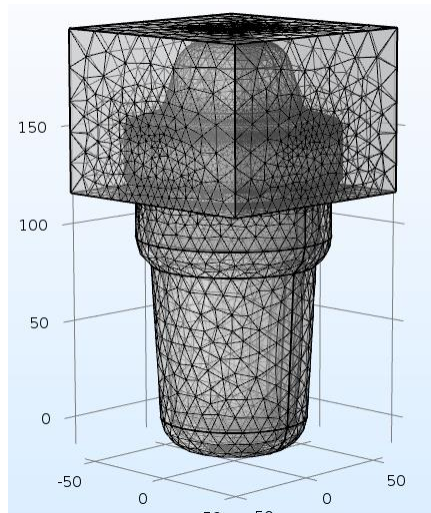


Figura 3.18-Exemplo de *Mesh* utilizada nas simulações.

Para se estudar este sistema define-se o condutor de AT à tensão referida de 17,32 kV e a malha à tensão nula.

Tal como referido atrás, para alcançar o melhor resultado é lançado um cenário de defeitos associados às componentes de estudo, de modo a entender a sua influência. Foram retiradas de um cenário de anomalias alguns exemplos que mostram a localização das bolhas de ar no isolador. Estas bolhas estão localizadas no meio do percurso entre o condutor de AT e cada resistência, na malha e no condutor, como confirmam as figuras seguintes.

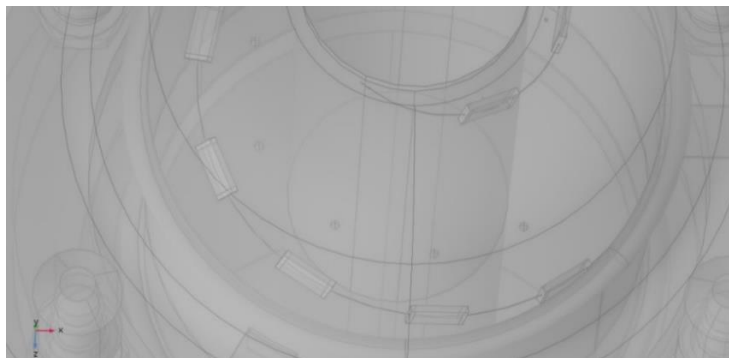


Figura 3.19-Exemplo da localização das bolhas de ar associadas ao estudo das resistências.

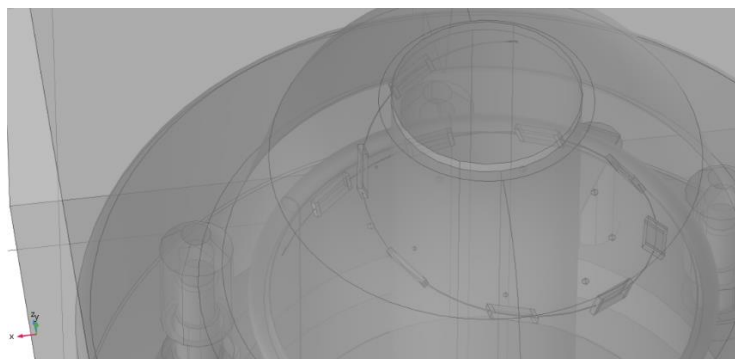


Figura 3.20-2º Exemplo da localização das bolhas de ar associadas ao estudo das primeiras resistências.

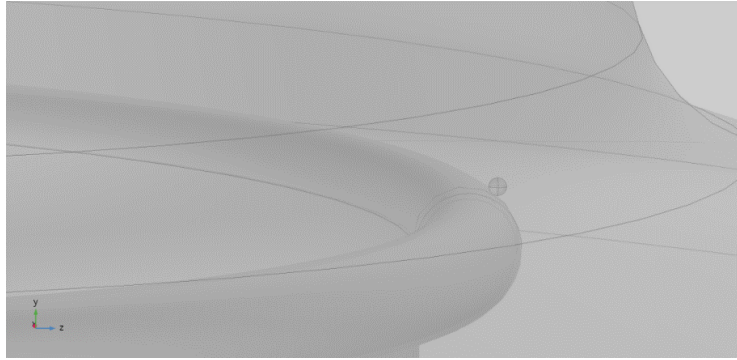


Figura 3.21-Exemplo da localização da bolha de ar associada ao aro da malha



Figura 3.22-Exemplo bolha de ar associada ao condutor.

Visto que para estudar em concreto as resistências, malha e condutor é preciso aceder à sua superfície, elabora-se planos e linhas de auxílio 3D para estudar o resultado das simulações. Na Figura 3.23 e Figura 3.24 estão exemplos de um plano e linhas que foram utilizadas para analisar o campo e o potencial elétrico à superfície das componentes referidas.

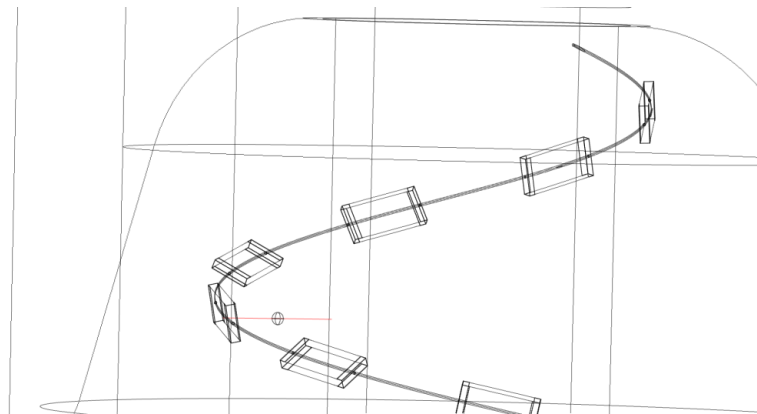


Figura 3.23-Exemplo de linha de estudo usada para R5, com bolha de ar a meio do percurso.

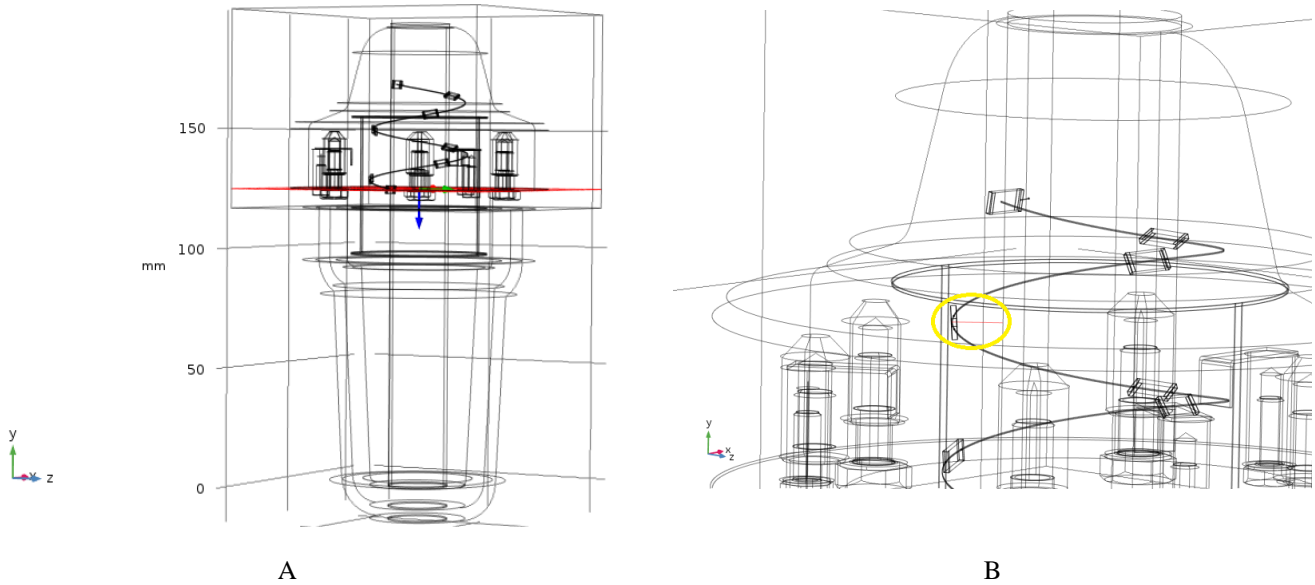


Figura 3.24-Ferramentas de auxílio no estudo do campo elétrico e d.d.p. A - Plano de corte (a vermelho) na resistência. B - Linha 3D entre o condutor central e resistência.

Para se estudar especificamente o aro da malha presente na Figura 3.21, expõe-se um exemplo de um plano representado na Figura 3.25, que servirá de auxílio para entender com rigor que fenômenos elétricos acontecem no interior da peça.

Este plano está definido como um corte a meio da peça, segundo o plano ZY. Esta escolha deve-se à sua simetria geométrica (sem a cadeia resistiva), pois em condições normais as tensões relativas ao centro da peça são iguais. Por isso criou-se uma linha horizontal auxiliar representada na Figura 3.25 B, com base nesse plano, para observar a variação do campo e potencial elétrico entre o centro do condutor e a sua extremidade.

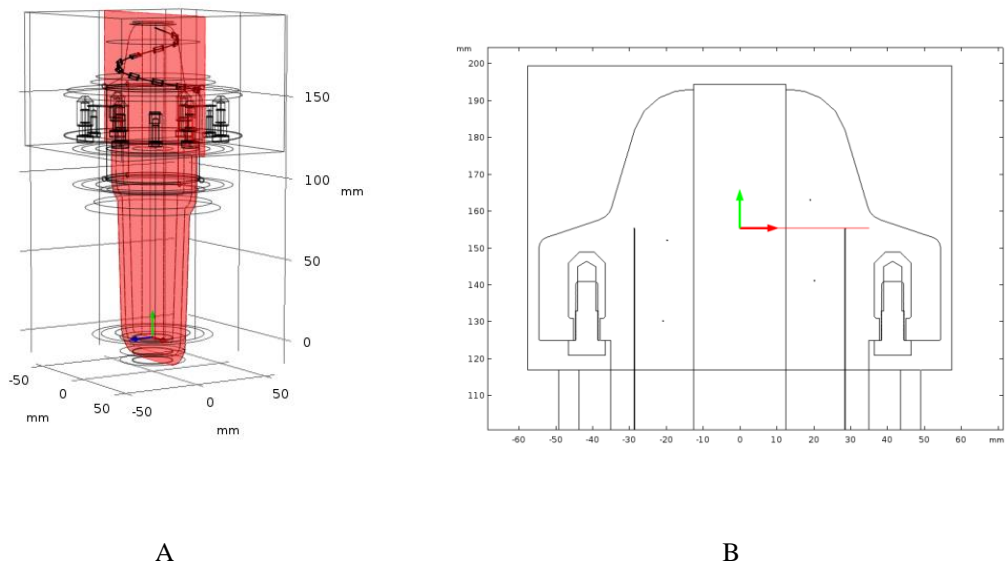


Figura 3.25-Ferramentas de auxílio. A – Exemplo plano vertical auxiliar. B - Linha horizontal 2D auxiliar

Os pontos abordados neste capítulo servem de auxílio nos dois capítulos seguintes, para se entender o dimensionamento e escolha do modelo da resistência, as técnicas a utilizar para obter

resultados coerentes nas simulações, que ensaios serão aplicados em fábrica nos modelos a delinear, e por fim a detecção do sinal da tensão do isolador.

# 4 Simulações e análise de resultados

## 4.1 Contexto inicial

No presente capítulo estão representados os estudos da distribuição de campo elétrico e do comportamento do potencial elétrico feitos num *software* de elementos finitos, para as várias tipologias da travessia num cenário normal e de testes, com posterior análise e comparação

O estudo do isolador no cenário normal é dividido pelos dois ângulos de curvatura dos aros da malha e pelos três tipos de cadeia resistivas. Nesses casos estuda-se inicialmente a distribuição de  $E$  e o valor da d.d.p nos aros da malha e posteriormente nas resistências. A resistência de  $20\text{ k}\Omega$  (referida acima para o divisor resistivo) não está presente no modelo 3D, pois é algo apenas credível de se aplicar após a peça passar nos ensaios.

Os cenários de teste do isolador correspondem à presença de bolhas de ar na resina, junto à malha e no condutor. Estes testes têm como objetivo avaliar: o desempenho da travessia, a ocorrência de DP's nesta e apontar a tipologia para se fazer uma detecção do sinal da tensão correta. Esta detecção é feita por via de uma cadeia resistiva, que liga o condutor de AT à malha. Esta malha está ligada às paredes do transformador e estas por sua vez ligadas à terra. O sinal é obtido pelo divisor de tensão, porém existe o problema de as resistências poderem originar DP's.

Nas simulações a travessia é contida num conector isolante (como na realidade) para uniformizar o campo elétrico na superfície desta. A parte em alumínio do conector isolante está à tensão nula, de modo a simular a sua ligação às paredes do transformador.

### 4.1.1 Incertezas do *software* de elementos finitos

Apesar das simulações serem a melhor aproximação da realidade não a traduzem completamente, porém, têm resultados bastante fidedignos. Ora neste *software* os gráficos 2D com representação a cores apresentam uma precisão de quatro posições decimais em relação às unidades medidas, o que resulta no seguinte exemplo de incerteza relativa do potencial elétrico:  $1 \pm 0,0001\text{ V}$ . Relativamente aos gráficos 2D com representação numérica no plano cartesiano, estes apresentam resultados de forma mais precisa (precisão de cinco zeros), aos quais corresponde o seguinte exemplo de incerteza relativa do campo elétrico:  $1 \pm 0,00001\text{ V/m}$ .

### 4.1.2 Metodologia utilizada

Neste capítulo utiliza-se a relação gráfica para fazer a análise de resultados, onde através da coordenada da quebra de uma das grandezas (maioritariamente campo elétrico) regista-se o valor das duas grandezas. O valor do campo elétrico, das componentes de estudo, a registar nesta análise de resultados corresponde sempre ao máximo, na transição do meio da resina para o material respetivo, a partir do qual se observa genericamente uma queda acentuada.

Visto que neste texto os substantivos “diferença de potencial” apenas são aplicados entre o condutor de AT e cada objeto de análise, no restante texto será utilizada somente a sigla “d.d.p” para se referir a esta grandeza.

### 4.1.3 Pontos auxiliares no *software* de elementos finitos

Estão apresentados de seguida exemplos de situações que são ignoradas no *software* de elementos finitos, pois não estão em coerência com o sistema isolador-condutor-conector isolante, tal como técnicas utilizadas para alcançar os resultados expectáveis.

#### 4.1.3.1 Exemplos

Na Figura 4.1 apresentam-se dois exemplos de gráficos do estudo do potencial elétrico ( $V$ ). Estes gráficos são a três dimensões, com os valores de potencial representados por uma escala a cores. No entanto observa-se que são pouco fidedignos e bastante imprecisos, pois não conseguem espelhar de forma perceptível o valor dos potenciais elétricos a estudar.

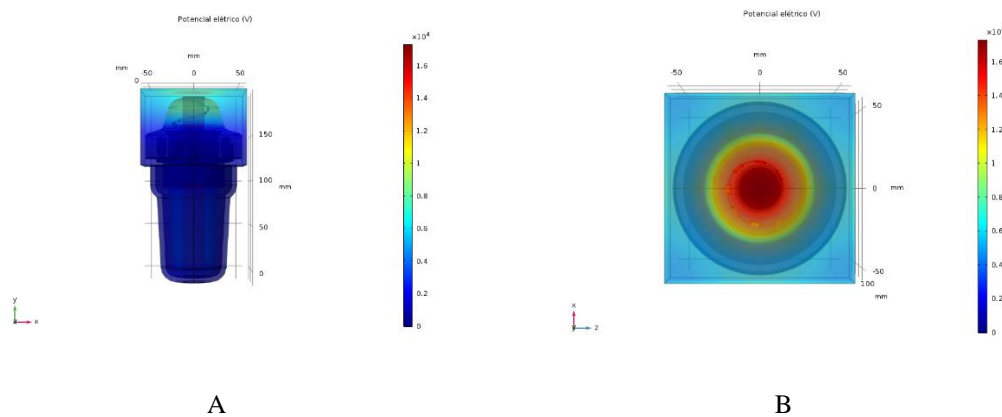


Figura 4.1-Gráfico do potencial elétrico 3D. A - Vista lateral. B - Vista superior.

Os gráficos tridimensionais do estudo do campo elétrico  $E$  segundo as três direções ( $x, y, z$ ) com escala a cores presentes na Figura 4.2 têm relevância desprezável porque assumem uma incoerência: uniformidade de campo elétrico em toda a peça e com valores quase nulos. Além disso há dificuldade de aceder a intensidades de campo elétrico no interior da peça.

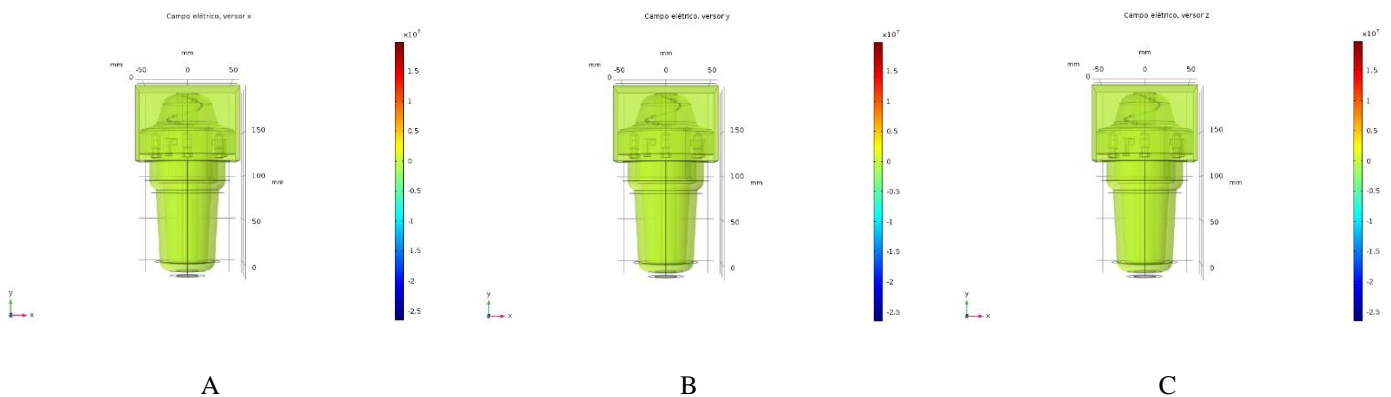


Figura 4.2-Gráfico 3D do Campo Elétrico. A – Segundo a direção  $x$ . B - Segundo a direção  $y$ . C - Segundo a direção  $z$ .

Como alternativa opta-se por representar os campos e potenciais elétricos ( $E$  e  $V$ ), de diferentes planos da peça, em gráficos 2D com representação a cores. A informação para estes gráficos provém de cortes da peça em planos. O parágrafo seguinte simplifica a medida da grandeza do campo elétrico.

A peça está representada em 3D, como tal em todos os pontos há campo elétrico segundo as três direções. Após o “corte” da peça segundo um plano obtém o perfil na Figura 4.3. Nos gráficos 2D com escala a cores da observa-se que existem certos máximos em algumas zonas do interior da peça, com especial destaque para as extremidades da malha. Visto a Figura 4.4 partilhar da mesma informação, o estudo do campo elétrico em planos 2D será feito por gráficos com o valor da sua norma.

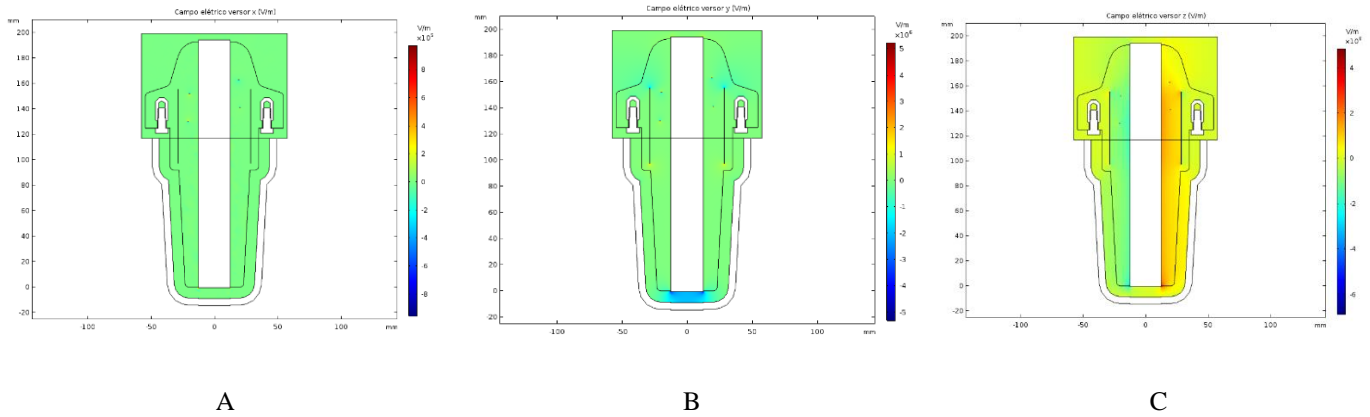


Figura 4.3-Campo Elétrico. A – Segundo direção x. B - Segundo a direção y. C - Segundo a direção z

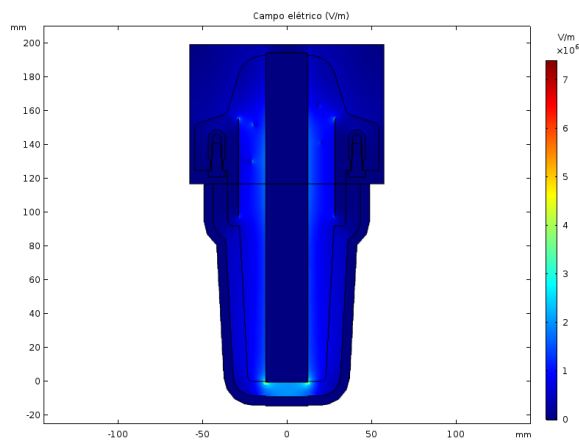
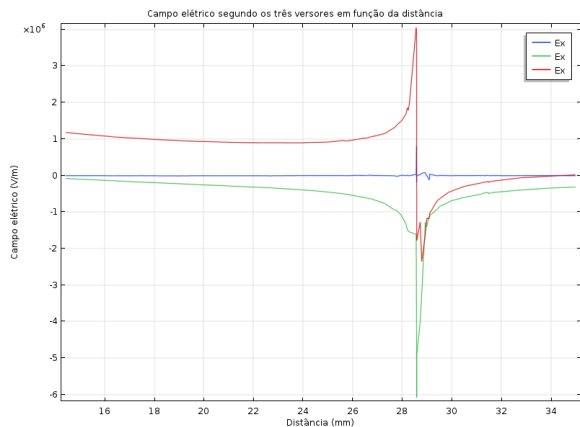
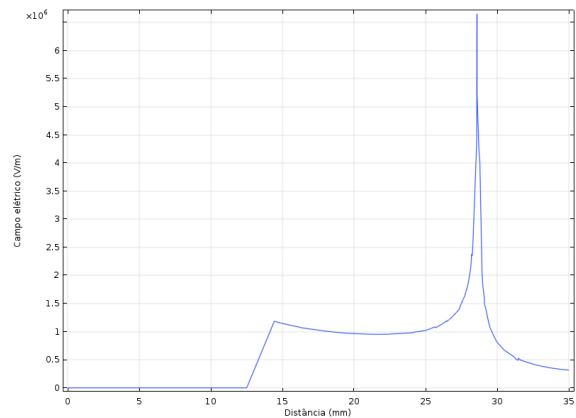


Figura 4.4-Norma do campo elétrico do isolador.

Por forma a saber mais sobre estas singularidades de campo elétrico inspeciona-se estas zonas, com recurso à linha auxiliar representada na Figura 3.25 B. Na Figura 4.5 A observa-se o estudo da distribuição de campo elétrico, num gráfico 2D de sistema de coordenadas cartesianas, segundo as suas três direções, no percurso entre o condutor central e a malha.



A



B

Figura 4.5-Campo Elétrico entre a fonte e extremidade da malha. A - Segundos as três direções. B - Norma do Campo Elétrico.

O gráfico da Figura 4.5 A mostra que o campo elétrico, segundo as suas três direções, é constante em grande parte do percurso, no entanto na extremidade do aro da malha (28.5 mm) as intensidades de campo elétrico aumentam drasticamente. Visto que a informação atrás também se comprova no gráfico da Figura 4.5 B (norma do campo elétrico), o estudo desta grandeza daqui em diante será realizado através de gráficos 2D de sistema de coordenadas cartesianas com a intensidade da sua norma,  $E$ . Também os gráficos do potencial elétrico segundo linhas auxiliares serão representados a 2D no mesmo sistema de coordenadas.

## 4.2 1ª Cadeia de oito resistências à tensão de funcionamento 36 kV com conector isolante

A alteração do raio de curvatura do aro da malha e introdução ou ausência de anomalias (bolhas de ar), serve para entender os pontos críticos desta tipologia pela análise da distribuição do campo elétrico e do valor da d.d.p da cadeia resistiva.

### 4.2.1 Caso A: Isolador com aro da malha reduzido e sem anomalias

#### 4.2.1.1 Estudo da malha

A Figura 4.6 A mostra o potencial elétrico do isolador visto num plano vertical. Através desta figura observa-se que a malha e proteção isolam a travessia, na sua camada externa, a potenciais reduzidos. Através da Figura 4.6 B percebe-se que as linhas equipotenciais de maior intensidade se reservam na vizinhança do condutor central, pois é aí que está a AT. Neste plano, assumindo o condutor como um eixo, as linhas equipotenciais estão praticamente espelhadas.

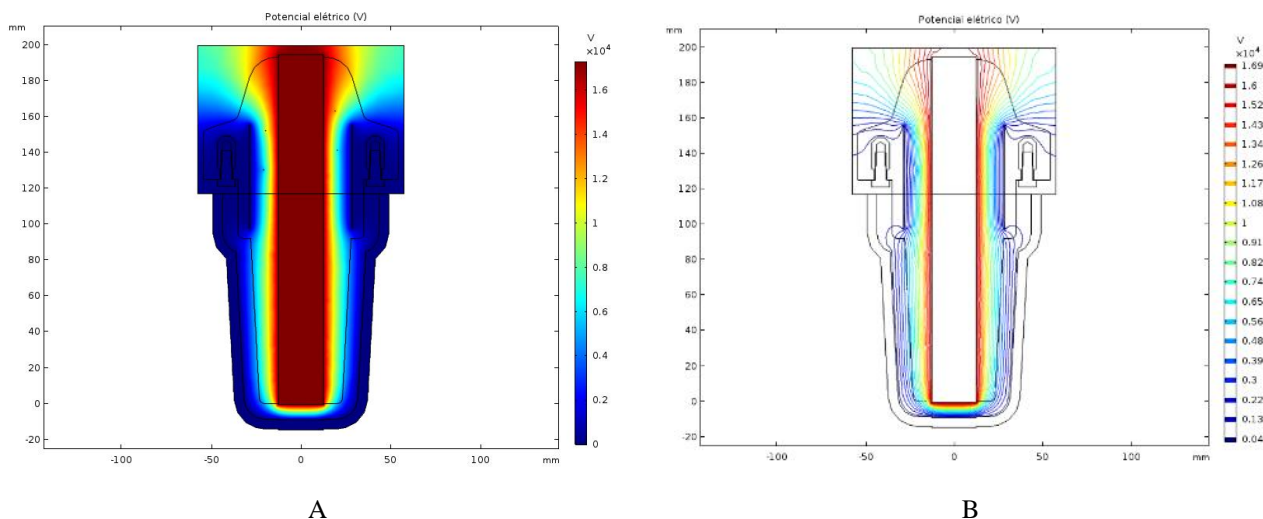


Figura 4.6-Estudo do potencial elétrico do isolador. A - Potencial elétrico. B – Linha equipotenciais.

É utilizada a linha auxiliar 2D (presente na Figura 3.25 B – página 41) para se entender o comportamento do potencial elétrico entre o condutor central e a malha, representado na Figura 4.7. Esta grandeza varia de forma praticamente linear com a distância e alcança um valor nulo no aro da malha. Isto indica que houve uma d.d.p de 17320 V, do condutor para a malha. Após a malha o potencial elétrico cresce ligeiramente até 2000 V. Esta pequena subida verifica-se pelo reduzido campo elétrico ainda presente nesta zona do isolador.

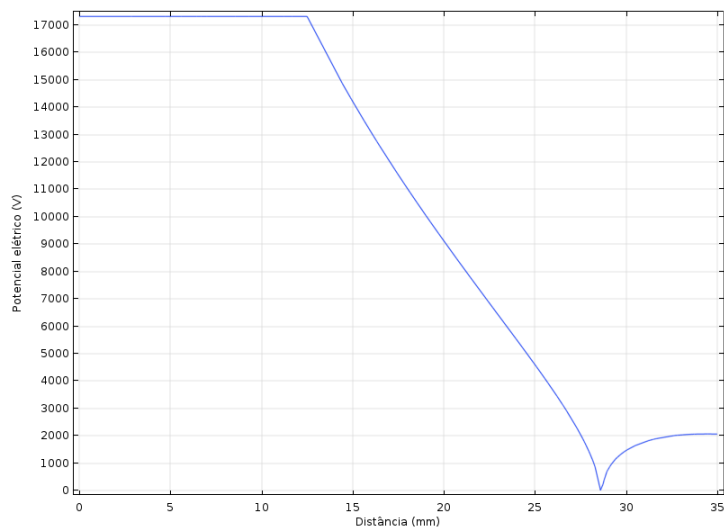


Figura 4.7-Potencial Elétrico entre o condutor e malha.

Na Figura 4.8 notam-se alguns pontos relevantes, nomeadamente em baixo, no condutor de AT e junto aos aros da malha. Dessa forma analisa-se a extremidade da malha onde, pela Figura 4.9, observa-se que o campo elétrico incide com uma intensidade de 6,65 MV/m. O pico de campo elétrico ocorre na extremidade da malha, pois há bastante densidade de carga devido a esta possuir uma geometria bicuda, ou seja, tem um raio de curvatura quase nulo.

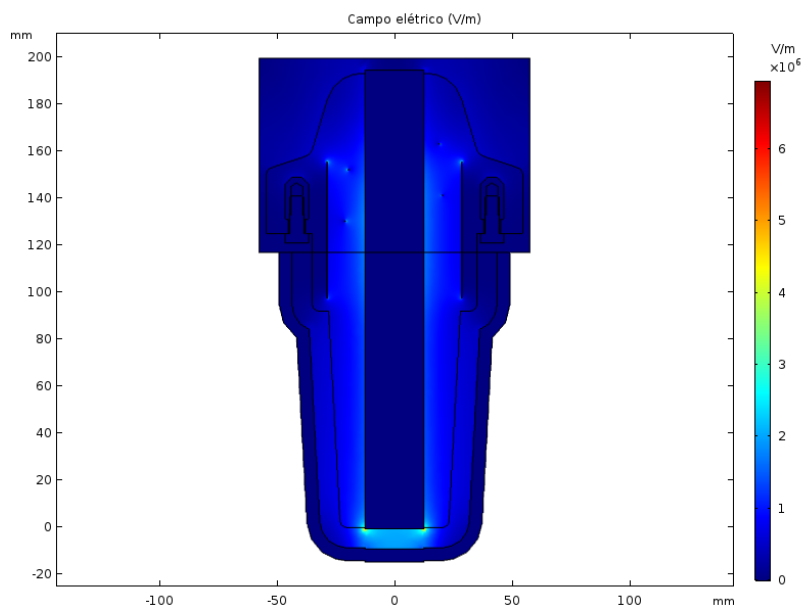


Figura 4.8-Norma do campo elétrico do isolador.

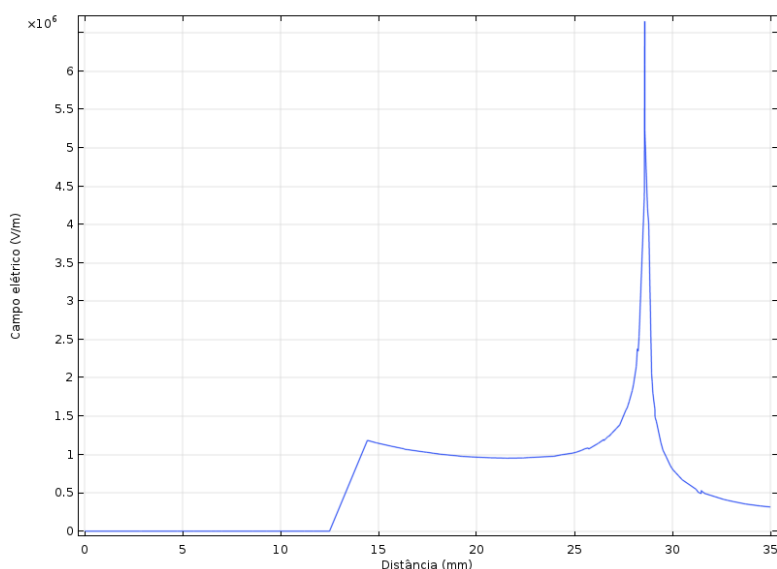


Figura 4.9-Campo elétrico entre o condutor de AT e a extremidade da malha.

#### 4.2.1.2 Estudo das resistências

Replicando a forma de análise anterior, estabelecem-se planos de corte e linhas 3D dentro da peça para estudar como varia a tensão e o campo elétrico entre o condutor e cada uma das resistências.

##### ○ Resistência $R_1$

Na Figura 4.10 apresenta-se, numa vista 3D, uma linha auxiliar, que une a superfície do condutor de AT à da resistência (intersecta a capa de estanho). Serão apresentados gráficos 2D com a evolução do potencial ou do campo elétrico ao longo desta linha. Durante o restante capítulo são utilizadas linhas similares a esta. As linhas equipotenciais que incluem a primeira resistência estão representadas na Figura 4.11 B, têm como base um plano 2D que intersecta a resistência pela metade da sua altura. Na Figura 4.11 A observa-se na primeira resistência, que está ligada ao condutor central de AT, um campo elétrico mais intenso junto às terminações da capa de estanho. Essa intensidade é reproduzida pelos

reduzidos raios de curvatura da capa de estanho, sendo que no seu interior o campo elétrico é nulo devido a ser um corpo condutor.

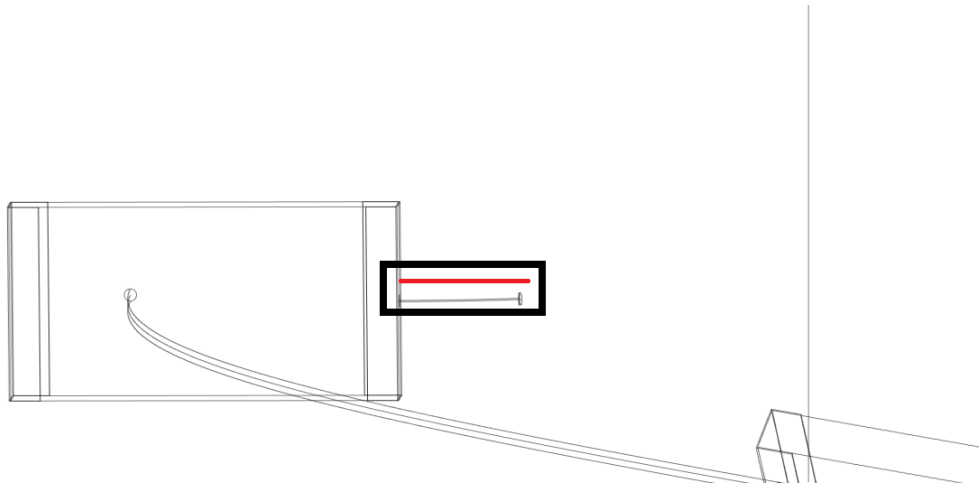


Figura 4.10-Linha de estudo entre a fonte e R1.

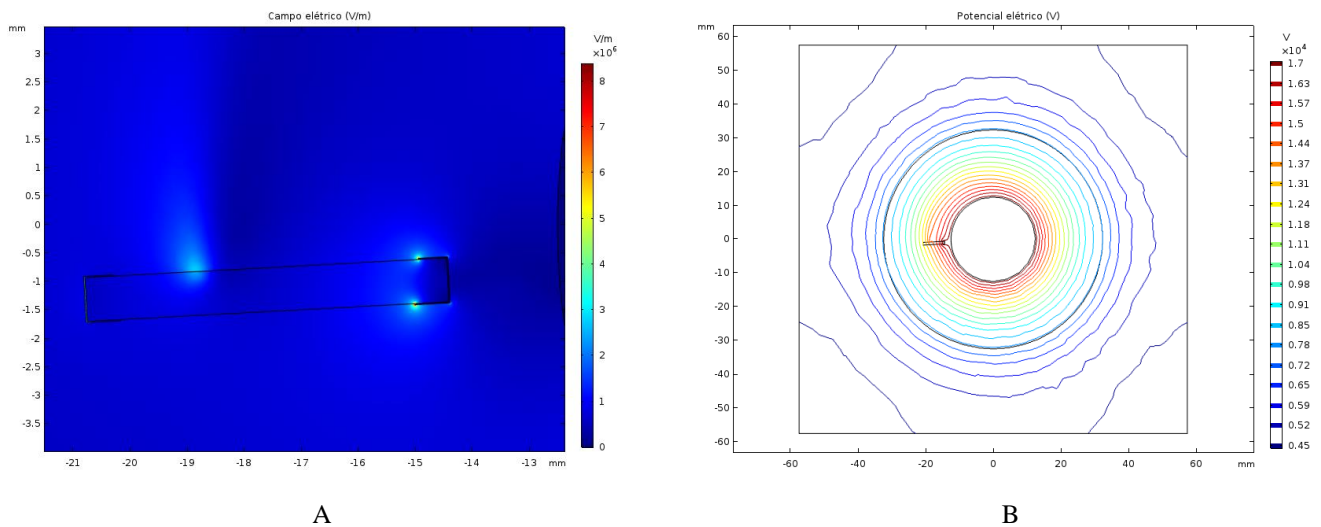
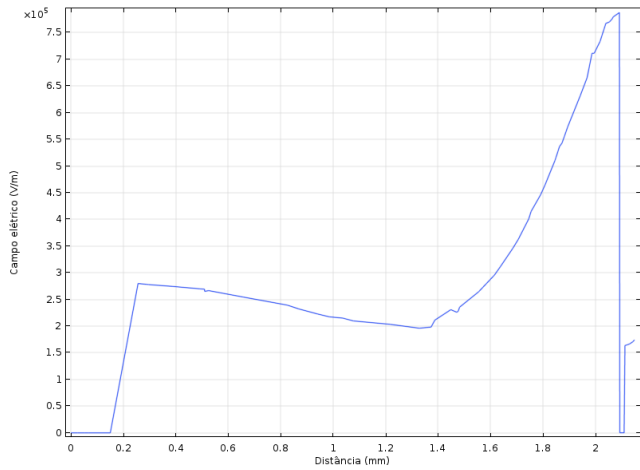
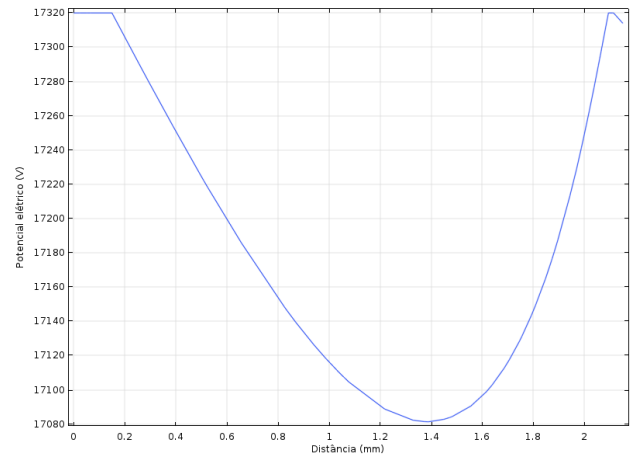


Figura 4.11-Estudo num plano 2D que intersecta a fonte e R1. A – Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

Na Figura 4.12 A observa-se que a norma do campo elétrico na primeira resistência é 0,78 MV/m. Na Figura 4.12 B observa-se que a d.d.p é nula (como se previa), pois o condutor de AT e a capa de estanho da resistência estão ligados pelo fio condutor, logo ao mesmo potencial.



A



B

Figura 4.12-Estudo no percurso entre a fonte e R1. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>2</sub>*

Com a linha vista em 3D na Figura 4.13, faz-se a análise do campo elétrico e da d.d.p que incide na segunda resistência. Dentro da resistência o campo elétrico diminui devido à constante dielétrica aumentar (da *epoxy* que é quatro, para o cerâmico que é sete). Pela Figura 4.14, observa-se que a segunda resistência tem um campo elétrico de 0,67 MV/m, com uma d.d.p de 3975 V. Como a linha intersecta o núcleo em cerâmico da resistência, o seu campo elétrico diminui face à primeira.

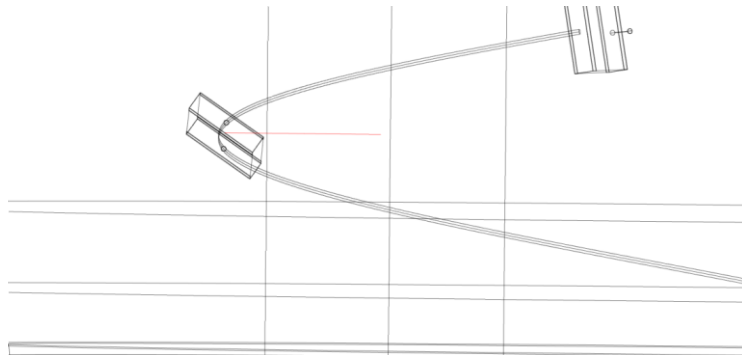
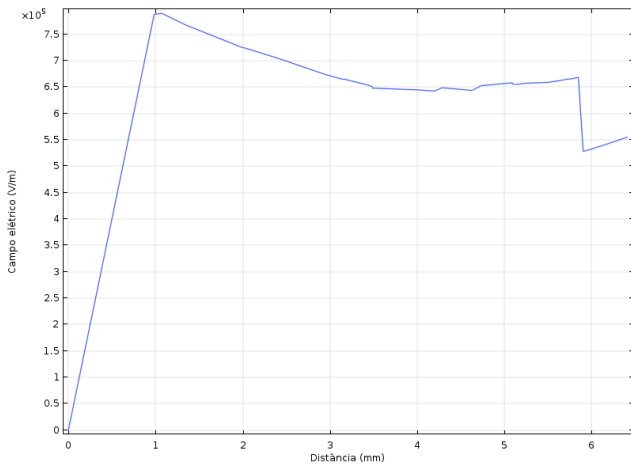
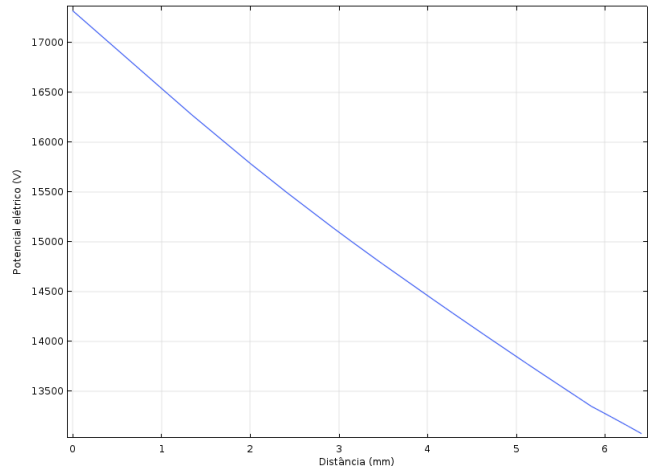


Figura 4.13-Linha de estudo entre a fonte e R2



A



B

Figura 4.14- Estudo no percurso entre a fonte e R2. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>3</sub>*

Através da linha 3D representada na Figura 4.15, observa-se em R3 um campo elétrico de 0,90 MV/m, com uma d.d.p de 5902 V. A d.d.p vai aumentando consoante o ponto de análise do circuito elétrico face ao condutor de AT. Portanto a d.d.p. nesta resistência é logicamente maior que as anteriores, pois pela equação 4.1

$$\text{d. d. p} = U_1 - U_2 \quad (4.1)$$

como  $U_1$  é sempre constante e  $U_2$ , que é o potencial elétrico em R3, diminui, a d.d.p aumenta. O campo elétrico sobre a resistência R3 aumenta, pois a d.d.p face à resistência anterior aumentou e a distância entre o condutor de AT e as duas resistências manteve-se praticamente inalterada. Apesar desta cadeia ter a forma de uma hélice normal o seu grau de abertura é reduzido, o que implica que a distância entre o condutor de AT e cada uma das resistências aumenta muito residualmente.

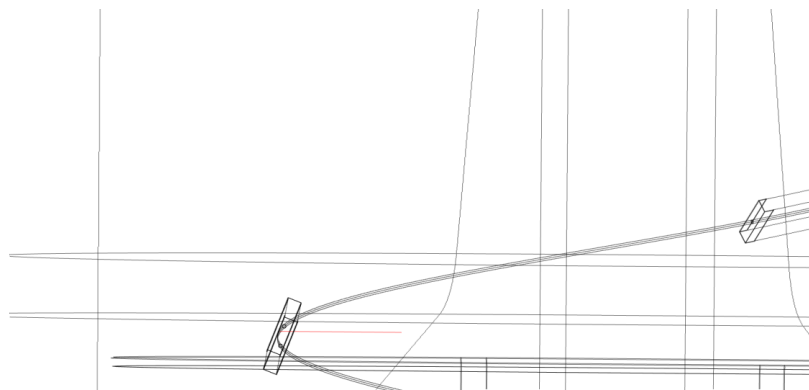
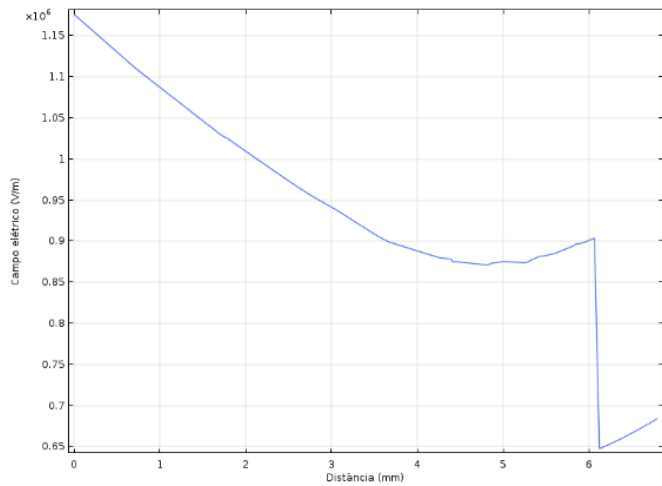
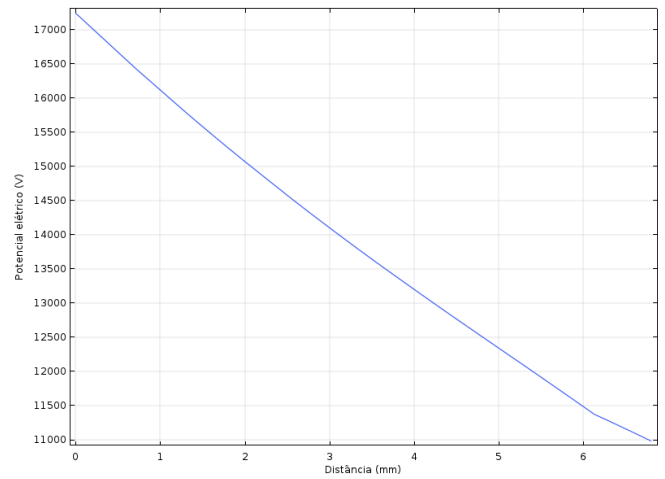


Figura 4.15-Linha de estudo entre a fonte e R3.



A



B

Figura 4.16- Estudo no percurso entre a fonte e R3. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_4$

O valor da norma do campo elétrico em R4, segundo a linha da Figura 4.17, é 1,11 MV/m, com uma d.d.p. de 7990 V, como se observa pela Figura 4.18.

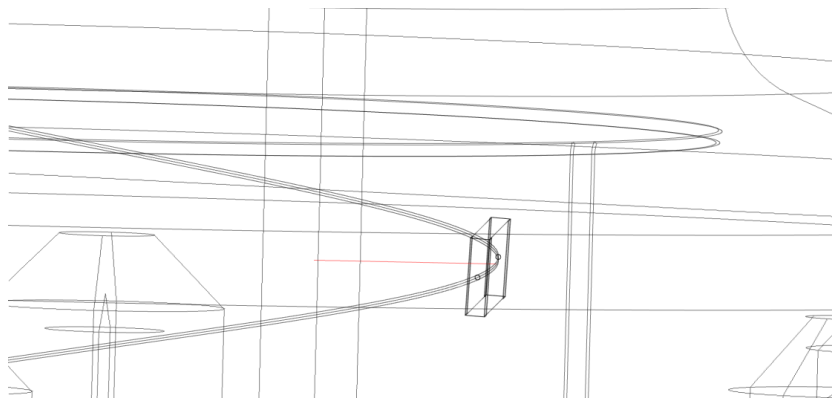
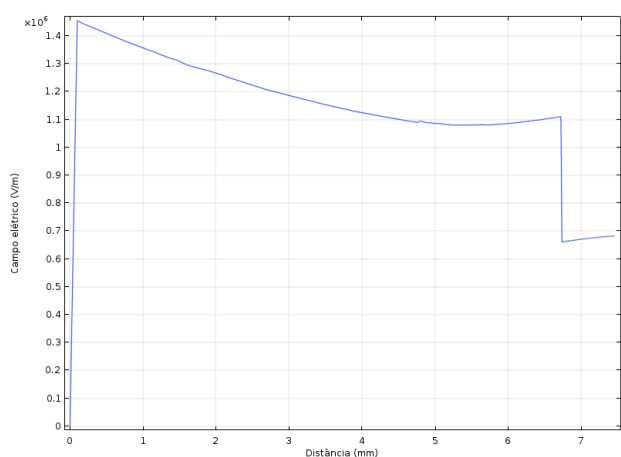
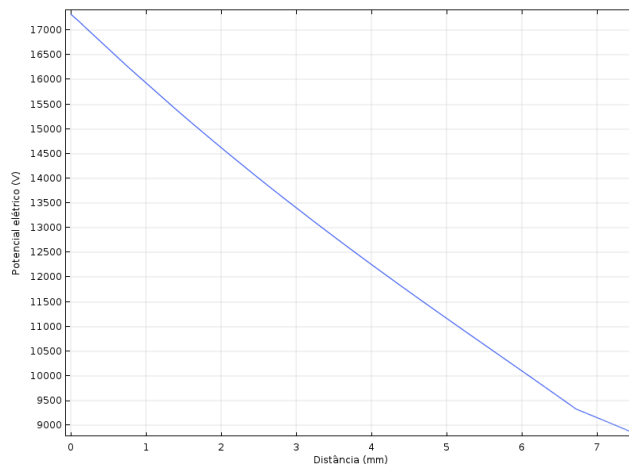


Figura 4.17-Linha de estudo entre a fonte e R4.



A



B

Figura 4.18- Estudo no percurso entre a fonte e R4. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>5</sub>*

Na quinta resistência a norma do campo elétrico, segundo a linha da Figura 4.19, é 1,11 MV/m, com uma d.d.p. de 8877 V, valores que estão representados na Figura 4.20.

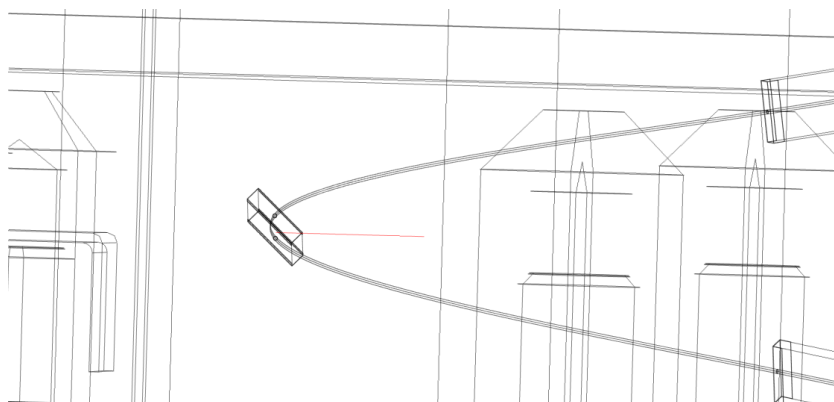
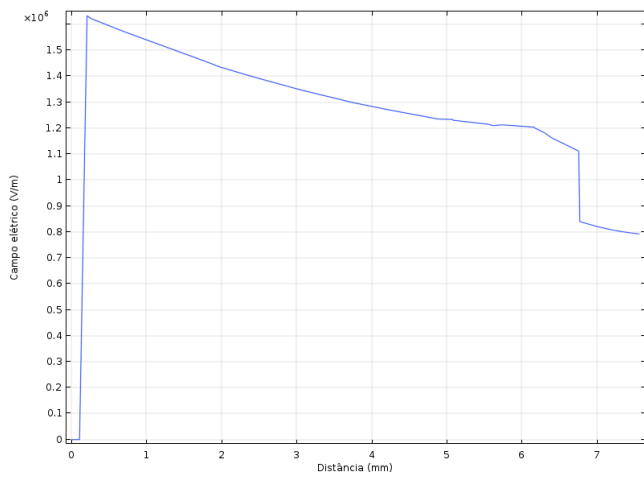
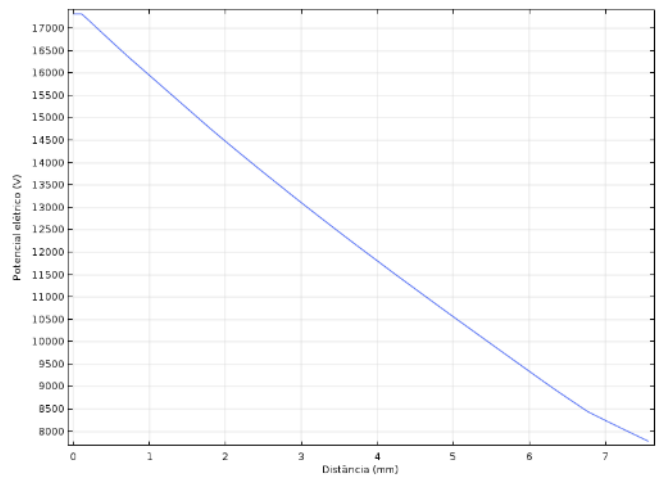


Figura 4.19-Linha de estudo entre a fonte e R5.



A



B

Figura 4.20- Estudo no percurso entre a fonte e R5. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>6</sub>*

No percurso da Figura 4.21 o campo elétrico incidente em R6 é 1,12 MV/m, com uma d.d.p. de 10683 V, como se verifica pela Figura 4.22. O campo elétrico apresenta um valor semelhante aos incidentes nas duas resistências anteriores, devido à proporção de d.d.p que aumenta de resistência para resistência, ser quase igual à proporção da distância que aumenta relativamente em cada uma dessas duas componentes.

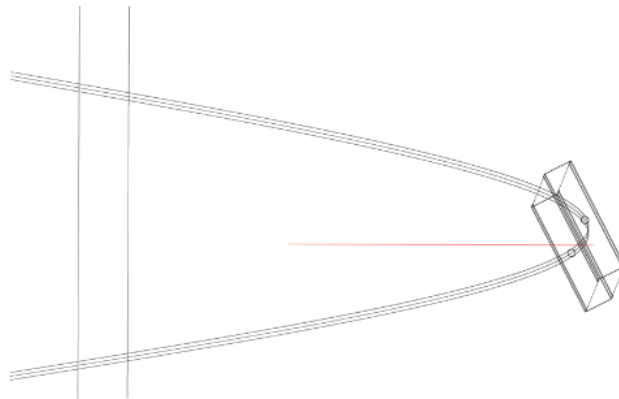
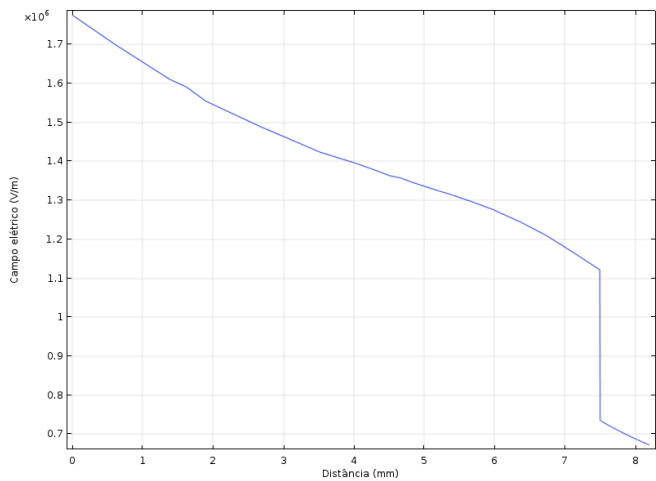
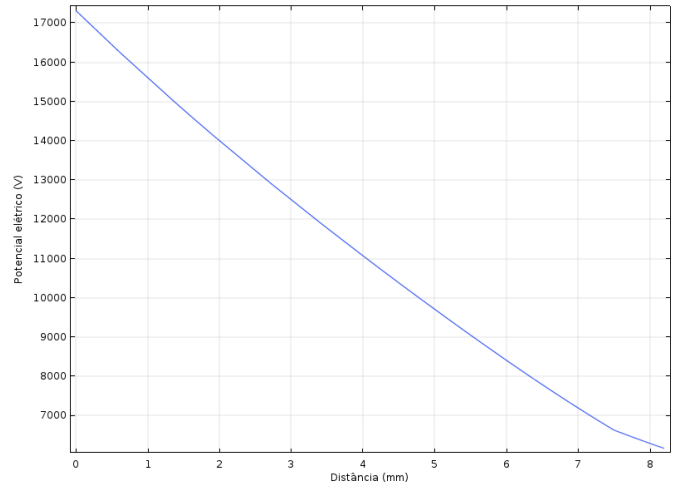


Figura 4.21-Linha de estudo entre a fonte e R6.



A



B

Figura 4.22- Estudo no percurso entre a fonte e R6. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>7</sub>*

Segundo a linha da Figura 4.23, o campo elétrico em R7 é 1,33 MV/m, com uma d.d.p de 12080 V. Os valores mencionados estão na Figura 4.24.

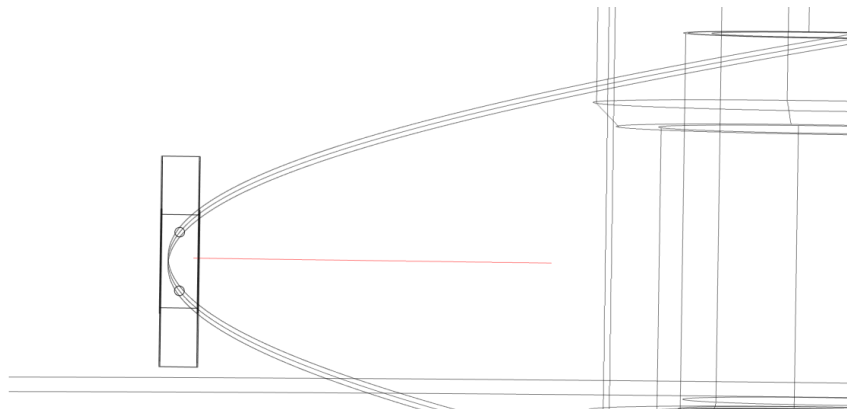
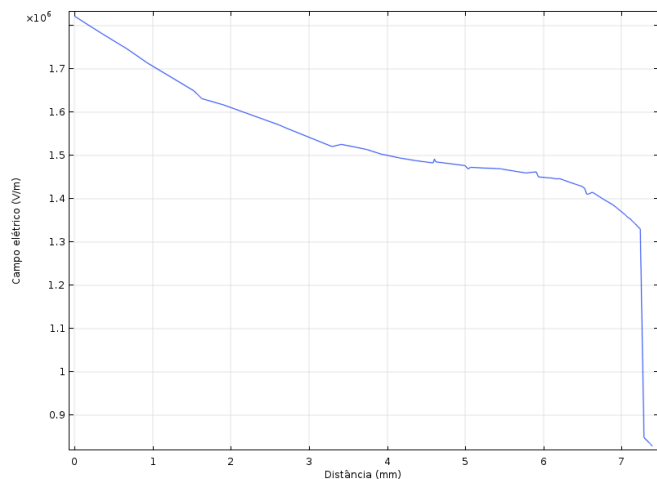
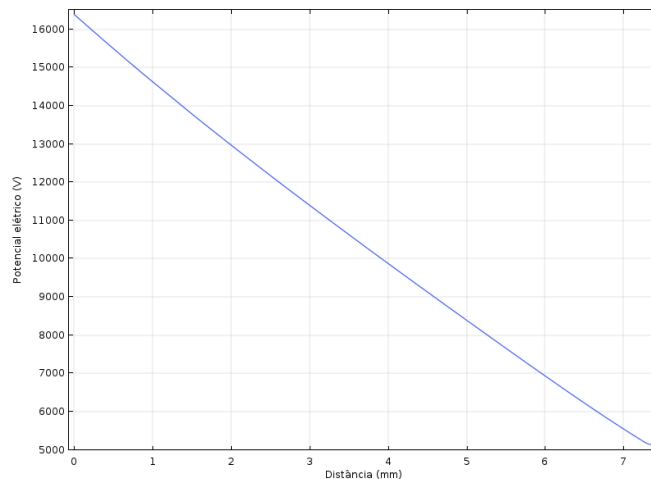


Figura 4.23-Linha de estudo entre a fonte e R7.



A



B

Figura 4.24- Estudo no percurso entre a fonte e R7. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>8</sub>*

Segundo a linha da Figura 4.25, na capa de estanho de R8 é registado um campo elétrico de 4,34 MV/m, com uma d.d.p. de 15155 V. Os valores mencionados estão representados na Figura 4.26. No que se refere ao campo elétrico, este é proporcional à d.d.p. e como esta aumenta, o campo elétrico também aumenta, porque a distância para o condutor de AT é praticamente igual à da resistência anterior.

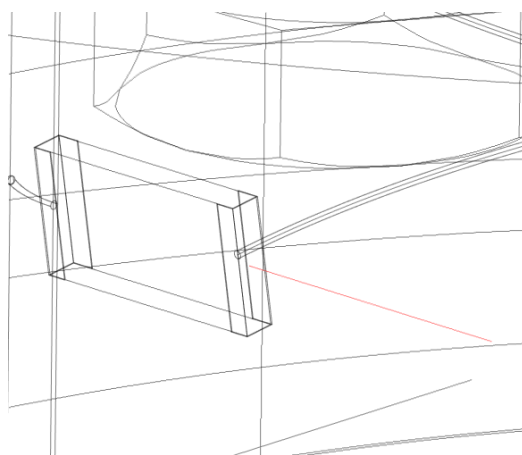


Figura 4.25-Linha de estudo entre a fonte e R8.

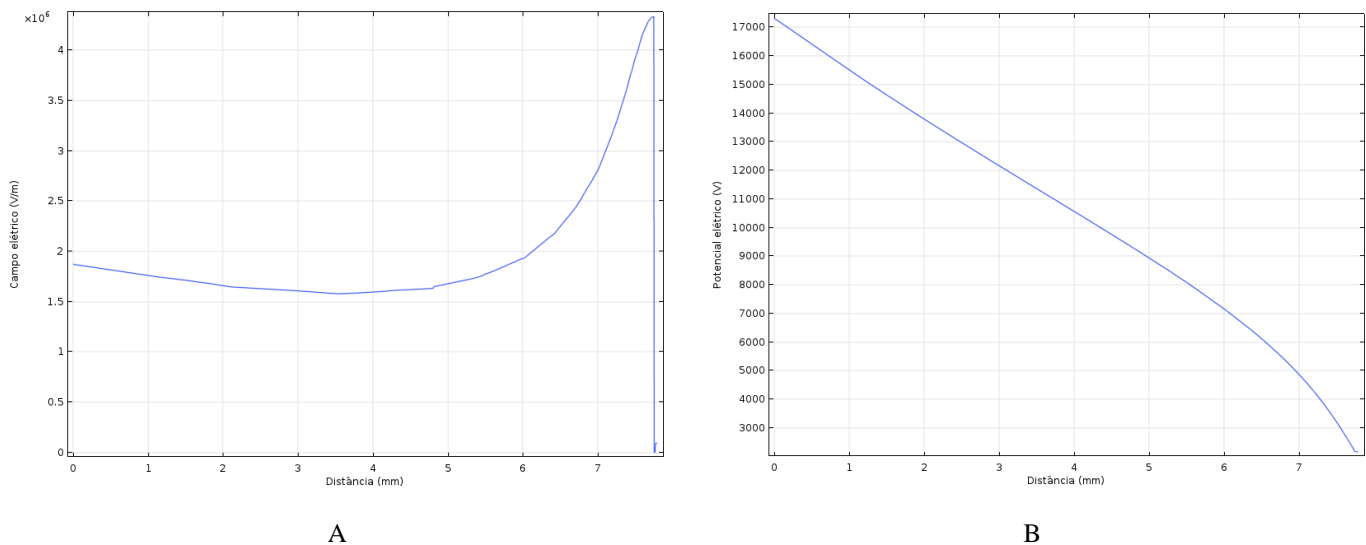


Figura 4.26- Estudo no percurso entre a fonte e R8. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

#### 4.2.2 Caso A: Isolador com aro da malha reduzido e anomalias

Na segunda parte deste caso executa-se o mesmo estudo com anomalias em locais que após a análise anterior se pensa trazerem sérios riscos para a peça. Para tal estão colocadas bolhas de ar junto dos materiais que possuem maior distribuição de campo e tenham maior queda de potencial, como é o caso da malha, condutor de AT e resistências.

##### 4.2.2.1 Estudo da malha e condutor de AT

Um ponto crítico deste isolador é a malha, mais concretamente as suas extremidades, algo que se verificou no ponto anterior. Desta forma introduzem-se duas bolhas de ar, uma na extremidade da malha e outra junto à malha, no lado de dentro, para perceber como se distribui o campo na presença de gases e, se pode haver influência sobre a queda de potencial entre o condutor de AT e esta. Além dessas também se coloca uma bolha de ar na superfície do condutor de AT.

##### ○ *Bolha de ar na extremidade da malha*

Pela Figura 4.27 A, observa-se que a presença de uma bolha de ar junto ao aro da malha aparenta não influenciar a distribuição de campo elétrico no interior da peça, face ao regime normal. No entanto, na Figura 4.27 B, verifica-se com maior detalhe junto da zona do aro, onde está a bolha de ar, que o campo elétrico é extremamente intenso, pelo que há impacto da força elétrica deste campo sobre a bolha de ar. Com o auxílio da linha representada na Figura 3.25 B (página 41), observa-se um cenário problemático devido ao campo elétrico estar bastante concentrado neste local. A Figura 4.28 A mostra que a extremidade da malha está sujeita a uma intensidade de campo elétrico de 9,63 MV/m e a bolha de ar a 3,90 MV/m.

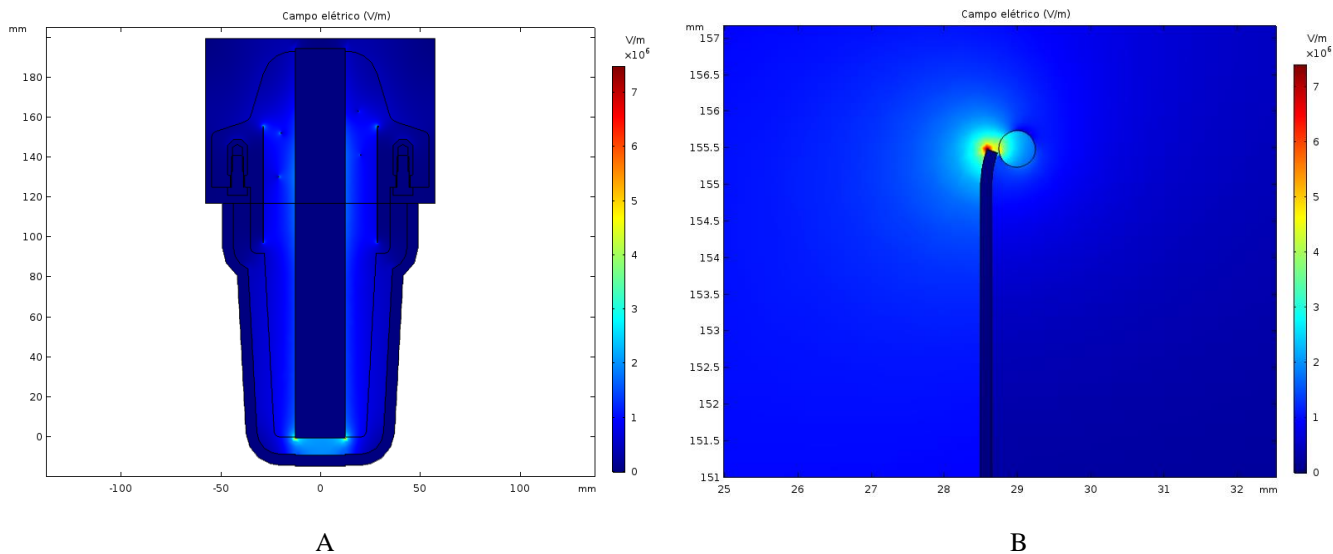


Figura 4.27- Cenário de anomalia. A - Campo elétrico. B – Detalhe do campo elétrico bolha de ar tangente ao aro da malha.

Como em condições ideais (temperatura ambiente e pressão atmosférica normal) o campo de ruptura do ar é de 3 MV/m [27] e a bolha de ar está submetida a um campo elétrico maior que este, haverá em consequência disso uma DP no local da bolha de ar. O campo elétrico na vizinhança da extremidade da malha também é deveras intenso, 9,62 MV/m, e está bastante próximo do valor do campo de ruptura da resina *epoxy*, que tem um valor de 10 MV/m [27]. No entanto esse valor não é suficiente para provocar fraturas no material. O potencial elétrico não é analisado num gráfico 2D, pois apresenta um comportamento igual ao do regime normal.

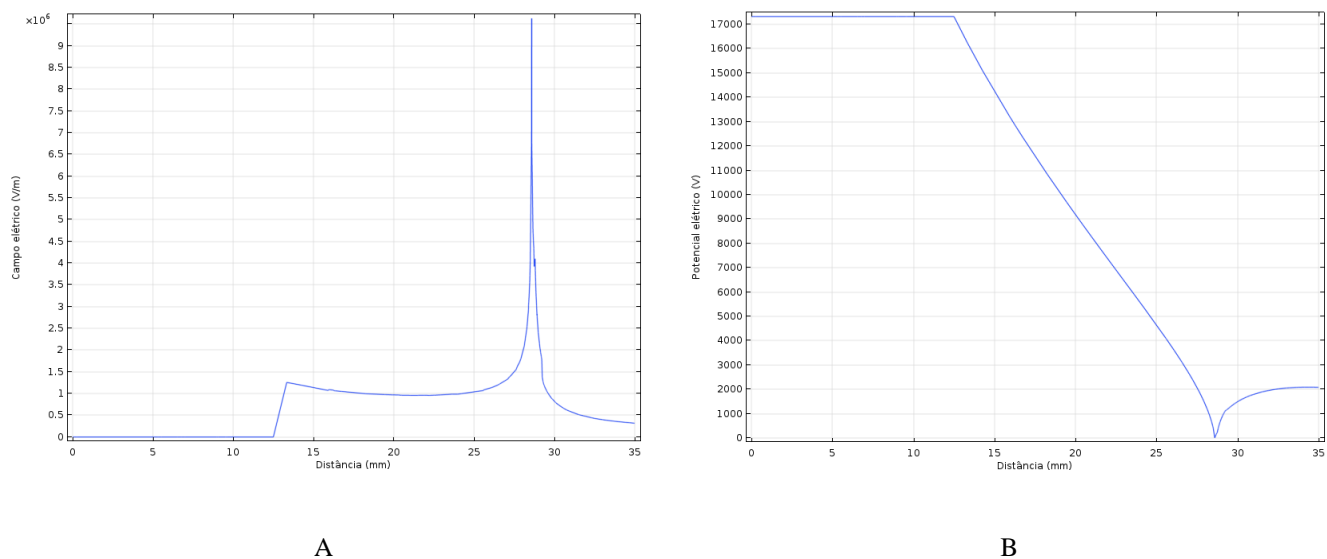


Figura 4.28-Estudo no percurso entre o condutor de AT e a malha com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

Através da Figura 4.28 B, percebe-se que em relação ao potencial elétrico não se registam muitas diferenças quanto à presença de ar, no percurso entre o condutor e a extremidade da bolha de ar. Registra-se uma d.d.p na bolha de ar de 17086 V, e para a extremidade da malha de 17305 V, não perfazendo os

17320 V. Comparando com a Figura 4.7 (página 47) do cenário sem anomalia, no percurso após passar a malha o potencial atinge igual valor (2000 V).

○ 2ª Bolha de ar malha

Pela Figura 4.29 observa-se a localização da segunda bolha de ar na malha e da linha que a atravessa. Esta bolha foi introduzida de modo a simular espaços de ar que fiquem por preencher, aquando a construção do molde e, entender os efeitos da sua presença.

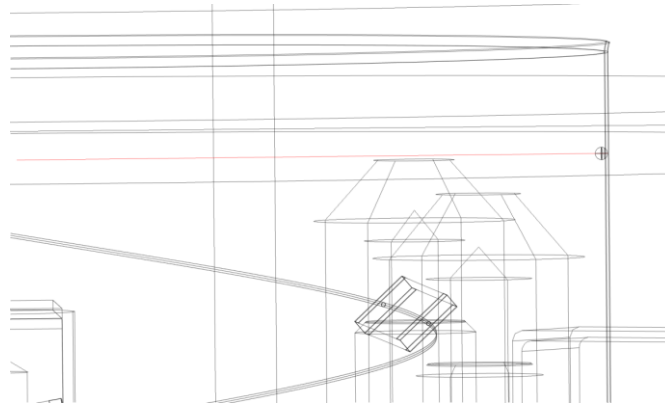
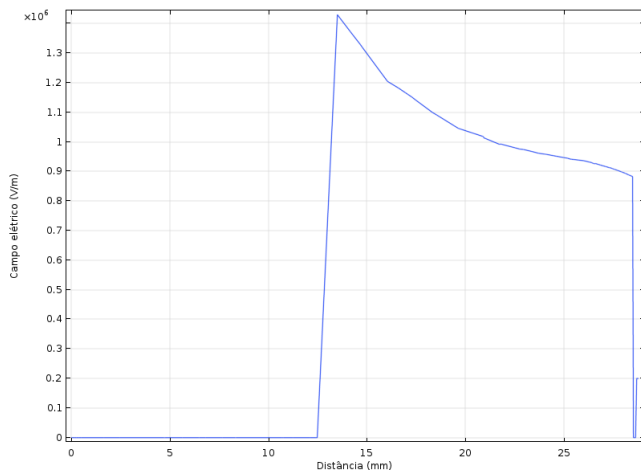
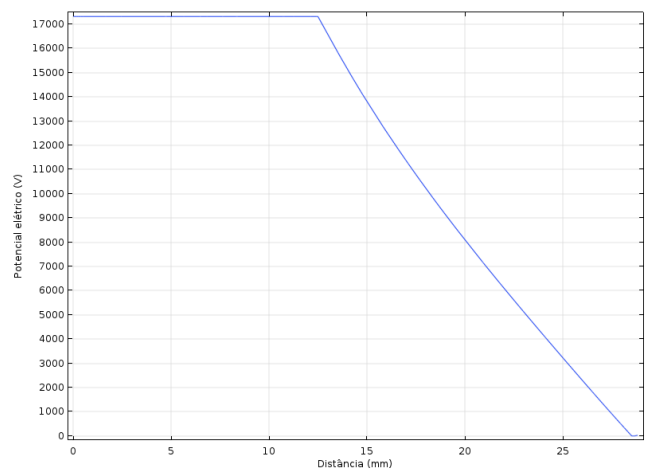


Figura 4.29-Linha de estudo entre o condutor de AT e a malha com 2ª anomalia.

Na Figura 4.30, observa-se o comportamento do campo elétrico antes da introdução da bolha de ar no valor de 0,88 MV/m, com uma d.d.p de 17320 V. Com a introdução da bolha existem diferenças nas duas grandezas, como se observa na Figura 4.31, registando-se um campo elétrico na bolha de 1,19 MV/m, com uma d.d.p de 16920 V. Esta situação não é prejudicial, pois não supera o campo de disrupção do ar gasoso. A presença da bolha de ar aumenta em 0,3 MV/m o campo elétrico e diminui a d.d.p em 400 V.



A



B

Figura 4.30-Estudo no percurso entre o condutor de AT e a malha, antes da introdução da 2ª anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

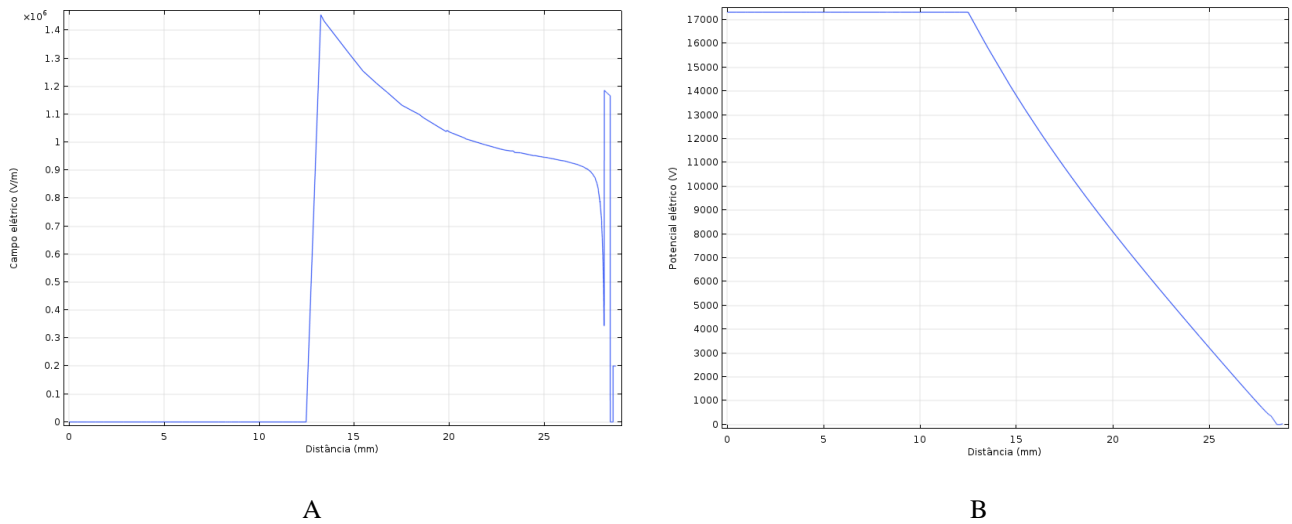


Figura 4.31-Estudo no percurso entre o condutor de AT e 2ª anomalia na malha. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Bolha de ar no condutor*

Com a linha 3D presente na Figura 4.32, observa-se que a bolha de ar está tangente à fronteira entre o condutor central e a resina *epoxy*, de modo a simular um vazio. No cenário antes da introdução da bolha de ar junto ao condutor, representado na Figura 4.33, o campo elétrico é 1,28 MV/m, com uma d.d.p de 170 V. Com a presença desta bolha o campo elétrico sobe para 1,61 MV/m, com uma d.d.p. de aproximadamente 970 V no condutor, como está ilustrado na Figura 4.34. Comparando os dois cenários conclui-se que na presença de ar o campo elétrico nesse espaço aumenta 0,3 MV/m, enquanto a d.d.p aumenta 800 V.

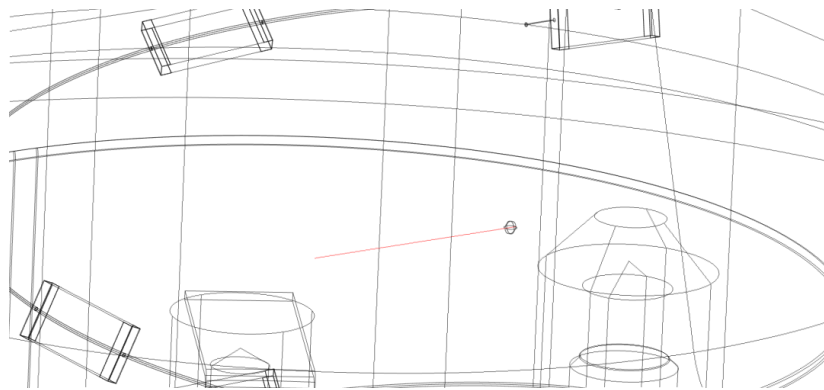
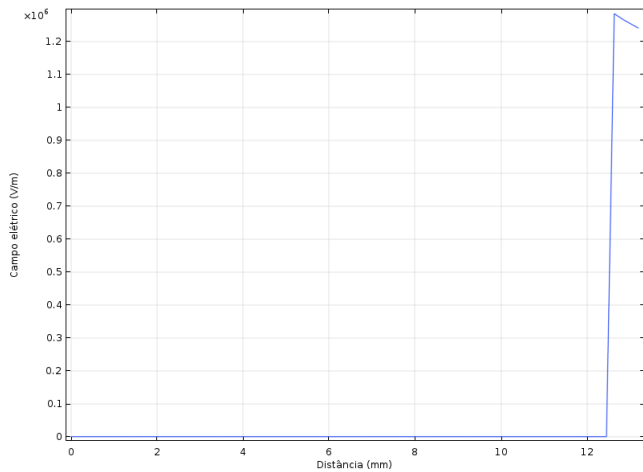
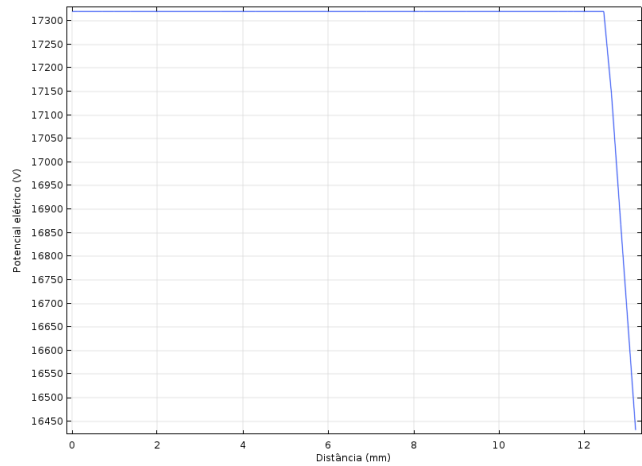


Figura 4.32-Linha de estudo entre o centro do isolador e o condutor de AT com anomalia.

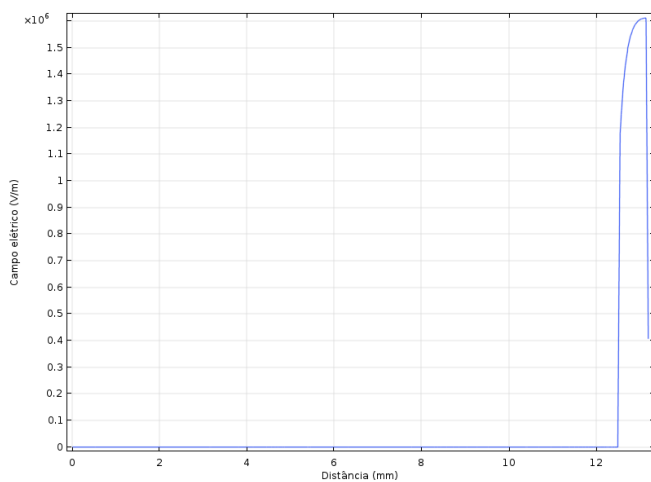


A

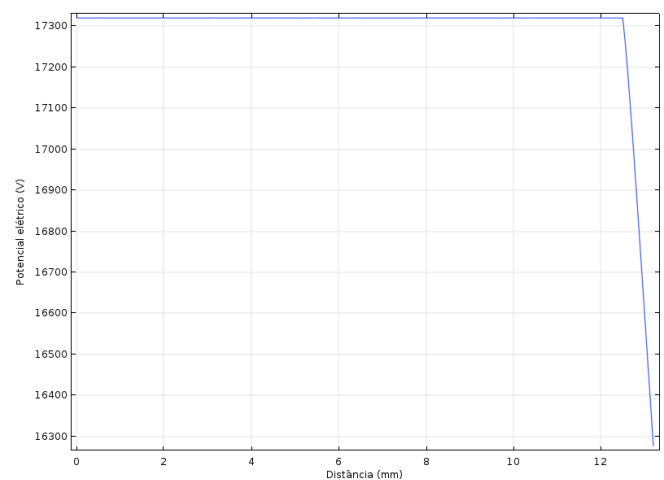


B

Figura 4.33-Estudo no percurso entre o centro do isolador e condutor de AT, antes da introdução de anomalia no condutor de AT. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.



A



B

Figura 4.34-Estudo no percurso entre o centro do isolador e condutor de AT, com anomalia no condutor de AT. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

#### 4.2.2.2 Estudo das resistências

Já antes se confirmou que as resistências têm alguns pontos críticos, como tal introduziram-se bolhas de ar a meio do percurso onde se fez a análise destas componentes no cenário sem anomalias. Para análise das anomalias nas resistências utiliza-se as mesmas linhas 3D que no cenário sem anomalias.

##### ○ Resistência $R_1$

Na primeira resistência os seus gráficos 2D trazem informações mais coerentes, visto que esta faz uma perpendicular face ao condutor central no plano 2D. Pela Figura 4.35 A, vê-se a maior incidência de campo elétrico nas extremidades retas da capa de estanho. No plano das linhas equipotenciais, (Figura 4.35 B) observa-se que a linha de maior potencial está disposta de maneira a incluir a capa de estanho.

Sobre a bolha de ar incide um campo elétrico de 0,59 MV/m e uma d.d.p. de 174 V, e sobre a vizinhança da capa de estanho de R1 há uma intensidade de campo elétrico de 0,78 MV/m, com uma d.d.p. nula. As informações sobre as grandezas referidas estão expostas nas Figura 4.36.

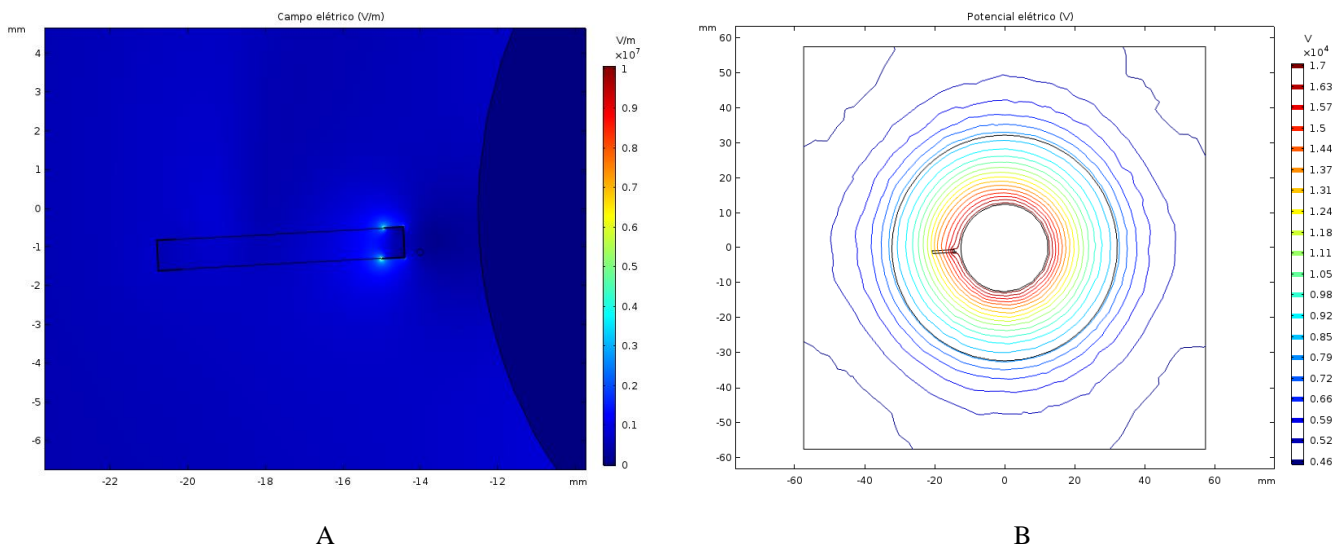


Figura 4.35-Estudo num plano 2D que intersecta a fonte, R1 e anomalia. A – Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

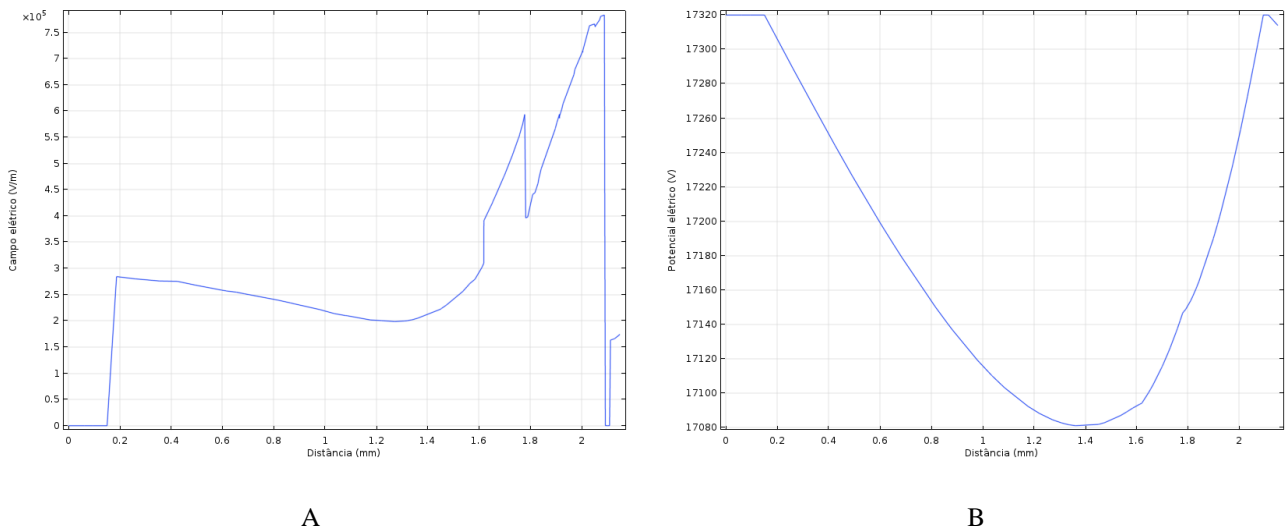
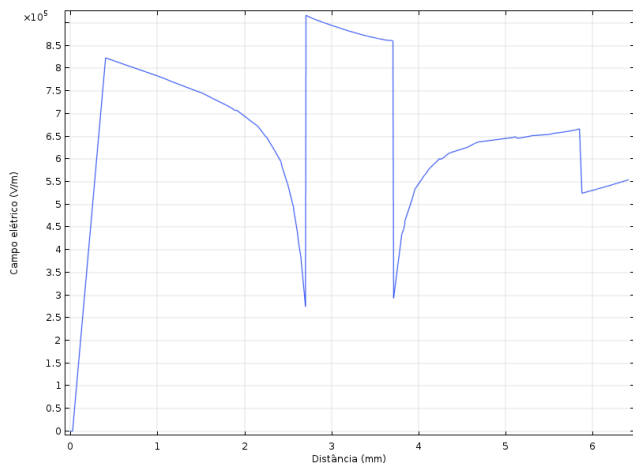


Figura 4.36-Estudo no percurso entre a fonte e R1 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

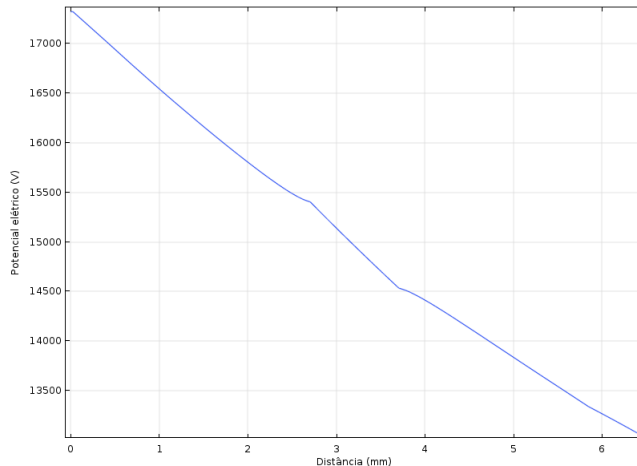
○ *Resistência  $R_2$*

Pelos gráficos da Figura 4.37, observa-se que o campo elétrico da fronteira da resina epoxy para o interior da bolha de ar é de 0,92 MV/m, com uma d.d.p. de 1918 V.

Através da mesma figura observa-se que sobre a segunda resistência incide um campo na ordem de 0,67 MV/m, com uma d.d.p de 3980 V.



A

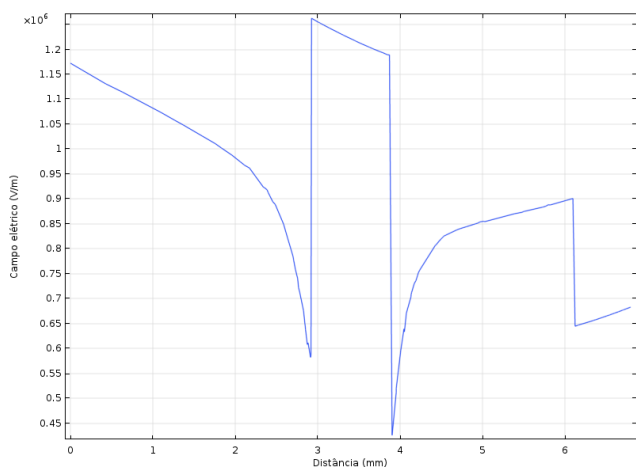


B

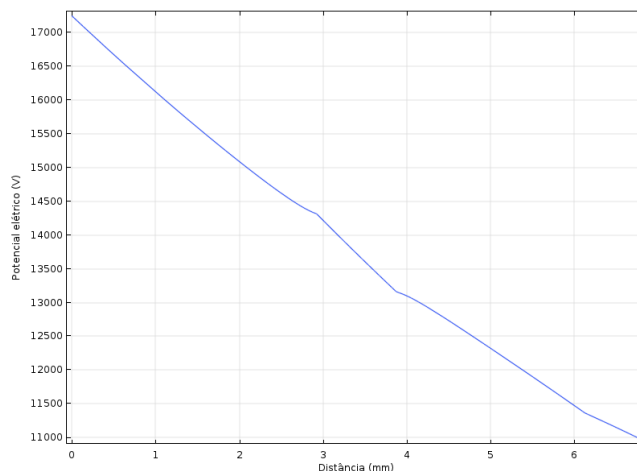
Figura 4.37-Estudo no percurso entre a fonte e R2 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_3$

Observando os gráficos da Figura 4.38 verifica-se que a incidência de campo elétrico sobre a bolha de ar é 1,26 MV/m, com uma d.d.p. de 3010 V. Na terceira resistência observa-se que o campo elétrico na fronteira entre a epoxy e a parte cerâmica é de 0,90 MV/m e tem uma d.d.p. de 5932 V.



A

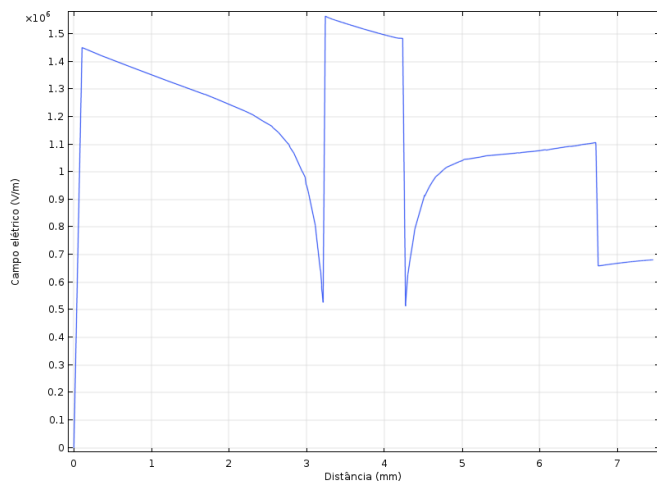


B

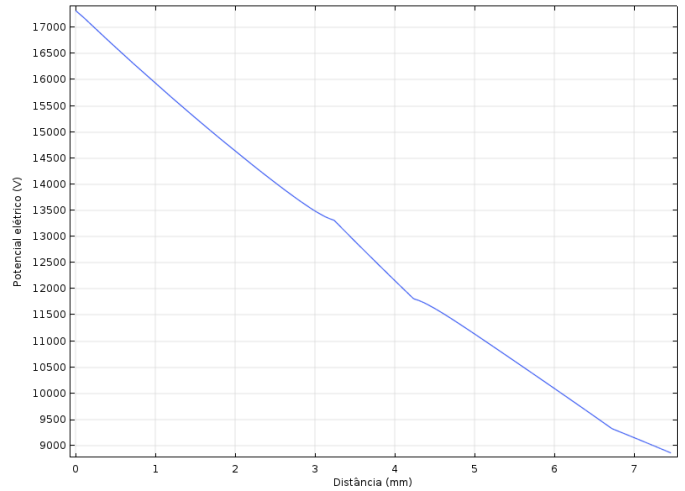
Figura 4.38-Estudo no percurso entre a fonte e R3 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_4$

No percurso até à quarta resistência o campo elétrico na bolha de ar é de 1,56 MV/m, sendo que esta grandeza subiu um 1 MV/m da resina para o ar e com uma d.d.p de 4010 V. Sobre a resistência R4 incide um campo elétrico de 1,11 MV/m, com uma d.d.p. de 7993 V. Os valores mencionados observam-se nos gráficos das Figura 4.39.



A

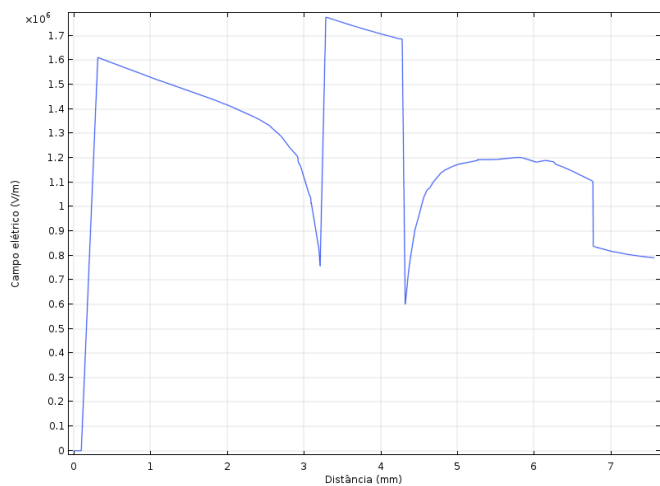


B

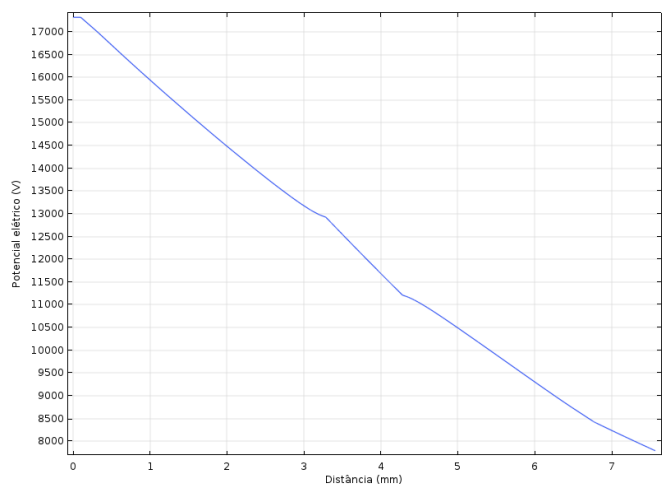
Figura 4.39-Estudo no percurso entre a fonte e R4 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_5$

A bolha de ar presente no percurso entre o condutor de AT e resistência  $R_5$  está submetida a campo elétrico de 1,78 MV/m, sendo que cresce 1 MV/m da resina para o ar, com uma d.d.p. de 4397 V. O campo elétrico na resistência  $R_5$  é 1,10 MV/m, com uma d.d.p. de 8893 V. Os valores neste ponto referidos encontram-se nos gráficos da Figura 4.40.



A

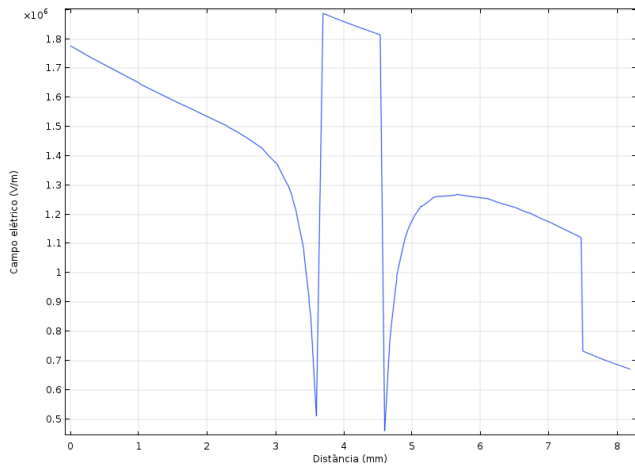


B

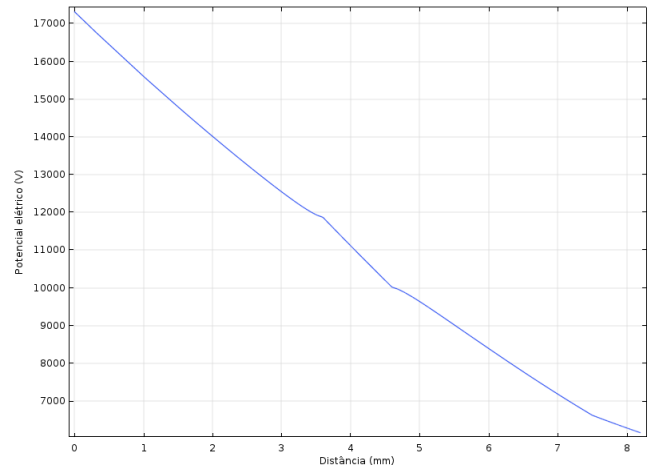
Figura 4.40-Estudo no percurso entre a fonte e R5 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_6$

Na bolha de ar entre o condutor e a resistência  $R_6$ , é registado um campo elétrico com intensidade de 1,89 MV/m, o que pela Figura 4.41 significa que há um crescimento tremendo desta grandeza na ordem de 1,3 MV/m, com uma d.d.p. de 5633 V. Em relação a  $R_6$  há a incidência de um campo elétrico de 1,12 MV/m, com uma d.d.p. de 10666 V.



A

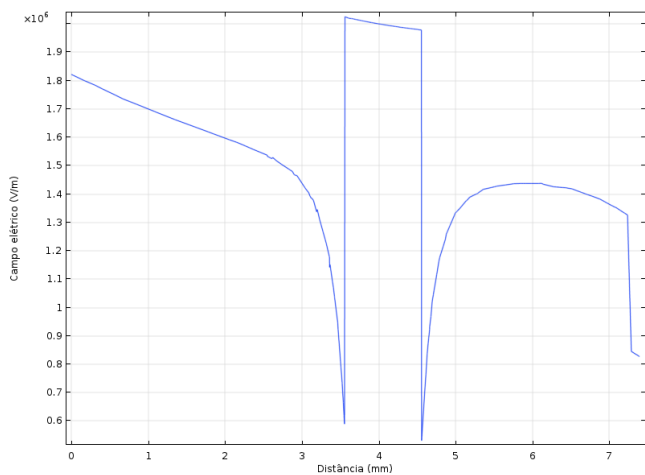


B

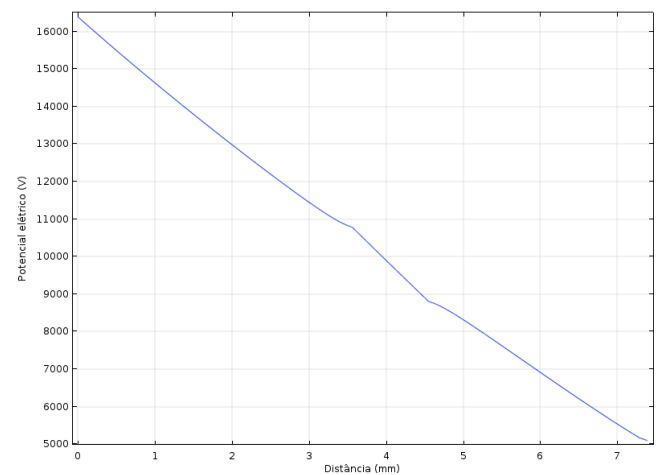
Figura 4.41-Estudo no percurso entre a fonte e R6 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_7$

Na bolha de ar presente entre o condutor e a resistência  $R_7$  há um campo elétrico com intensidade de 2,03 MV/m, que sobe na fronteira *epoxy-ar* perto de 1,4 MV/m. Este é um crescimento mais de 300%, com uma d.d.p. de 6532 V. Na resistência  $R_7$  incide um campo elétrico de 1,33 MV/m, que diminui perto de 0,5 MV/m, com uma d.d.p. de 12084 V. Os valores mencionados encontram-se ilustrados na Figura 4.42.



A



B

Figura 4.42-Estudo no percurso entre a fonte e R7 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_8$

A última resistência,  $R_8$ , tal como a primeira é perpendicular à superfície lateral do condutor, por isso é pertinente fazer-se a representação das duas grandezas de estudo também em gráficos 2D. Pela Figura 4.43 A entende-se que a bolha de ar tem um campo elétrico menor ao que incide na vizinhança da capa de estanho da resistência, uma tendência contrária aos outros casos. Outra zona crítica corresponde à superfície do fio que liga a penúltima à última resistência, pois tem um campo elétrico bastante intenso. Já em relação ao potencial elétrico como se pode ver na Figura 4.43 B as linhas

equipotenciais, na zona da resistência, distribuem-se de forma não uniforme devido à sua disposição. Isto acontece porque neste plano é intersectada a capa de estanho da resistência, que é equipotencial e, portanto, a linha equipotencial tem de obedecer à sua localização.

Através dos gráficos da Figura 4.44 A observa-se que o campo elétrico na bolha de ar é de 2,12 MV/m e na resistência é de 4,33 MV/m. O campo elétrico na instância da capa de estanho de R8 é bastante elevado, pois como nessa coordenada a linha 3D está perto da superfície de um condutor, há bastante densidade de carga e daí o campo elétrico ser mais intenso que nas resistências restantes. Nos gráficos da Figura 4.44 B observa-se uma d.d.p na bolha de 5595 V e em R8 de 15155 V.

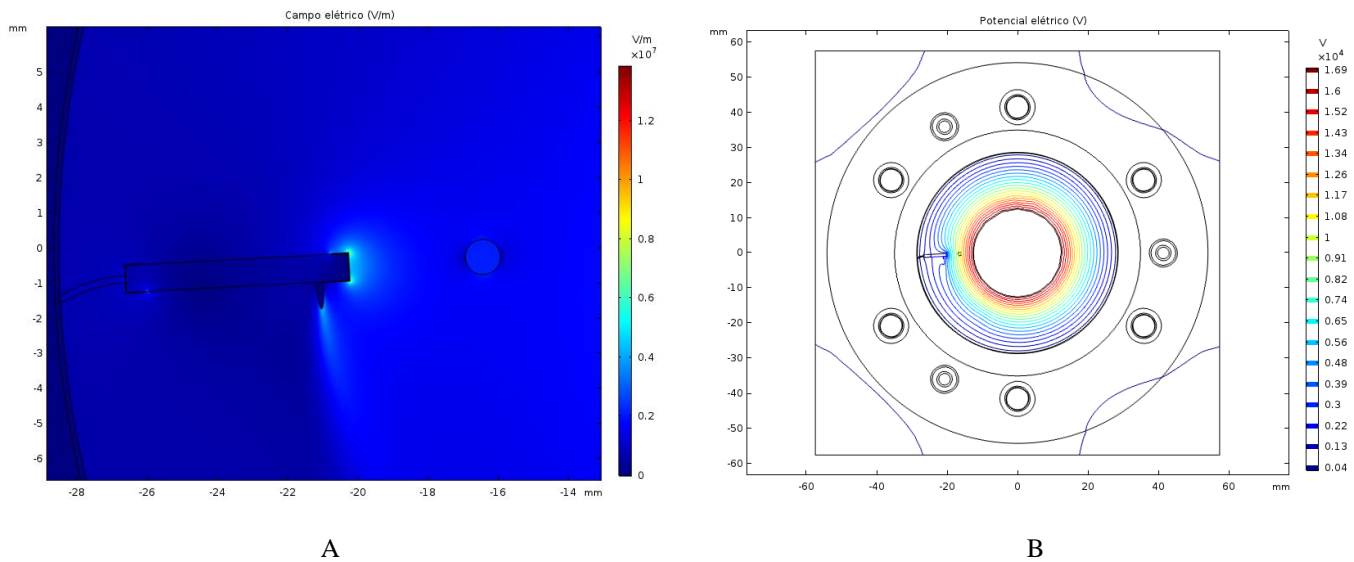


Figura 4.43-Estudo num plano 2D que intersecta a fonte, R8 e anomalia. A – Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

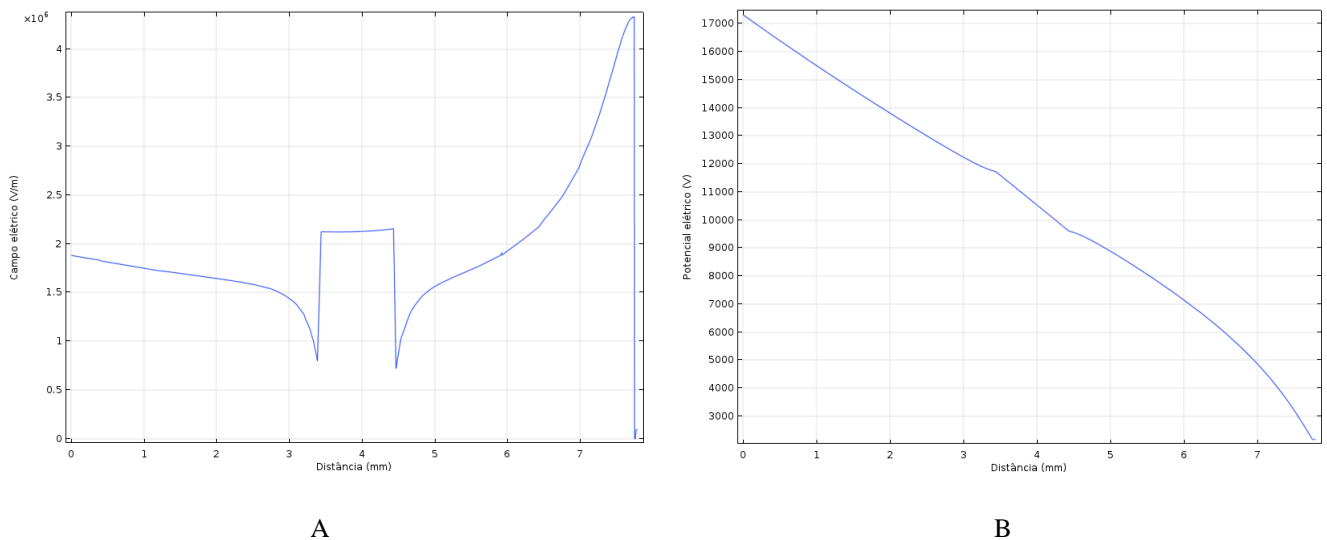


Figura 4.44-Caso A: Presença de anomalia no percurso entre o condutor de AT e a resistência R8. A - Campo elétrico. B - Potencial Elétrico.

### 4.2.3 Caso B: Isolador com aro da malha enrolado e sem anomalias

Neste segundo caso aumenta-se o raio de curvatura das extremidades superior e inferior da malha para o valor máximo e realiza-se o estudo das mesmas grandezas, com e sem anomalias, nos mesmos locais que no caso A.

#### 4.2.3.1 Estudo da malha

Na Figura 4.45 A nota-se comparativamente ao caso A, que o aumento de raio de curvatura permite uma uniformidade de campo junto das extremidades superiores e inferiores da malha. Em relação ao potencial elétrico, pela Figura 4.45 B observa que esta grandeza está distribuída uniformemente, de tal forma que o condutor central espelha praticamente as tensões.

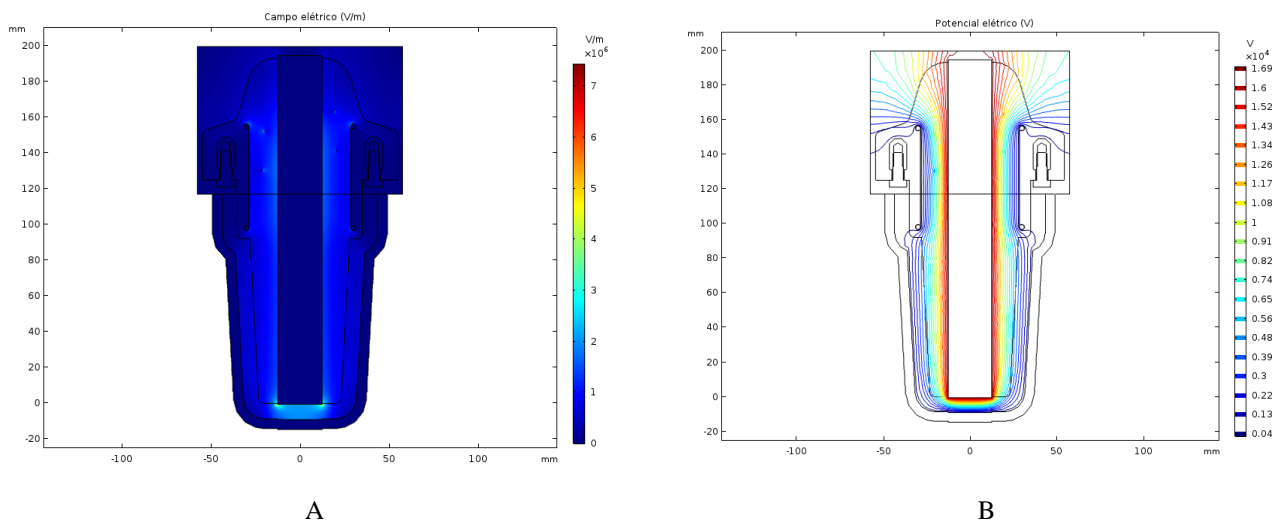


Figura 4.45-Estudo do isolador com aro da malha enrolado. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

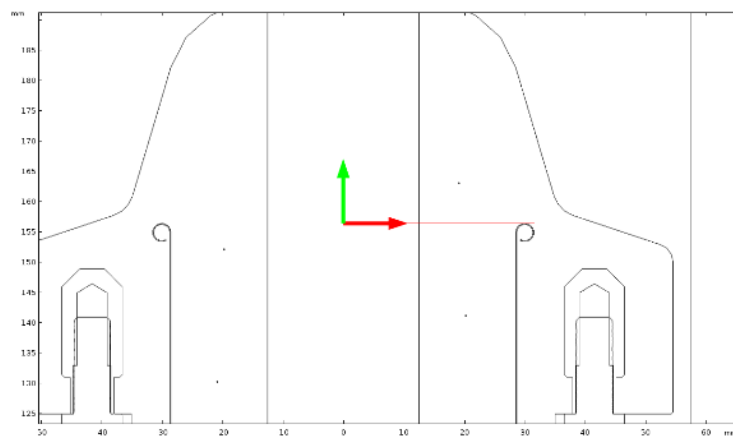
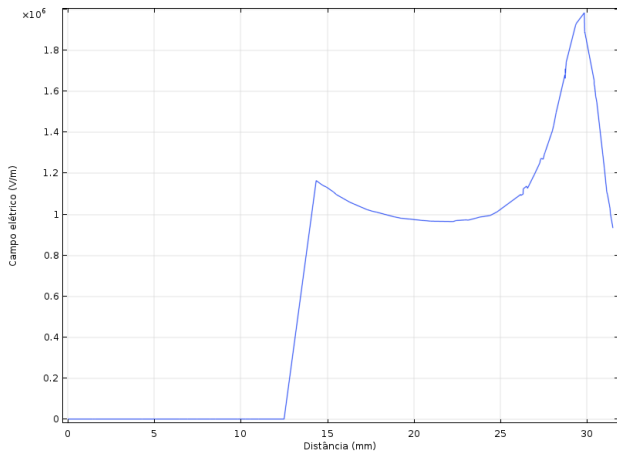
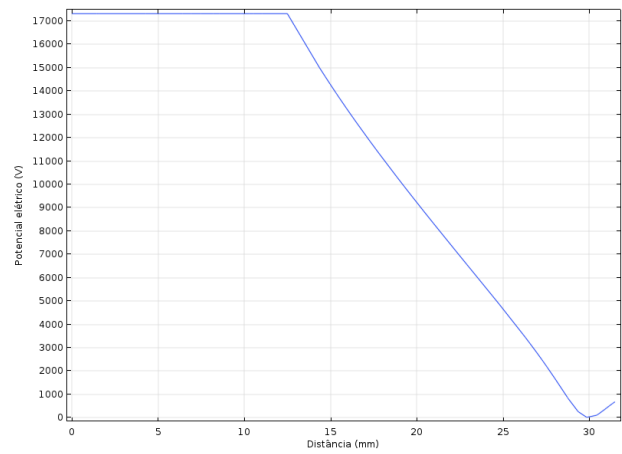


Figura 4.46-Linha 2D de auxílio, tangente ao aro da malha arredondado

Utiliza-se a linha auxiliar 2D (presente na Figura 4.46) para estudar as referidas grandezas no percurso até à malha, e pela Figura 4.47 A observa-se que junto ao aro da malha é onde o campo elétrico é mais intenso, registando um valor de 1,98 MV/m. Além disso o potencial elétrico do condutor de AT para a malha desce de forma linear, de acordo com a distância, havendo uma d.d.p de 17320 V.



A



B

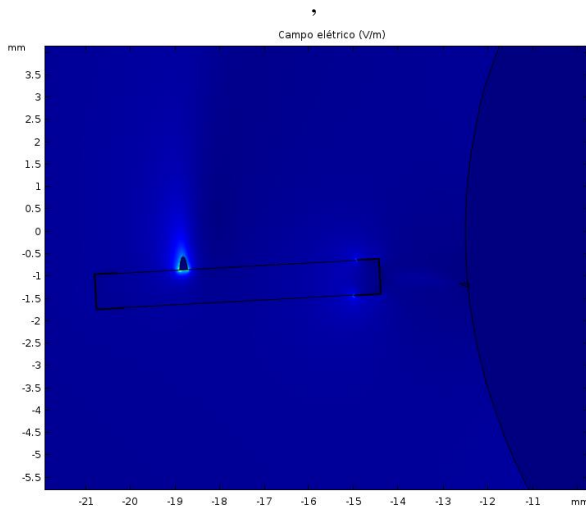
Figura 4.47-Estudo no percurso entre a fonte e o aro da malha. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

#### 4.2.3.2 Estudo das resistências

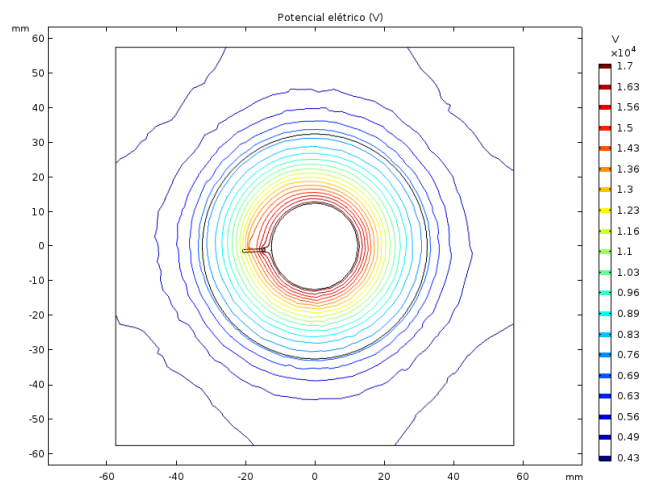
Uma vez que neste caso apenas se muda o raio de curvatura do aro da malha utilizam-se as mesmas linhas 3D, de maneira a se analisar como essa mudança pode influenciar as grandezas de estudo, num cenário sem anomalias.

##### ○ Resistência $R_1$

Através da Figura 4.48 A observa-se que os pontos críticos de maior incidência de campo elétrico na primeira resistência, ligada ao condutor de AT, são os fios condutores ligados aos seus terminais (pelas razões já referidas atrás) e as extremidades retas da capa de estanho. Já as linhas equipotenciais estão dispostas para incluírem a capa de estanho da resistência no maior potencial elétrico. A linha intersecta o interior da capa de estanho, sendo que o campo elétrico na sua instância é 0,42 MV/m e a sua d.d.p nula, como se verifica nos gráficos da Figura 4.49.

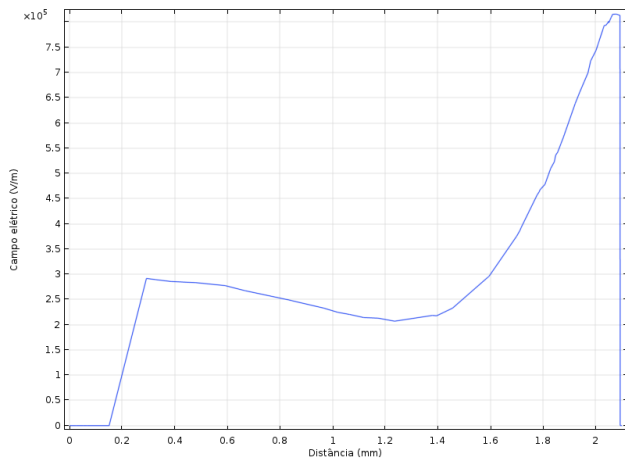


A

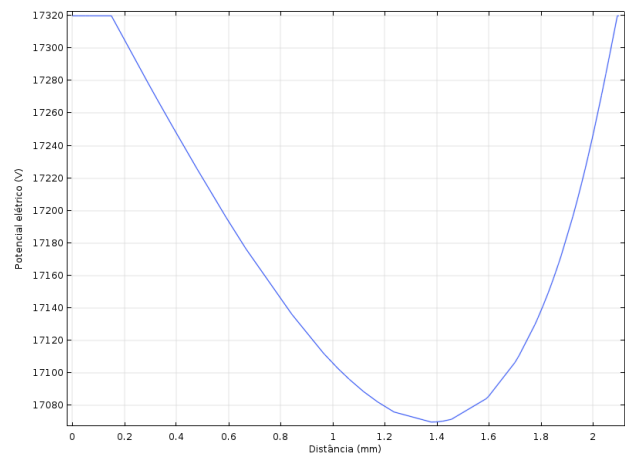


B

Figura 4.48-Estudo num plano 2D que intersecta a fonte e R1. A – Campo elétrico. B - Potencial elétrico.



A

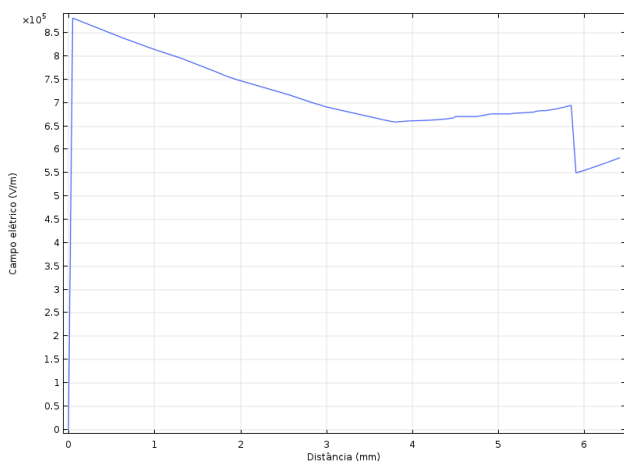


B

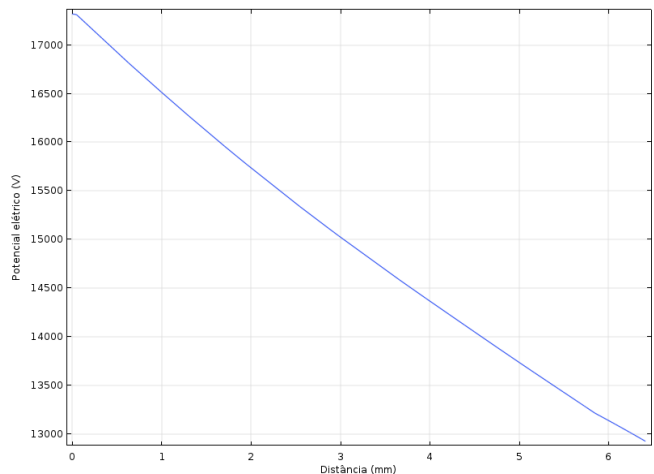
Figura 4.49-Estudo no percurso entre a fonte e R1. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência  $R_2$*

Na segunda resistência deteta-se um campo elétrico com intensidade de 0,69 MV/m, com uma d.d.p de 4100 V. Os valores mencionados encontram-se nos gráficos da Figura 4.50.



A

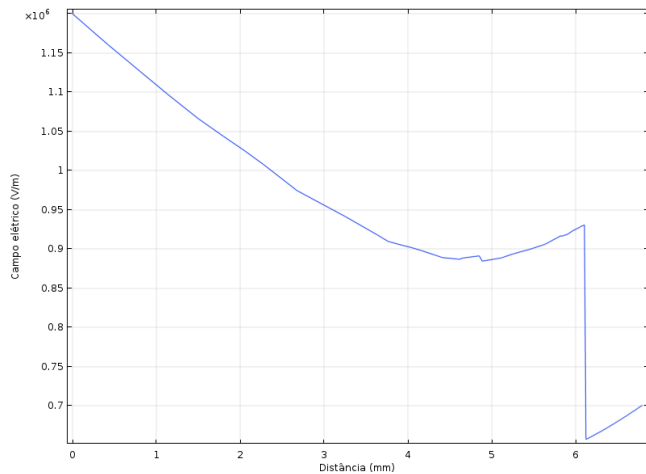


B

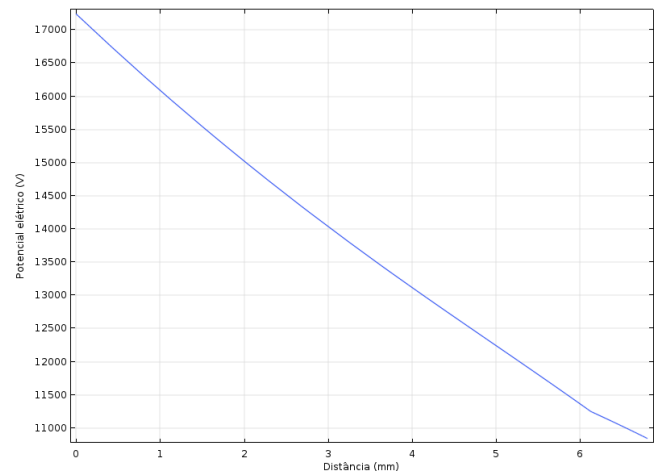
Figura 4.50-Estudo no percurso entre a fonte e R2. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência  $R_3$*

Pela mesma linha utilizada que no caso A, no estudo da terceira resistência observa-se pelos gráficos da Figura 4.51 que o campo elétrico nesta é 0,93 MV/m, com uma d.d.p de 6055 V.



A

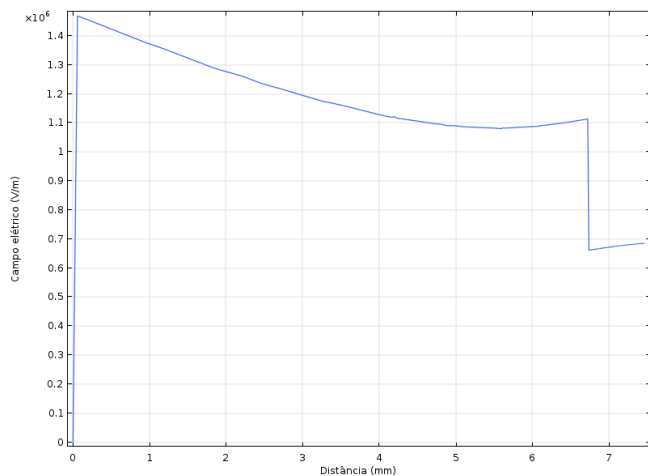


B

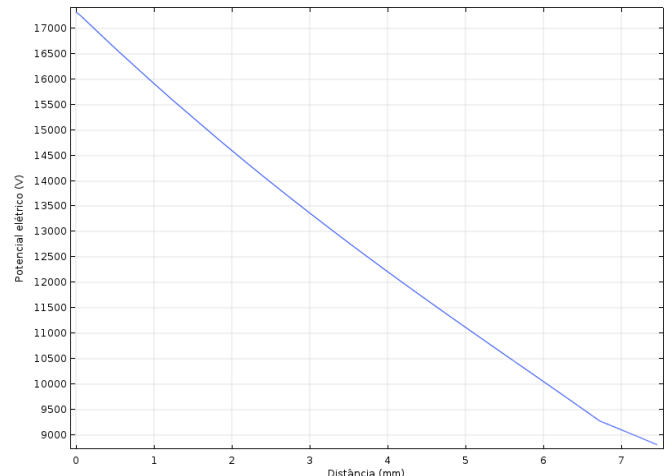
Figura 4.51-Estudo no percurso entre a fonte e R3. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>4</sub>*

No percurso entre o condutor de AT e a resistência R4 verifica-se pela Figura 4.52 um campo elétrico de 1,13 MV/m, com uma d.d.p de 8045 V.



A

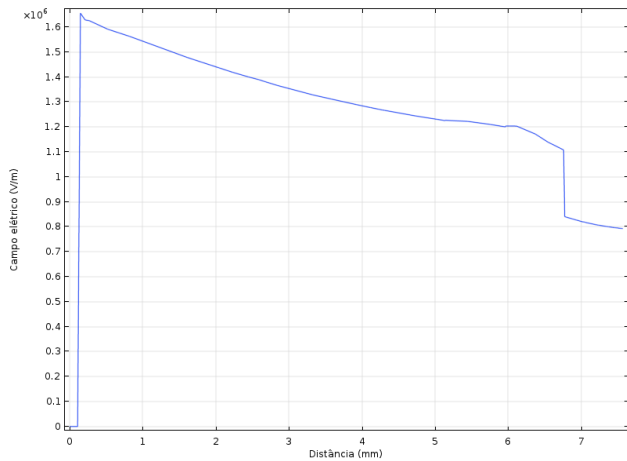


B

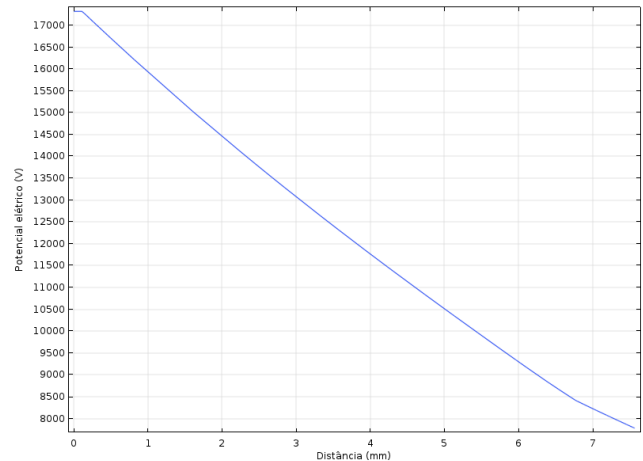
Figura 4.52-Estudo no percurso entre a fonte e R4. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>5</sub>*

O potencial e campo elétrico no percurso entre o condutor de AT e a quinta resistência estão expostos na Figura 4.53, com valores de 8887 V, e 1,11 MV/m, respetivamente.



A

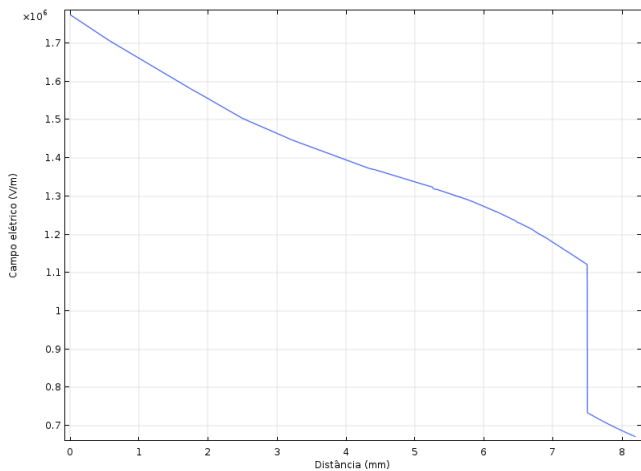


B

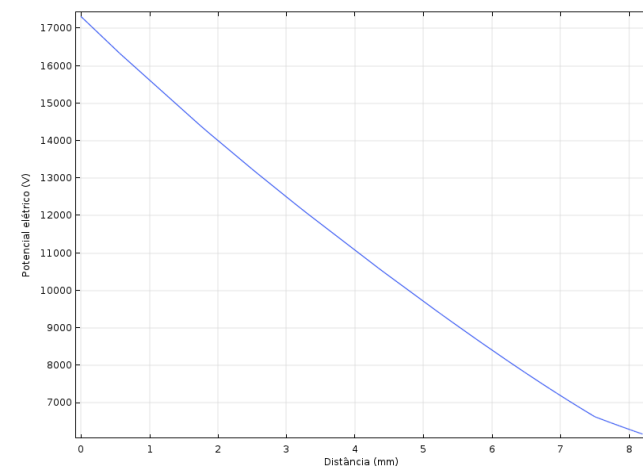
Figura 4.53-Estudo no percurso entre a fonte e R5. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>6</sub>*

No caminho entre o condutor de AT e a sexta resistência, a intensidade de campo elétrico incidente nesta é 1,12 MV/m, com uma d.d.p. de 10688 V. Estes valores são comprovados na Figura 4.54.



A

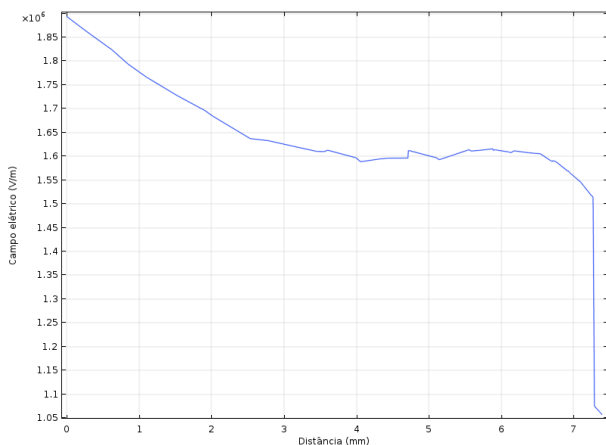


B

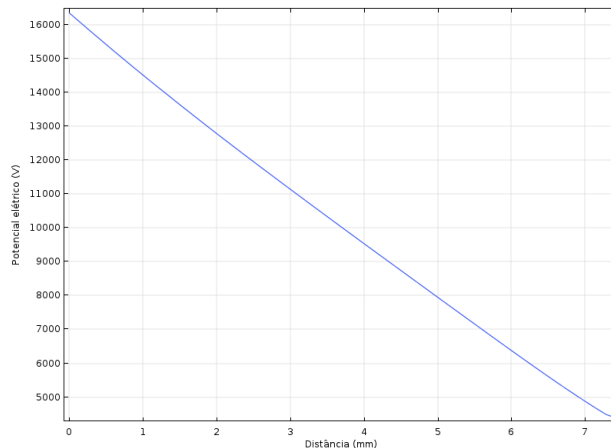
Figura 4.54-Estudo no percurso entre a fonte e R6. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico .

○ *Resistência R<sub>7</sub>*

No percurso entre o condutor de AT e a resistência R7, o campo elétrico que ocorre na fronteira da resina *epoxy* e de R7 é 1,51 MV/m , com uma d.d.p. de 12809 V. Os valores mencionados estão nos gráficos da Figura 4.55.



A

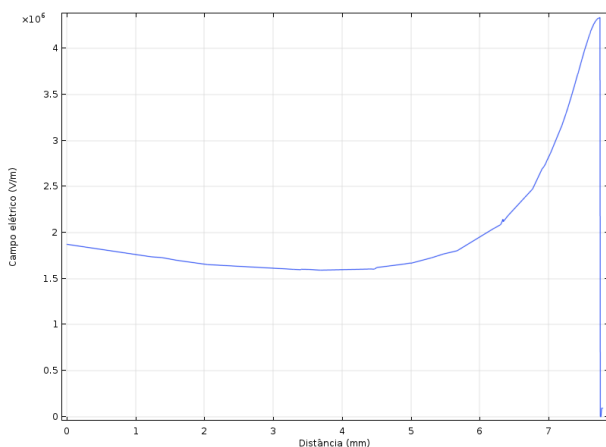


B

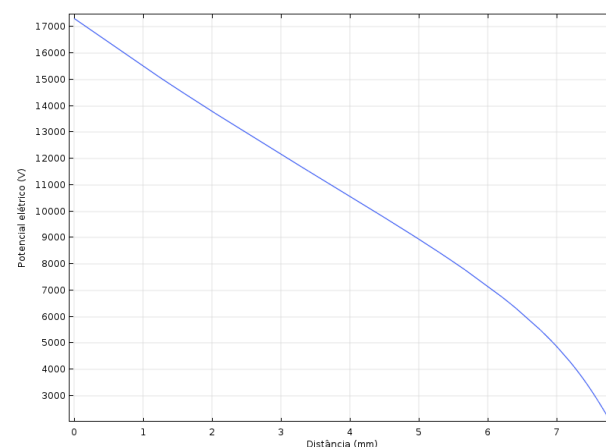
Figura 4.55-Estudo no percurso entre a fonte e R7. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>8</sub>*

O campo elétrico incidente na última resistência é 4,34 MV/m, com uma d.d.p de 15155 V, como se observa na Figura 4.56.



A



B

Figura 4.56-Estudo no percurso entre a fonte e R8. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

#### 4.2.4 Caso B: Isolador com aro da malha enrolado e anomalias

Tal como já foi referido atrás, este cenário serve para perceber de que forma imperfeições ou anomalias influenciam o isolador de travessia em estudo e, fazer uma comparação deste desempenho, com o seu funcionamento normal. A maioria das bolhas de ar foram colocadas nas mesmas posições que no caso A com anomalias.

##### 4.2.4.1 Estudo da malha e condutor de AT

Neste caso, devido ao raio de curvatura da extremidade da malha ter subido, a bolha de ar é um pouco deslocada, ficando tangente novamente ao aro da malha. As outras bolhas da malha e do condutor, que foram simuladas e analisadas no caso A com anomalias, mantêm-se nas mesmas posições.

○ *Bolha de ar na extremidade da malha*

Nesta figura entende-se que a extremidade ser arredondada permite uma distribuição de campo elétrico quase uniforme, mesmo que na presença de uma bolha ar. Não é necessário representar o gráfico do potencial elétrico em 2D, porque tem o mesmo comportamento que no representado no caso A sem anomalias. Através da linha representada na Figura 4.46 (página 67) verifica-se nos gráficos da Figura 4.58, que o campo elétrico incidente na bolha de ar é 1,81 MV/m, com uma d.d.p de 17320 V. No aro da malha incide um campo elétrico com valor de 1,96 MV/m e uma d.d.p de 17235 V.

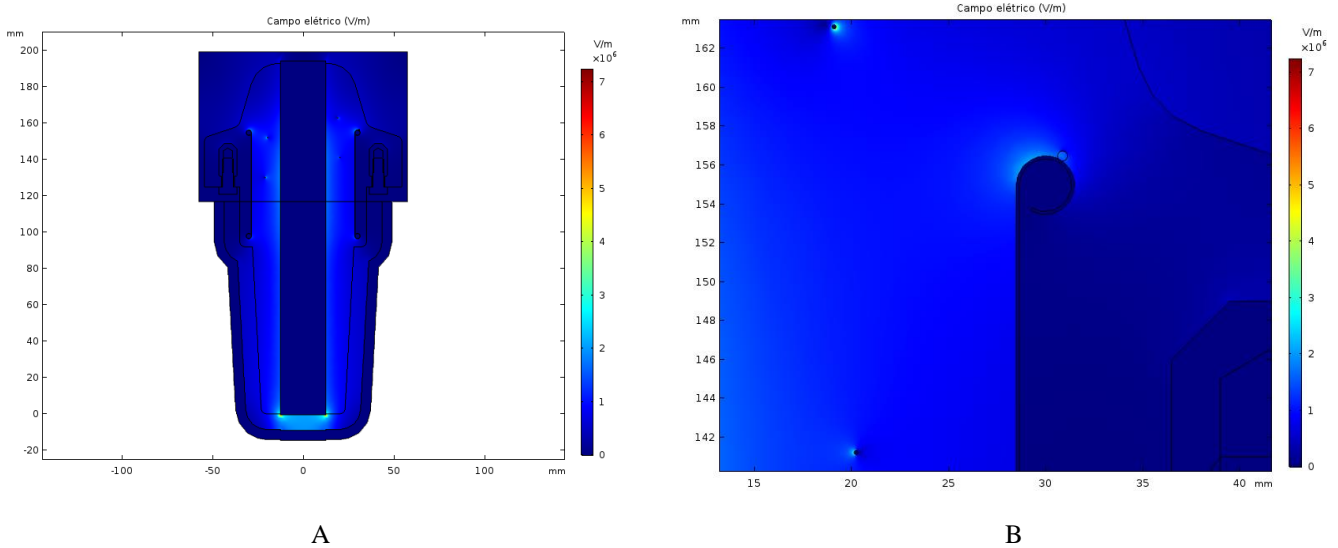


Figura 4.57- Cenário de anomalia. A - Campo elétrico. B – Detalhe do campo elétrico bolha de ar tangente ao aro da malha.

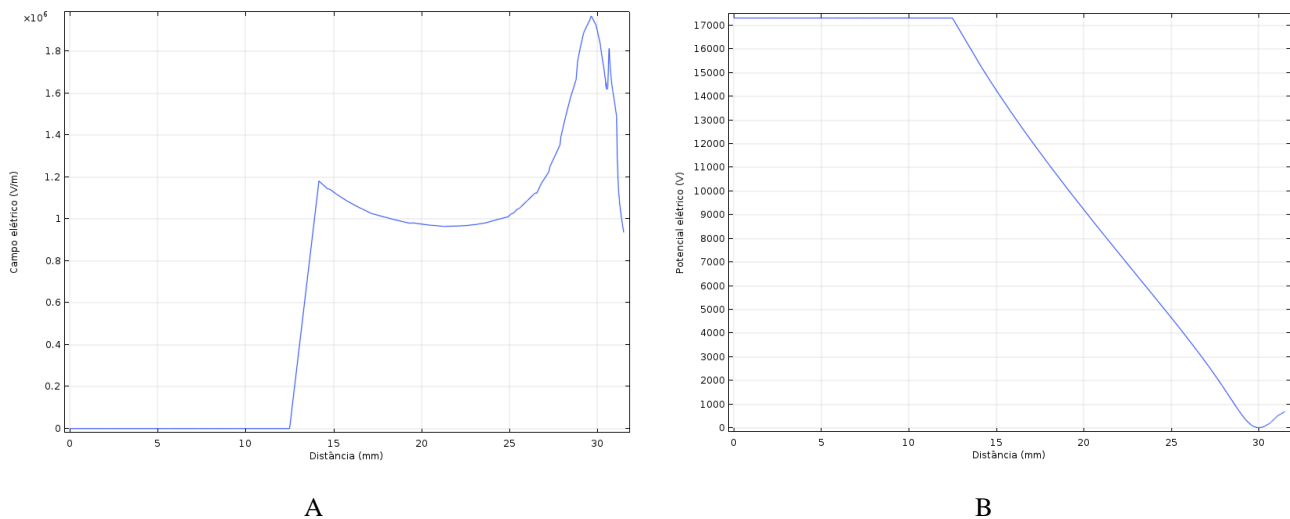
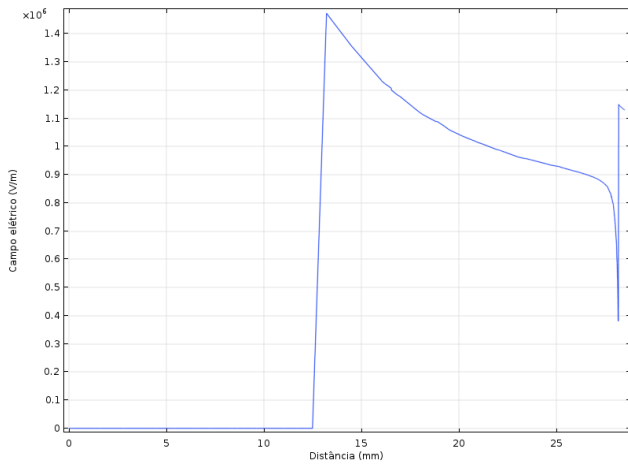


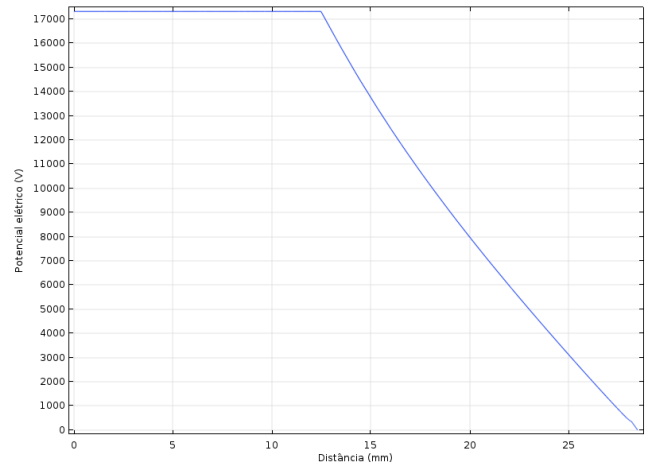
Figura 4.58-Estudo no percurso entre o condutor de AT e a malha com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *2ª Bolha de ar na malha*

Segundo a Figura 4.59, a segunda bolha que está presente na malha tem uma norma de campo elétrico de 1,15 MV/m, com uma d.d.p. de 16969 V. Tal como no caso A, existem as mesmas diferenças numéricas nos cenários com e sem ar, portanto opta-se por não fazer a comparação.



A

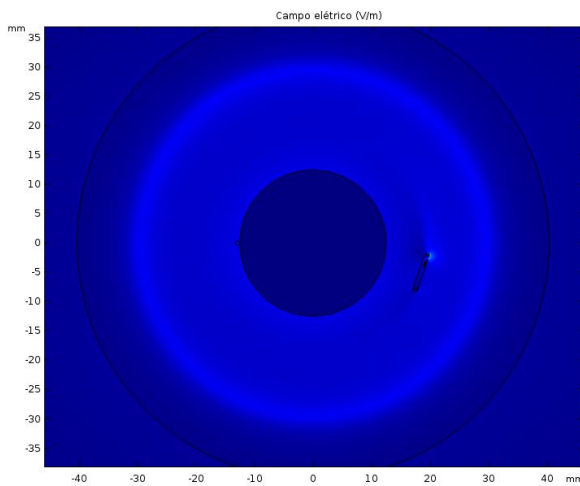


B

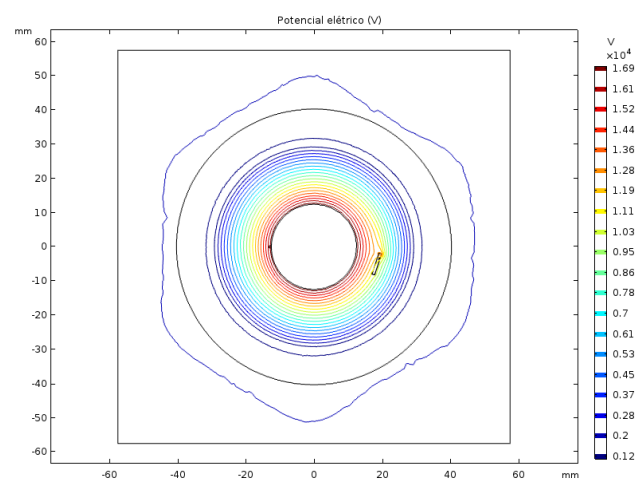
Figura 4.59-Estudo no percurso entre o condutor de AT e 2ª anomalia na malha. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Bolha de ar no condutor*

Pela Figura 4.60 percebe-se que a introdução da bolha de ar tangente ao condutor não altera visivelmente o campo ou potencial elétrico. Através da Figura 4.61 verifica-se que na superfície da bolha de ar se regista um campo elétrico de 1,66 MV/m, com uma d.d.p de 1080 V. Tal como no caso A, existem as mesmas diferenças numéricas no cenário com e sem bolha de ar, portanto opta-se por não fazer a comparação.

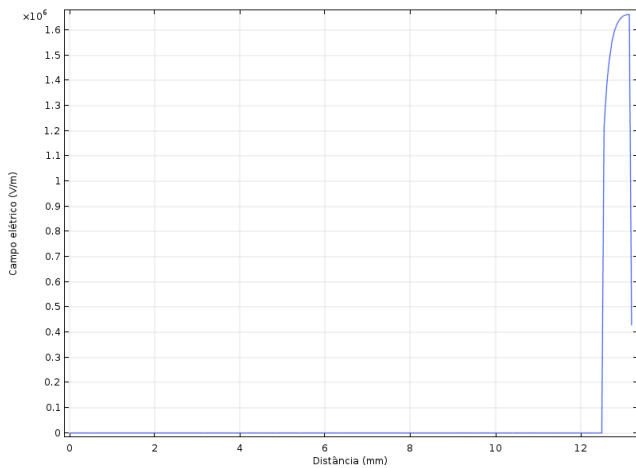


A

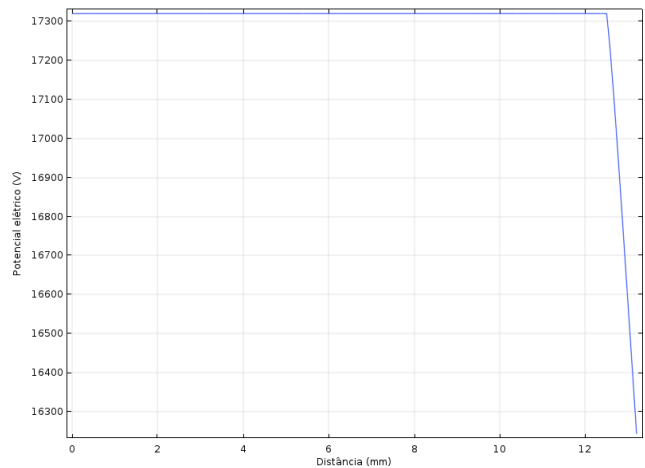


B

Figura 4.60-Cenário de anomalia num plano 2D que intersecta o condutor de AT e a bolha de ar tangente a este. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.



A



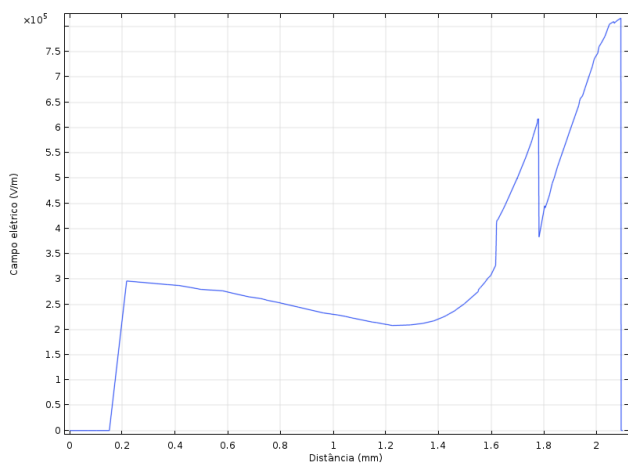
B

Figura 4.61-Estudo no percurso entre o centro do isolador e condutor de AT, com anomalia no condutor de AT. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

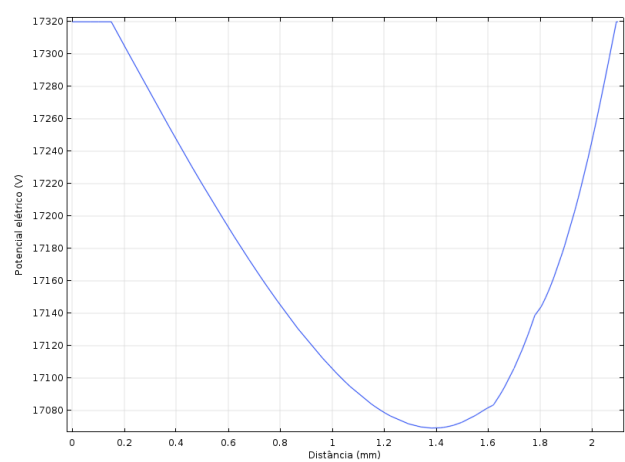
#### 4.2.4.2 Estudo das resistências

##### ○ Resistência $R_1$

Na Figura 4.62 observa-se que a bolha de ar é submetida a um campo elétrico de 0,62 MV/m, com uma d.d.p de 181 V, relativamente a R1 ocorre um campo elétrico com intensidade de 0,82 MV/m, com uma d.d.p de 0V.



A

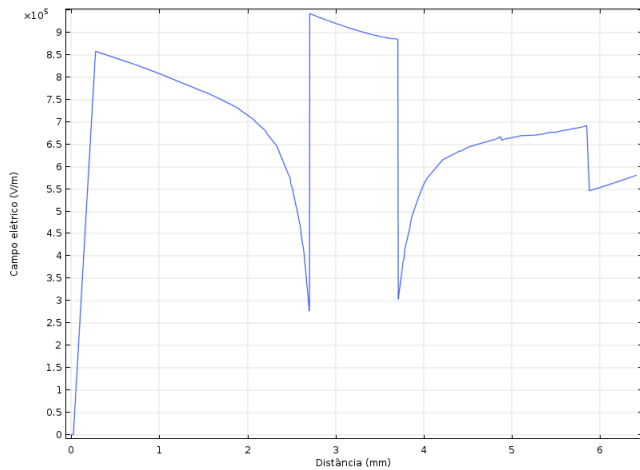


B

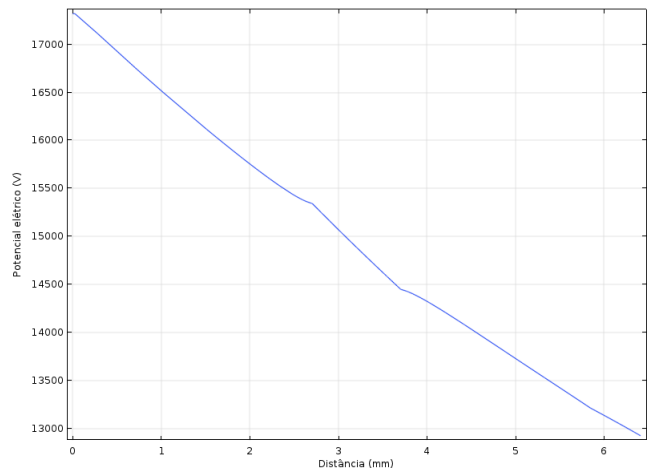
Figura 4.62-Estudo no percurso entre a fonte e R1 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

##### ○ Resistência $R_2$

Através da linha utilizada no caso anterior observa-se na Figura 4.63 que sobre a bolha de ar incide um campo elétrico de 0,94 MV/m, sendo que da vizinhança para o interior desta, a intensidade do campo elétrico triplica o seu valor. A d.d.p na bolha de ar é de 1977 V. Relativamente à resistência R2 verifica-se uma intensidade de campo elétrico de 0,69 MV/m, com uma d.d.p de 4107 V.



A

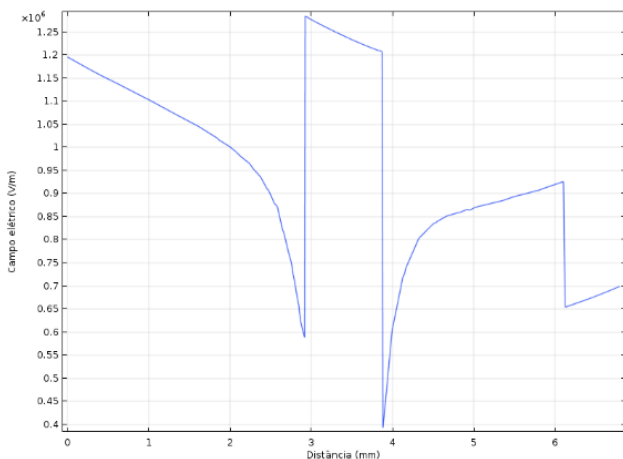


B

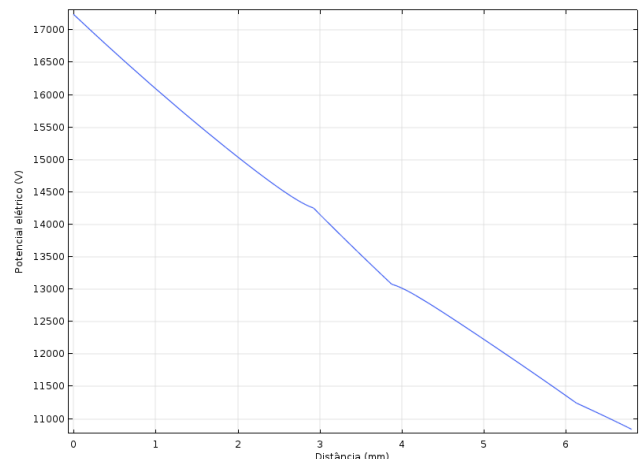
Figura 4.63-Estudo no percurso entre a fonte e R2 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_3$

Na Figura 4.64 observa-se que no percurso do condutor para a resistência R3, a intensidade de campo elétrico que incide na bolha é de 1,28 MV/m, com uma d.d.p de 3074 V. Referidamente à resistência, o seu campo elétrico é 0,93 MV/m, com uma d.d.p de 6057 V.



A

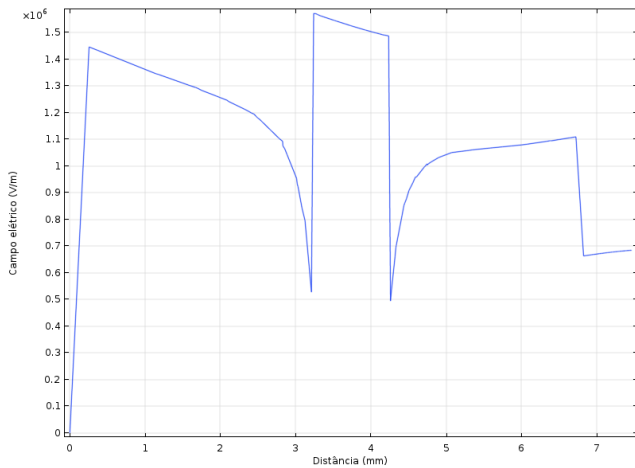


B

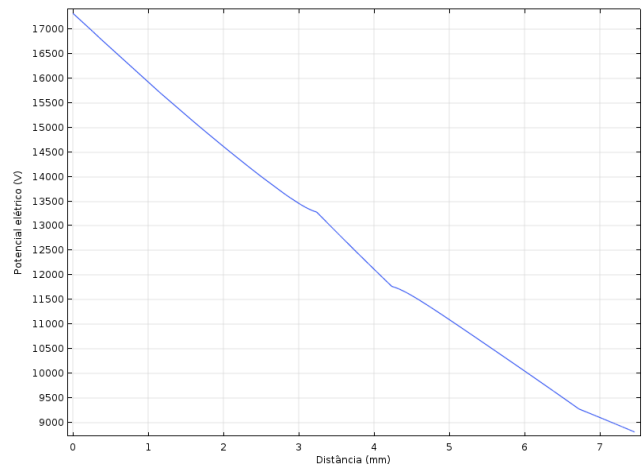
Figura 4.64-Estudo no percurso entre a fonte e R3 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_4$

No percurso entre o condutor de AT e a resistência R4 o campo elétrico da bolha de ar e da resistência continuam a aumentar. A bolha de ar está submetida a um campo elétrico de 1,57 MV/m, aumentando mais de 1 MV/m para o meio de resina, e com uma d.d.p. de 4040 V. Na resistência incide um campo elétrico de 1,11 MV/m e uma d.d.p de 8042 V. Os valores referidos estão ilustrados na Figura 4.65.



A

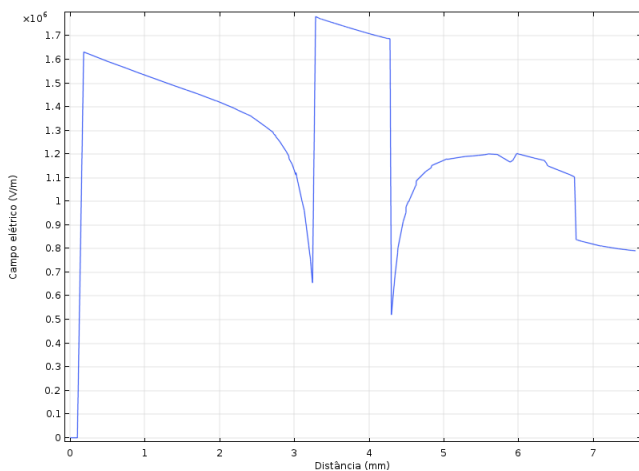


B

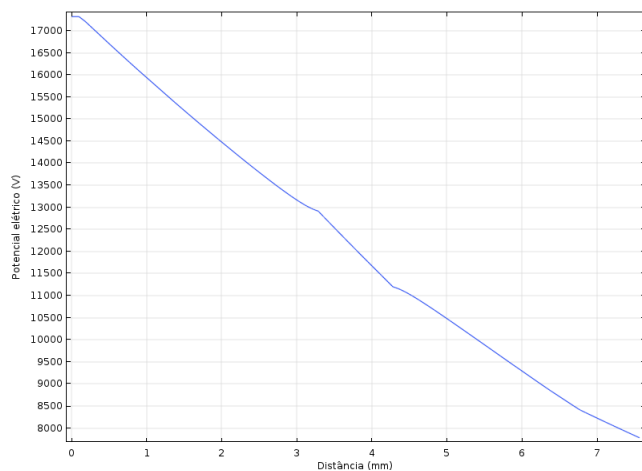
Figura 4.65-Estudo no percurso entre a fonte e R4 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_5$

Pela observação da Figura 4.66 interpreta-se que a bolha de ar está sujeita a um campo elétrico de 1,78 MV/m, sendo que sobe mais de 1 MV/m (perto de 300 % do seu antigo valor) em relação à resina epoxy. Nessa bolha há uma d.d.p. de 4405 V. O campo elétrico incidente na resistência tem o valor 1,10 MV/m, com uma d.d.p de 8882 V.



A

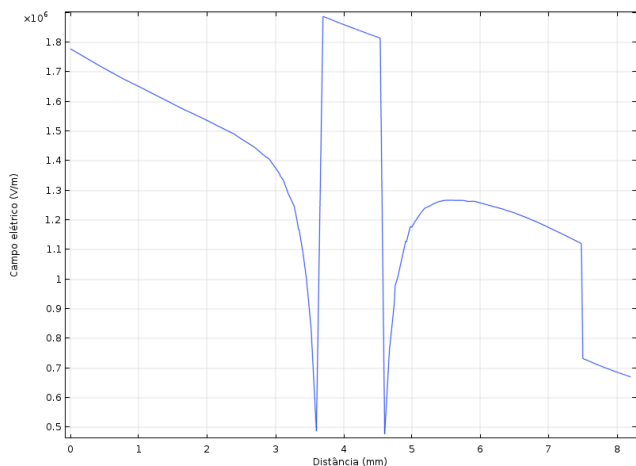


B

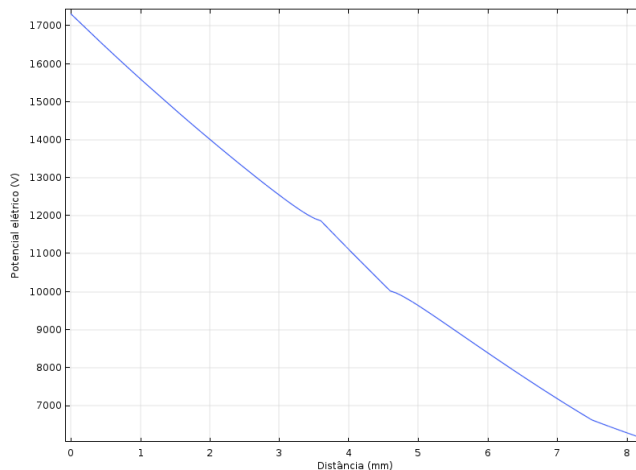
Figura 4.66-Estudo no percurso entre a fonte e R5 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_6$

Na bolha de ar, que está entre o condutor de AT e a resistência R6, observa-se na Figura 4.67 um pico de campo elétrico com uma intensidade de 1,89 MV/m e uma d.d.p de 5636 V. Relativamente à resistência, sobre esta incide um campo elétrico com intensidade de 1,12 MV/m, com uma d.d.p de 10673 V.



A

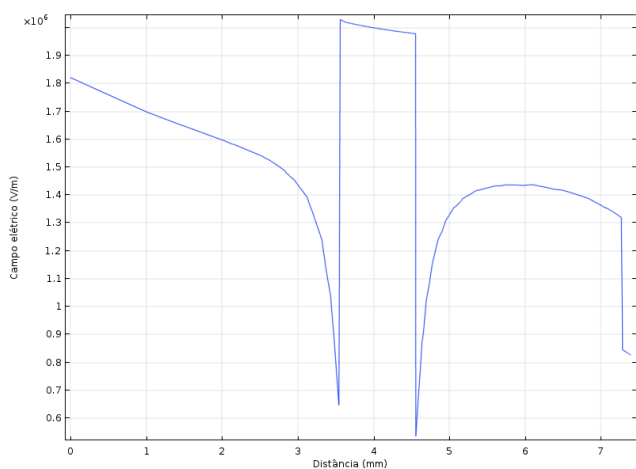


B

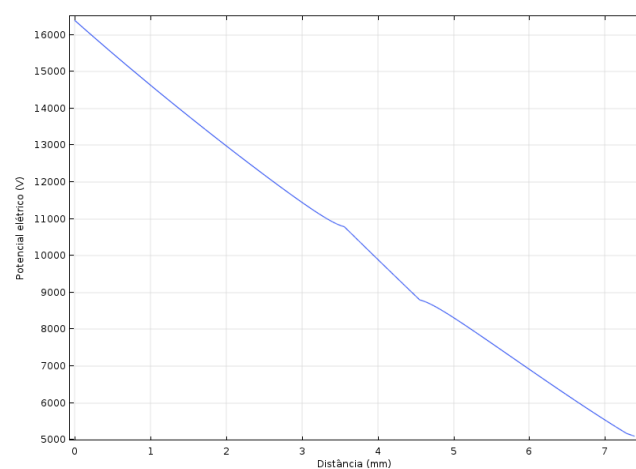
Figura 4.67-Estudo no percurso entre a fonte e R6 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_7$

No percurso entre o condutor de AT e a resistência R7 o campo elétrico incidente na bolha de ar é de 2,03 MV/m, com uma d.d.p. de 6533 V. O campo elétrico que incide na penúltima resistência tem uma intensidade de 1,32 MV/m e uma d.d.p de 12127 V. Os valores mencionados estão ilustrados nos gráficos da Figura 4.68.



A



B

Figura 4.68-Estudo no percurso entre a fonte e R7 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_8$

Na última resistência, tal como em R1 é onde ocorre o campo elétrico mais intenso, pois a linha de estudo atinge o material condutor desta (estanho) em virtude da disposição local da mesma. A bolha de ar tem um campo elétrico com intensidade de 2,16 MV/m, com uma d.d.p de 7720 V. A resistência está submetida a um campo elétrico de 4,33 MV/m, com uma d.d.p. de 15155 V. Os valores referidos foram observados nos gráficos da Figura 4.69.

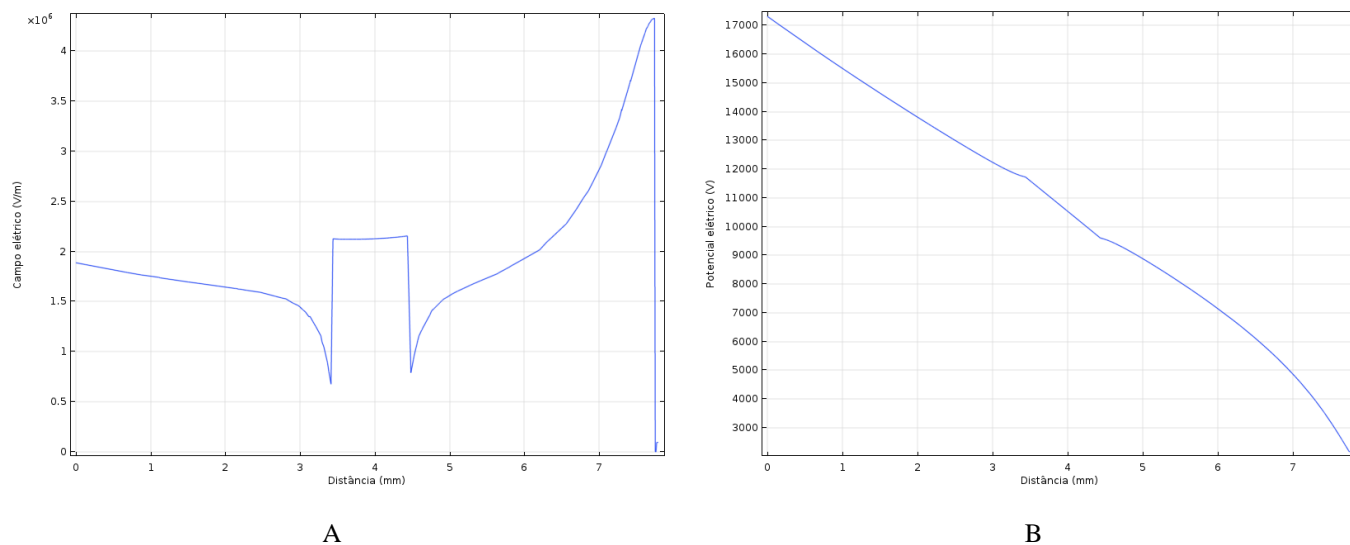


Figura 4.69-Estudo no percurso entre a fonte e R8 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

Em relação ao caso anterior assinala-se que neste cenário, com o aro da malha arredondado, não existe a criação de uma possível DP, em nenhum dos componentes analisados, pois o campo elétrico a que estavam submetidos foi sempre menor que o  $E_d$  dos materiais de análise.

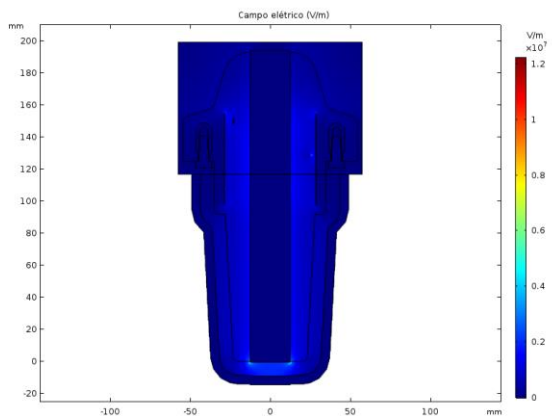
### 4.3 2ª Cadeia de oito resistências à tensão de funcionamento 36 kV com conector isolante

Neste ponto é feita a análise à segunda cadeia resistiva ilustrada no capítulo anterior. Volta-se a repetir o estudo com dois casos: aro da malha do isolador máximo e mínimo, em cenários de funcionamento normal e com anomalias.

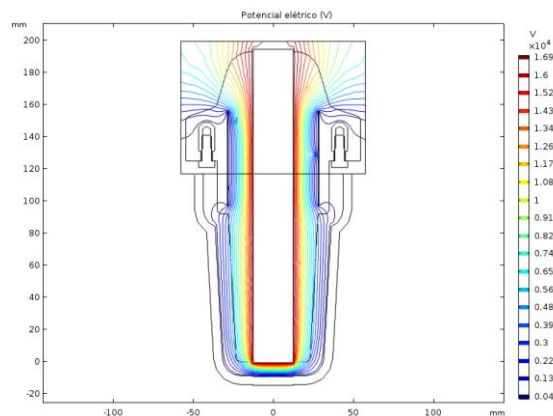
#### 4.3.1 Caso A: Isolador com aro da malha reduzido e sem anomalias

##### 4.3.1.1 Estudo da malha

Da representação gráfica do campo elétrico na Figura 4.70 A observa-se que existem singularidades junto das extremidades da malha, que serão analisadas em pormenor a seguir. Na Figura 4.70 B as linhas equipotenciais estão uniformemente distribuídas, sendo que as poucas distorções visíveis devem-se à interseção do plano 2D com fios que ligam as resistências entre si.



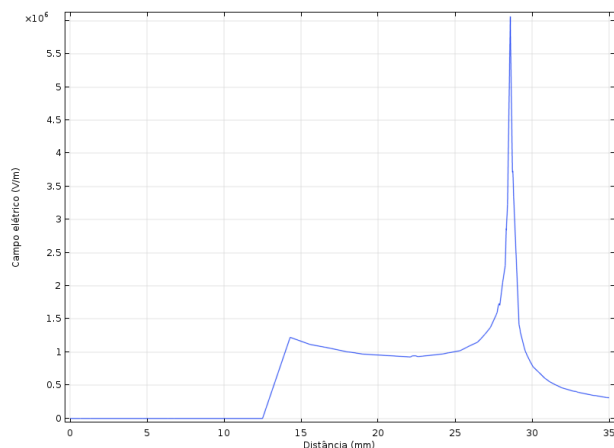
A



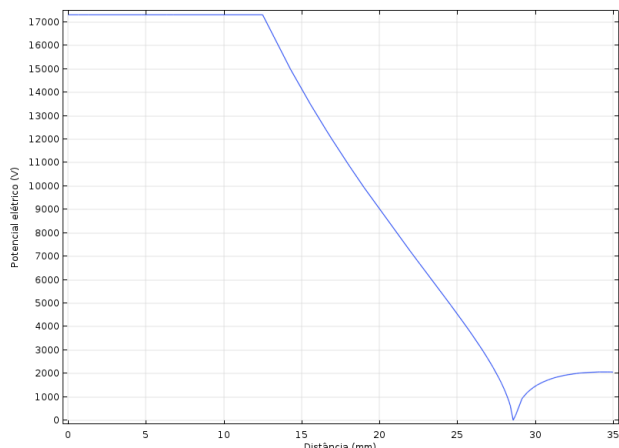
B

Figura 4.70-Estudo do isolador com aro da malha reduzido. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

Pela observação da Figura 4.71, através da linha auxiliar já atrás utilizada para os cenários com aro da malha reduzido, regista-se que na extremidade do aro da malha está presente um campo elétrico com 6,06 MV/m de intensidade e uma d.d.p. de 17320 V. No mesmo percurso após passar a malha o potencial elétrico tende para 2000 V, devido ainda haver uma pequena porção de campo elétrico após o aro da malha.



A



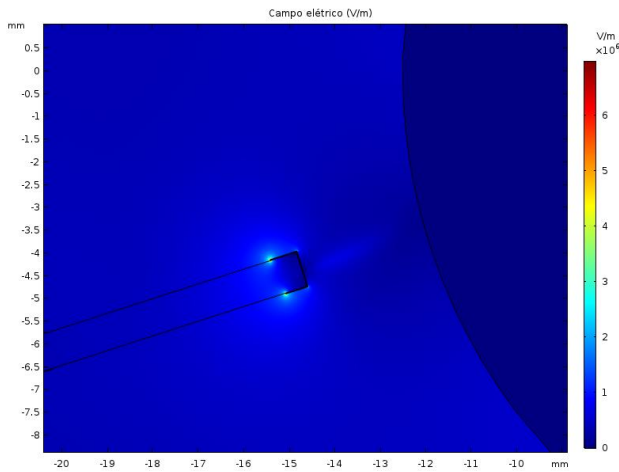
B

Figura 4.71-Estudo no percurso entre a fonte e o aro da malha. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

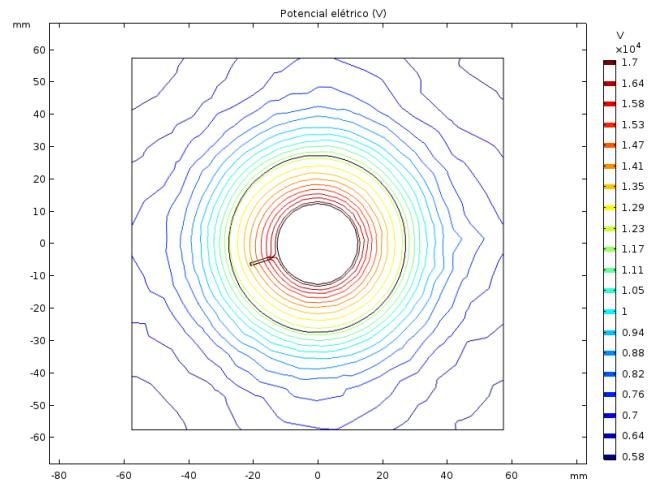
#### 4.3.1.2 Estudo das resistências

##### ○ Resistência $R_1$

Da observação da Figura 4.72 A os pontos críticos de campo elétrico desta resistência continuam a ser os mesmos (extremidades retas da capa de estanho). Na Figura 4.72 B há desfasamento de algumas linhas equipotenciais, devido à forma como a primeira resistência está ligada ao condutor de AT. A orientação da resistência faz uma perpendicular com condutor de AT, ao contrário das restantes desta cadeia.



A



B

Figura 4.72-Estudo num plano 2D que intersecta a fonte e R1. A – Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

No pequeno percurso, ilustrado na Figura 4.73, entre o condutor de AT e a primeira resistência o campo elétrico incide nesta com uma intensidade de 0,53 MV/m e uma d.d.p. nula. Os valores assinalados estão representados nos gráficos da Figura 4.74.

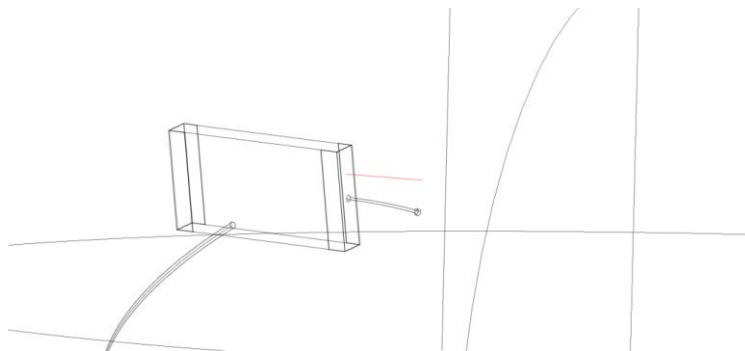
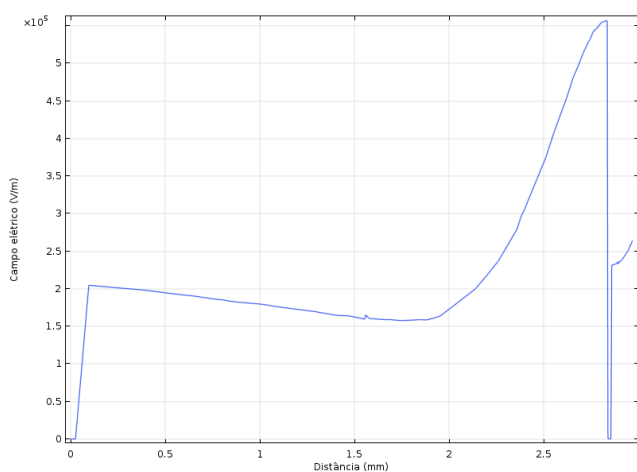
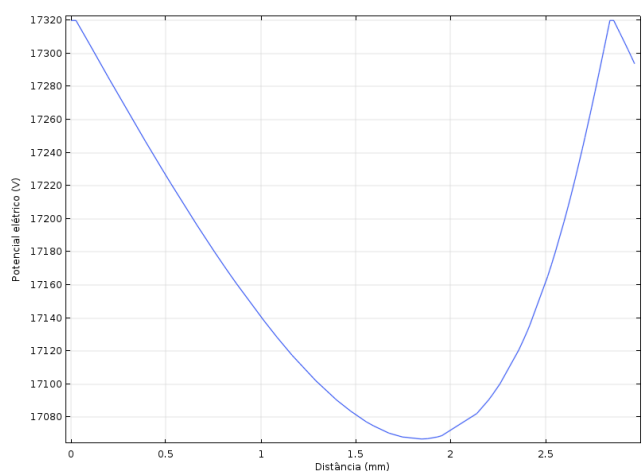


Figura 4.73-Linha de estudo entre a fonte e R1.



A



B

Figura 4.74-Estudo no percurso entre a fonte e R1. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

- Resistência  $R_2$

Na segunda resistência o campo elétrico diminui face à primeira, pois o local de análise é diferente como sugere a Figura 4.75. Nesta resistência regista-se um campo elétrico de 0,47 MV/m, com uma d.d.p. de 3565 V, como se observa pela da Figura 4.76.

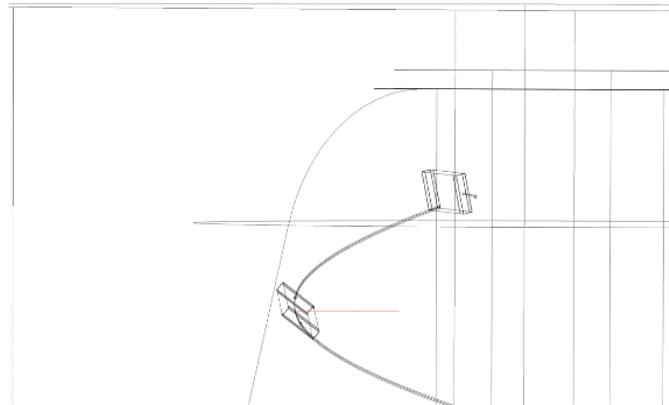
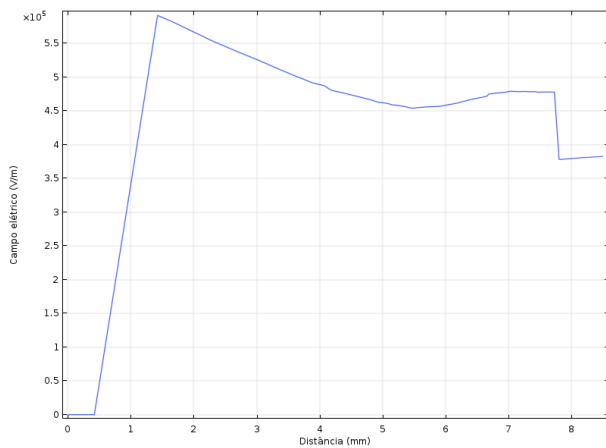
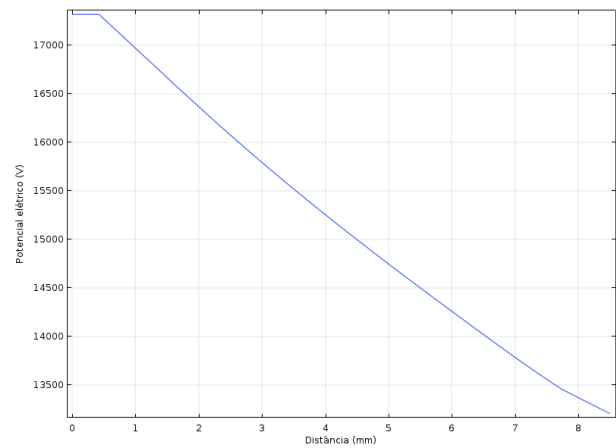


Figura 4.75-Linha de estudo entre a fonte e R2.



A



B

Figura 4.76-Estudo no percurso entre a fonte e R2. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>3</sub>*

O campo elétrico incidente na terceira resistência, no percurso da Figura 4.77, aumenta em relação à anterior, para uma intensidade de 0,63 MV/m, com uma d.d.p de 6233 V, como se observa pela Figura 4.78.

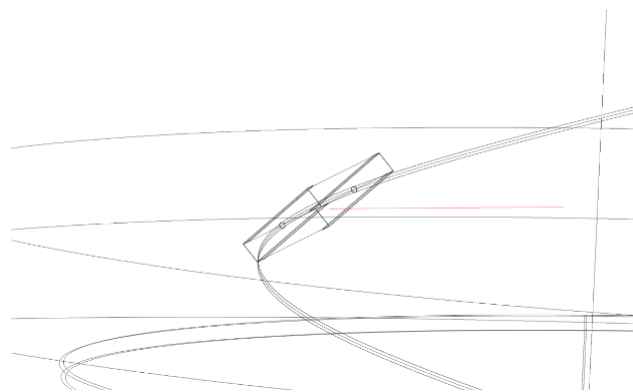
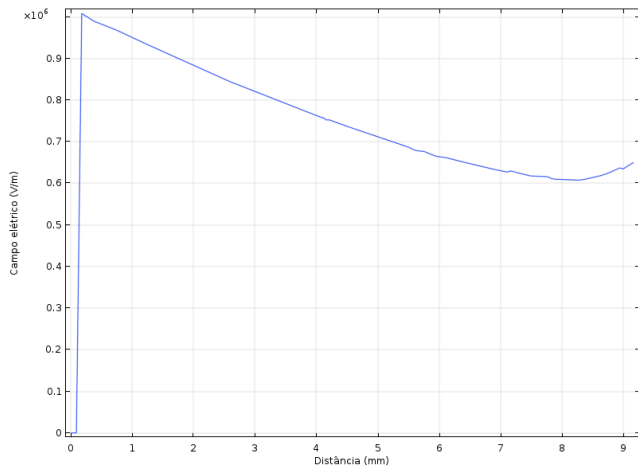
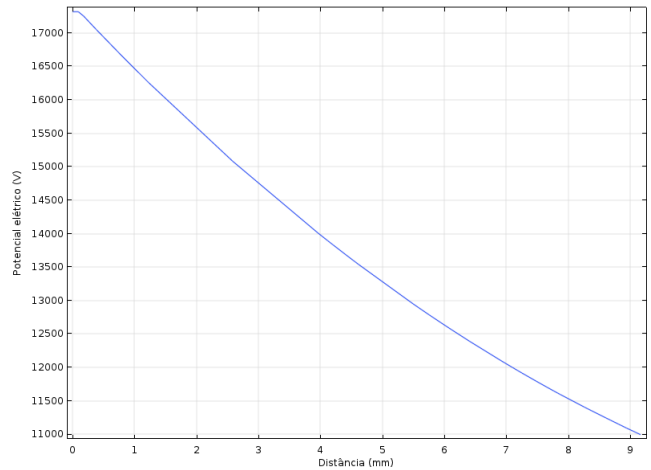


Figura 4.77-Linha de estudo entre a fonte e R3.



A



B

Figura 4.78-Estudo no percurso entre a fonte e R3. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>4</sub>*

No percurso representado na Figura 4.79 o campo elétrico em R4 volta a subir face à anterior, assumindo um valor de 0,93 MV/m, com uma d.d.p. de 9890 V. Os valores mencionados encontram-se nos gráficos da Figura 4.80.

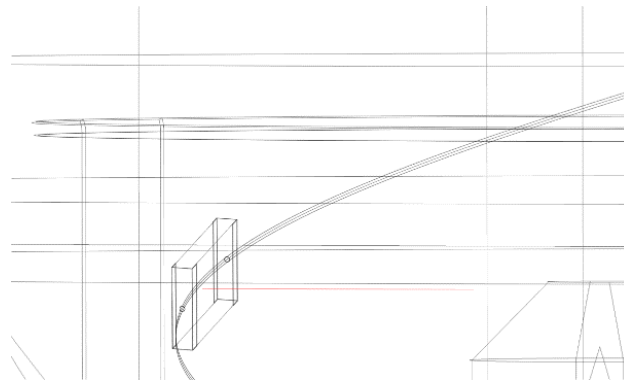
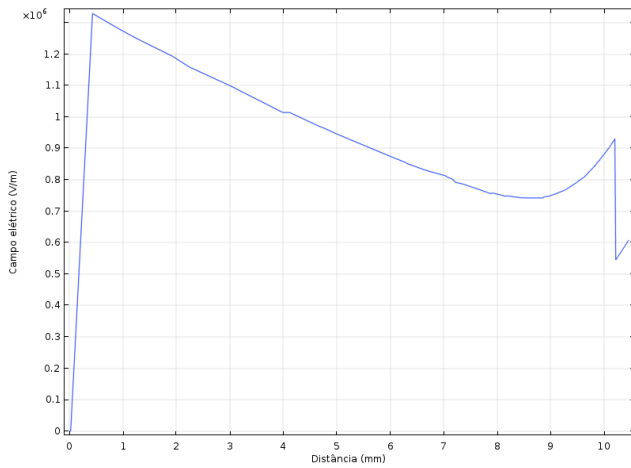
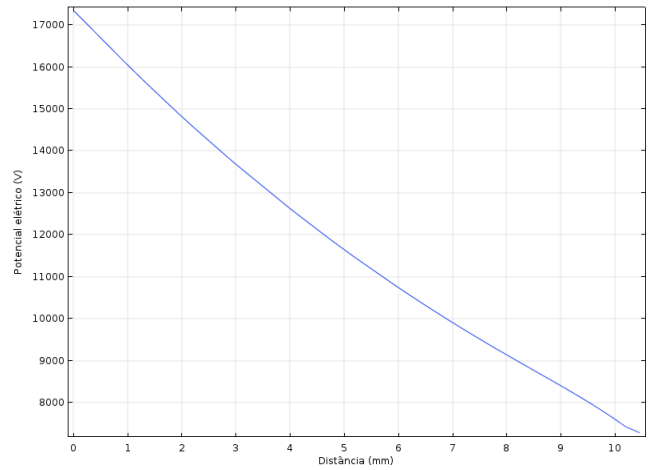


Figura 4.79-Linha de estudo entre a fonte e R4.



A



B

Figura 4.80-Estudo no percurso entre a fonte e R4. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>5</sub>*

No percurso do condutor de AT para R5, representado na Figura 4.81, observa-se pelos gráficos da Figura 4.82 que o campo elétrico em R5 é 0,93 MV/m, com uma d.d.p. de 11980 V.

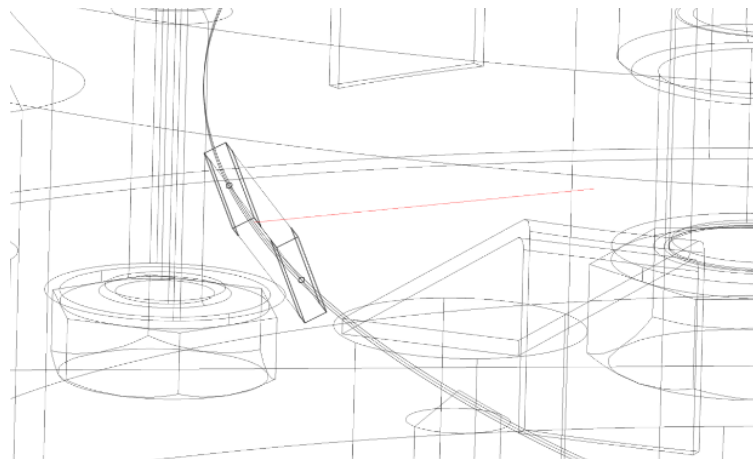
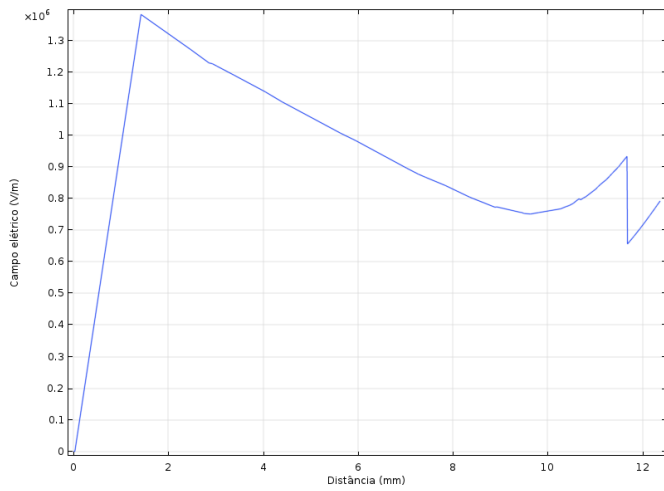
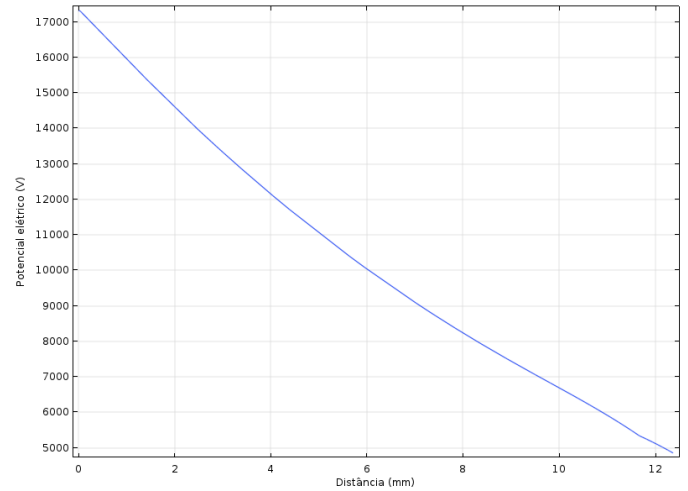


Figura 4.81-Linha de estudo entre a fonte e R5.



A



B

Figura 4.82-Estudo no percurso entre a fonte e R5. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência  $R_6$*

Com o auxílio da linha representada na Figura 4.83, obtêm-se os gráficos da Figura 4.84, os quais mostram o campo elétrico incidente em R6, no valor de 0,96 MV/m, com uma d.d.p de 13432 V.

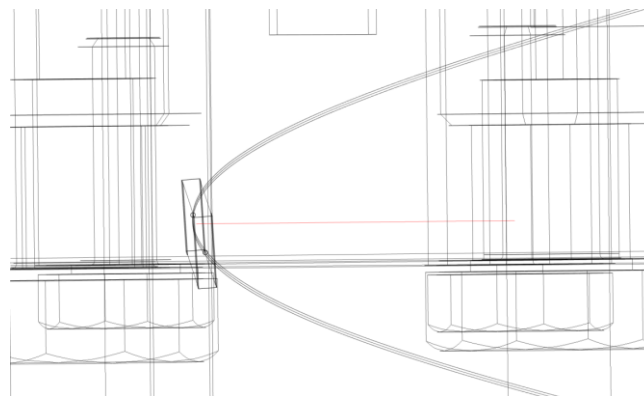
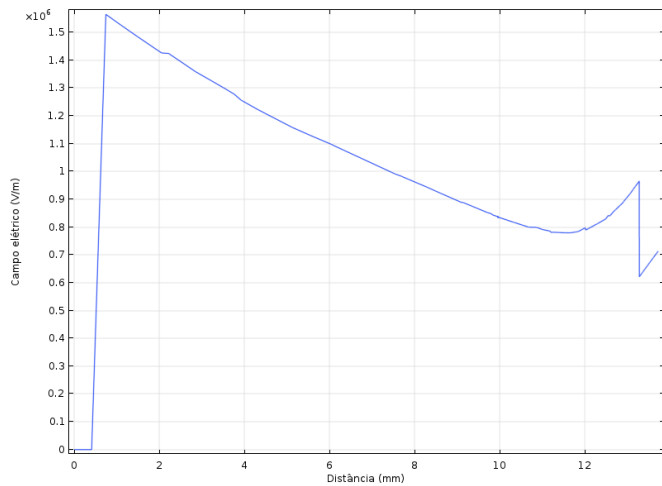
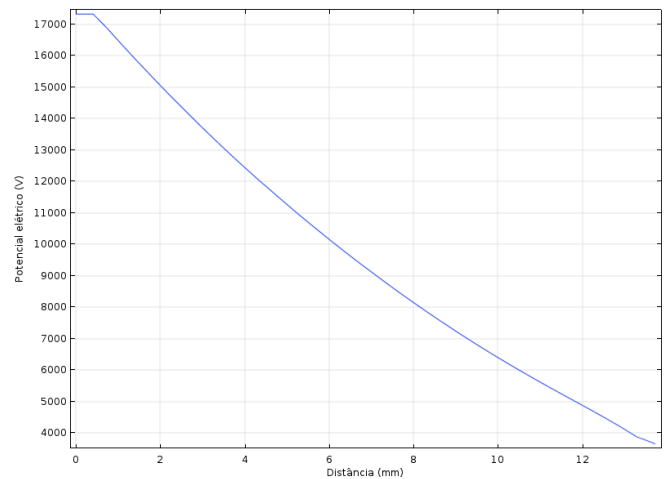


Figura 4.83-Linha de estudo entre a fonte e R6.



A



B

Figura 4.84-Estudo no percurso entre a fonte e R6. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>7</sub>*

No percurso do condutor de AT para a resistência R7 (Figura 4.85), observa-se na Figura 4.86 A um campo elétrico incidente em R7 de 0,76 MV/m. A d.d.p. em R7 é de 14670 V, como se vê na Figura 4.86 B.

O campo nesta componente face às anteriores, diminui um pouco porque o percurso neste caso é bastante maior que os anteriores. O percurso aumenta devido ao ponto inicial estar numa altura bastante superior à do ponto final, o que resulta na subida de inclinação da linha. É necessário tomar-se esta ação porque se o ponto inicial da linha de estudo estiver abaixo do limite inferior do cubo de SF<sub>6</sub>, no estudo com a bolha de ar, verifica-se erros na deteção de elementos finitos. Como o ponto final da linha de estudo na resistência está abaixo do limite de SF<sub>6</sub>, neste caso é impossível ter uma linha horizontal de análise como se conseguiu nos casos anteriores (esta metodologia foi utilizada para esta resistência e para a seguinte).

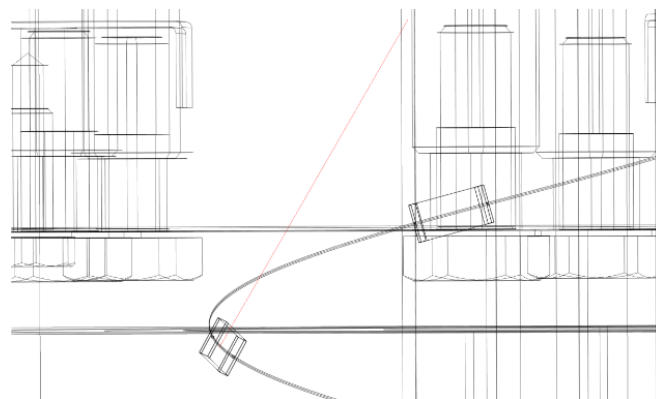
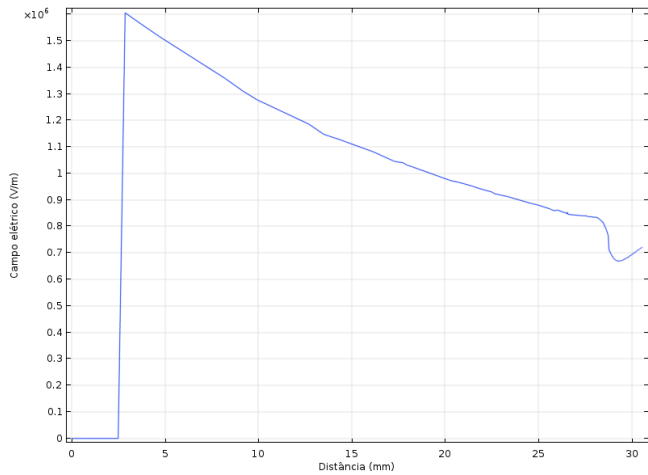
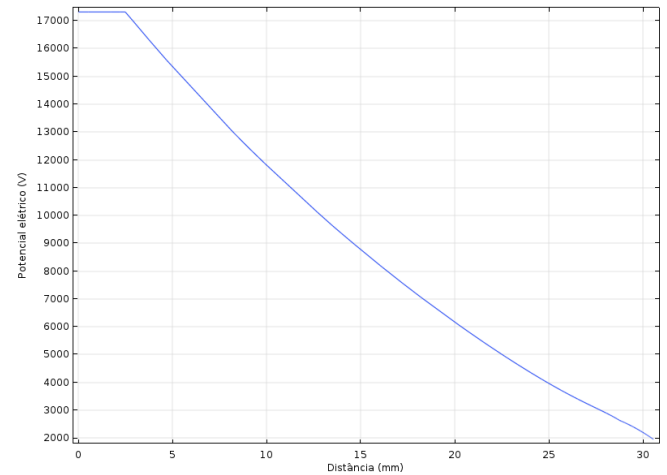


Figura 4.85-Linha de estudo entre a fonte e R7.



A



B

Figura 4.86-Estudo no percurso entre a fonte e R7. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_8$

Segundo o percurso da última resistência, representado na Figura 4.87, observa-se na Figura 4.88 que o campo elétrico de R8 é 0,97 MV/m, com uma d.d.p. de 16398 V. A subida do campo elétrico face à resistência anterior explica-se pela d.d.p em R8 ser maior que em R7, relativamente à distância que aumenta no estudo destas duas componentes.

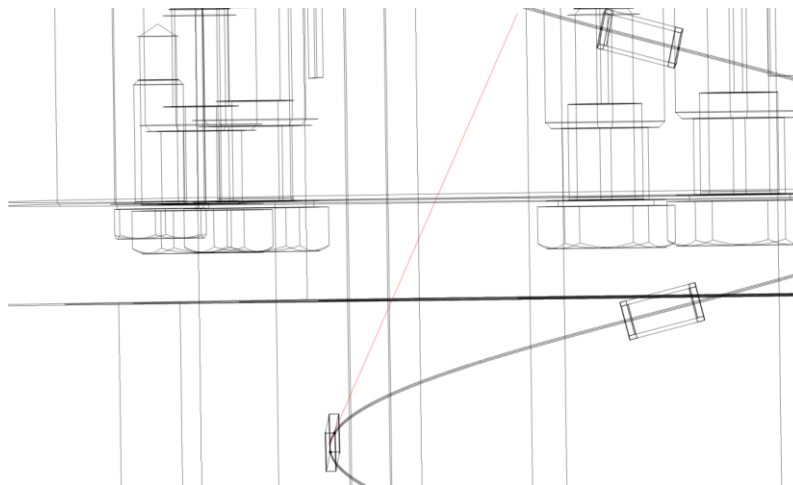
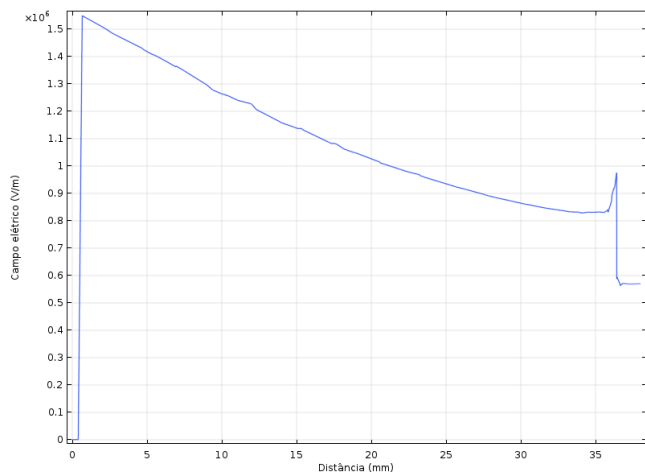
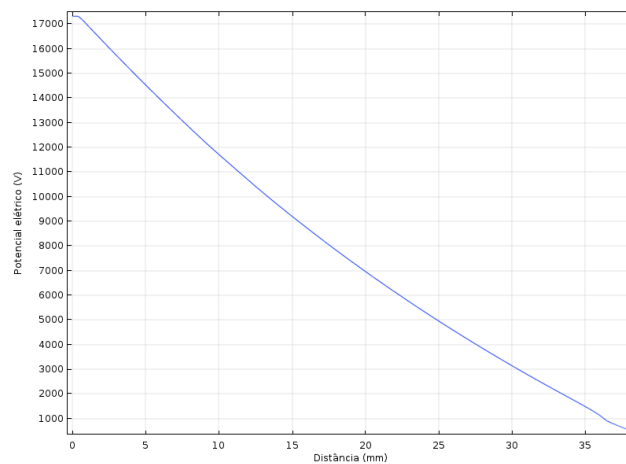


Figura 4.87-Linha de estudo entre a fonte e R8.



A



B

Figura 4.88-Estudo no percurso entre a fonte e R8. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

### 4.3.2 Caso A: Isolador com aro da malha reduzido e anomalias

Este é um cenário de anomalias com o objetivo de analisar a presença de defeitos no interior do isolador. As bolhas de ar referentes às resistências são atravessadas pelas linhas 3D que se representaram no ponto atrás, de modo que não é necessário introduzi-las novamente. Também a bolha de ar junto à extremidade do aro da malha está na mesma posição da análise da 1ª cadeia, pelo que, apenas serão representadas as linhas de estudos referentes à bolha, que está na face interior da malha e à tangente ao condutor de AT.

#### 4.3.2.1 Estudo da malha e condutor de AT

- *Bolha de ar na extremidade da malha*

Através da Figura 4.89 percebe-se que junto à extremidade da malha há uma subida relativa do campo elétrico. Através da Figura 4.90 vê-se que o campo elétrico, na extremidade da malha é 6,25 MV/m e na bolha de ar de 5,41 MV/m. Visto que o campo elétrico incidente na bolha é maior que o campo de ruptura do ar, em consequência haverá uma DP. De referir que sobre a bolha de ar há uma d.d.p. de 17120 V, enquanto na extremidade da malha é de 17320 V.

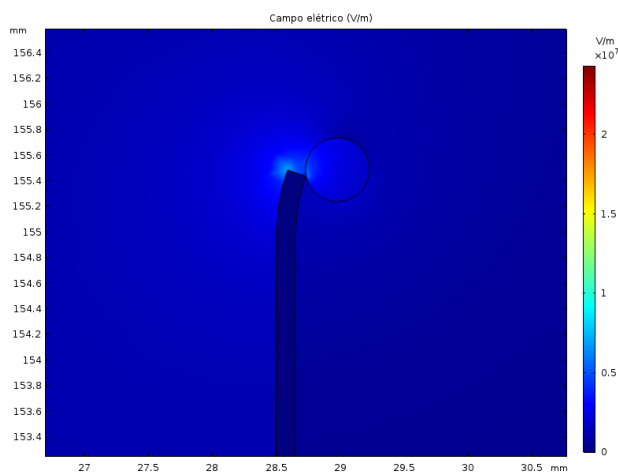
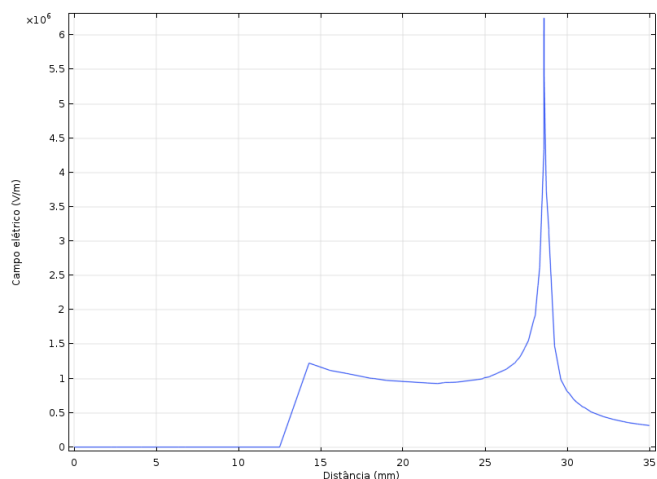
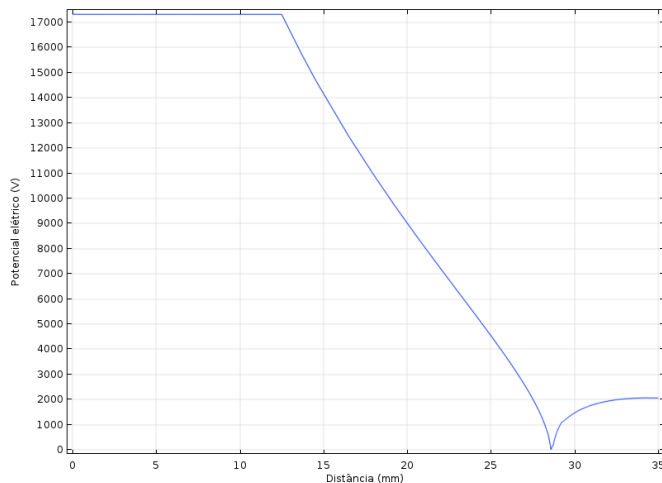


Figura 4.89- Cenário de anomalias. Campo elétrico com bolha de ar tangente ao aro da malha



A



B

Figura 4.90-Estudo no percurso entre o condutor de AT e a malha com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *2ª Bolha de ar na malha*

A segunda bolha de ar na malha analisa-se através da linha 3D (Figura 4.91) e observa-se pela Figura 4.93 que o campo elétrico incidente sobre esta é 1,09 MV/m, com uma d.d.p. de 17050 V. Comparativamente com o cenário de ausência de anomalias conclui-se que, a presença de ar aumenta o campo elétrico nessa zona mais de 0,3 MV/m, algo que não é problemático porque está bastante distante do seu campo de disrupção, enquanto que o potencial elétrico apresenta igual comportamento.

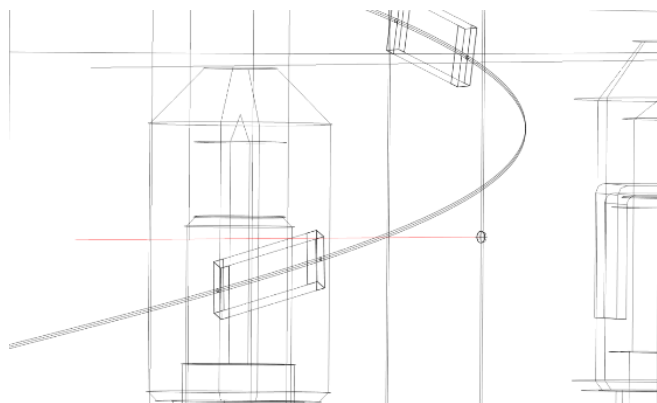
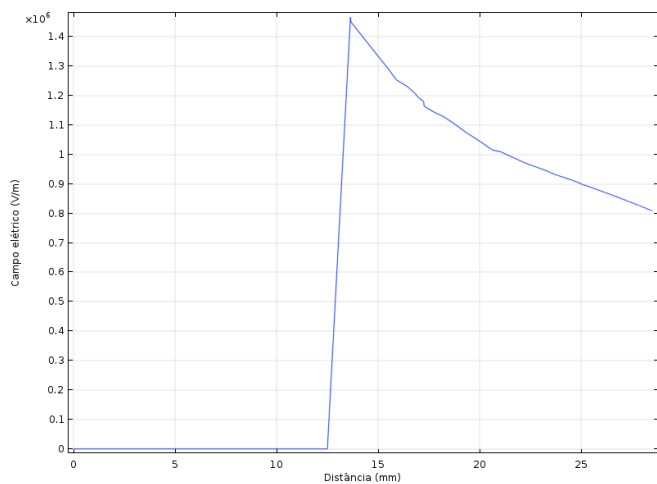
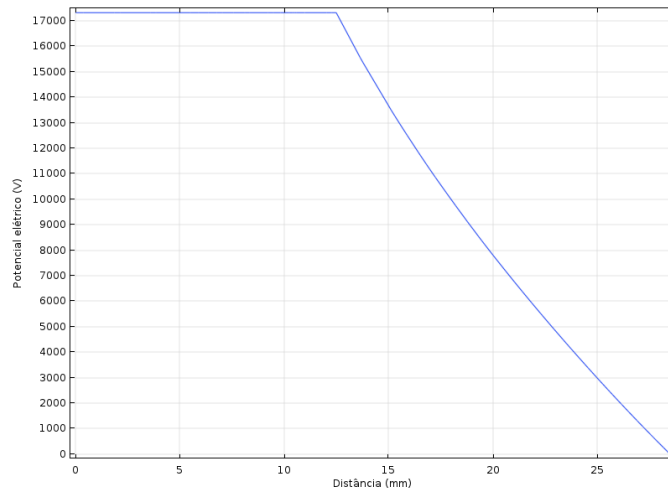


Figura 4.91-Linha de estudo entre o condutor de AT e a malha com 2ª anomalia.

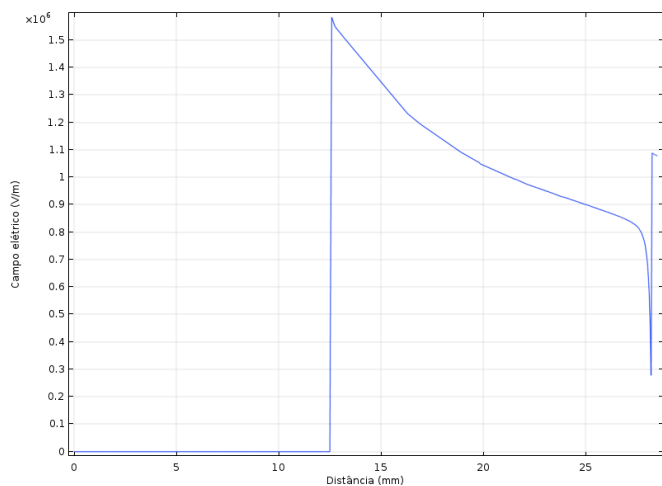


A

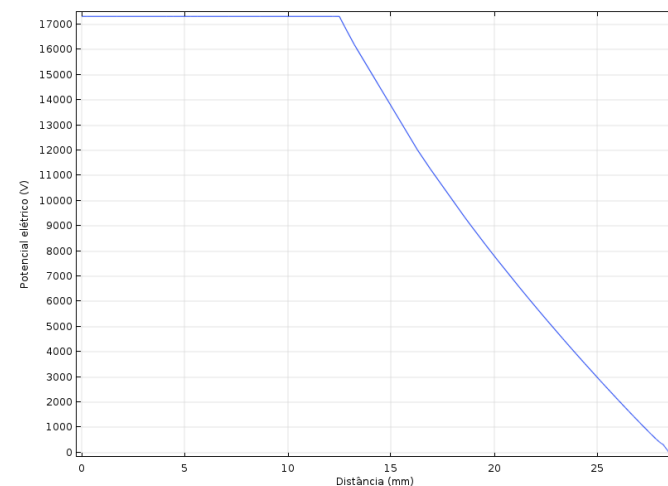


B

Figura 4.92-Estudo no percurso entre o condutor de AT e a malha, antes da introdução da 2ª anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.



A



B

Figura 4.93-Estudo no percurso entre o condutor de AT e 2ª anomalia na malha. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Bolha de ar no condutor*

Através da linha 3D que atravessa a bolha tangente ao condutor de AT (Figura 4.94), observa-se pela Figura 4.96 que na bolha de ar incide um campo com intensidade de 1,11 MV/m, com uma d.d.p residual de 70 V. Comparando estes resultados com os do funcionamento normal (Figura 4.95), conclui-se que na presença de ar o campo elétrico junto do condutor aumenta quase 0,3 MV/m e a d.d.p aumenta 70 V.

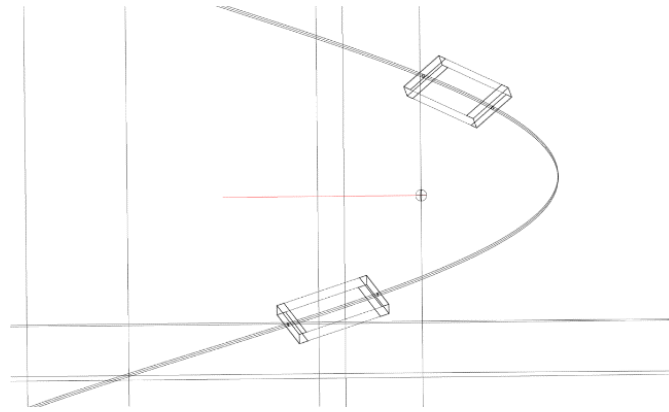
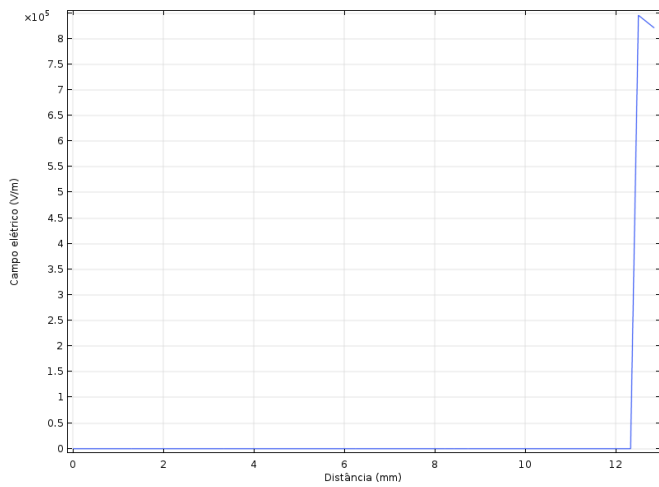
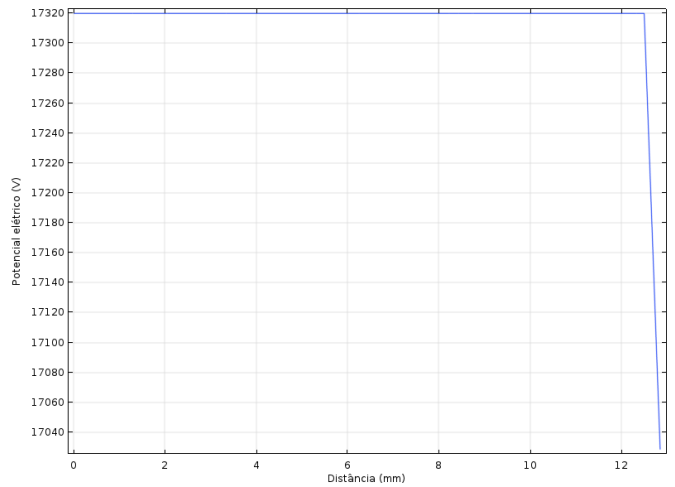


Figura 4.94-Linha de estudo entre o centro do isolador e o condutor de AT com anomalia.

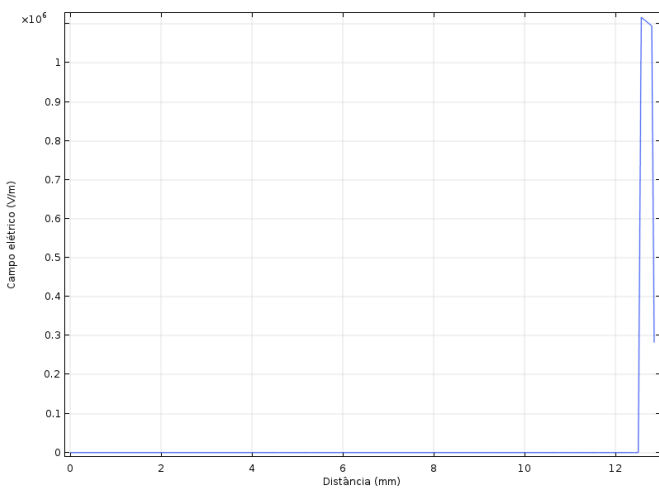


A

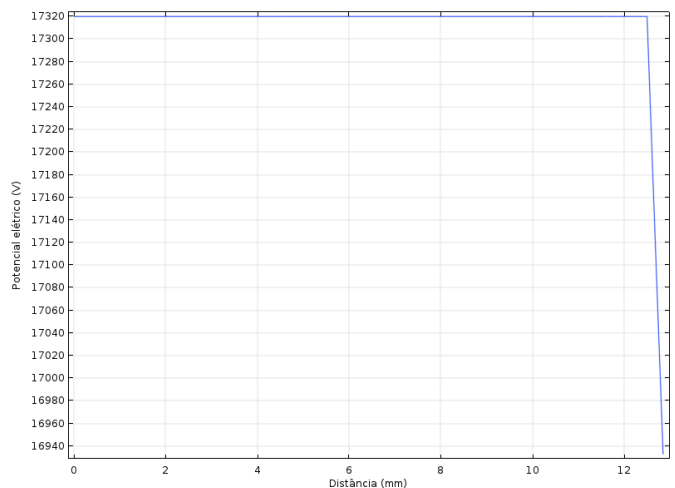


B

Figura 4.95-Estudo no percurso entre o centro do isolador e condutor de AT, antes da introdução de anomalia no condutor de AT. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.



A



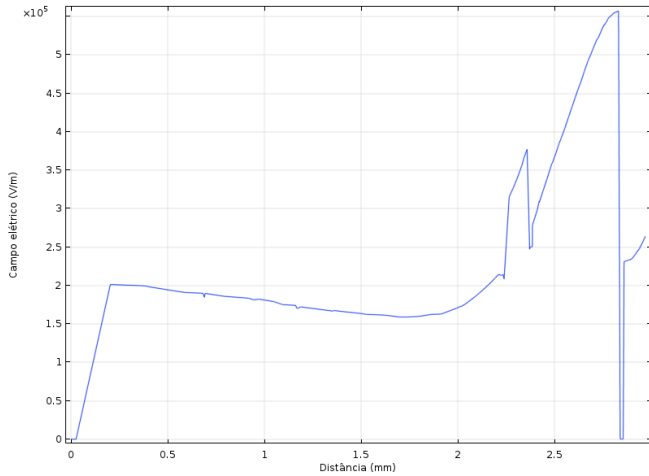
B

Figura 4.96-Estudo no percurso entre o centro do isolador e condutor de AT, com anomalia no condutor de AT. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

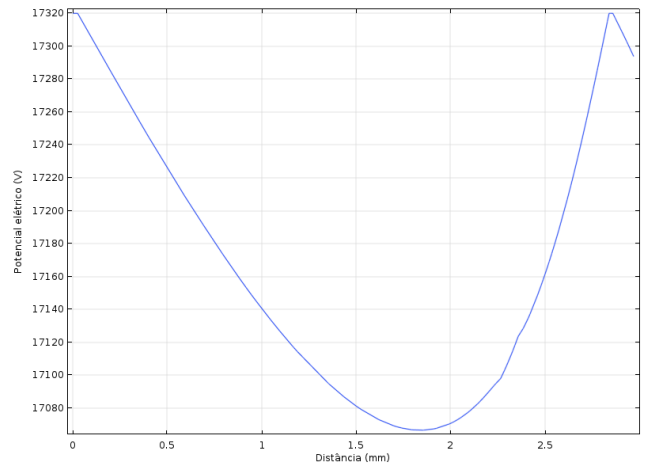
### 4.3.2.2 Estudo das resistências

#### ○ Resistência $R_1$

Na Figura 4.97 observa-se que a bolha de ar entre a primeira resistência e a fonte de tensão regista um campo elétrico de 0,37 MV/m, com uma d.d.p de 197 V. Sobre a primeira resistência incide um campo elétrico de 0,55 MV/m, com uma d.d.p nula.



A

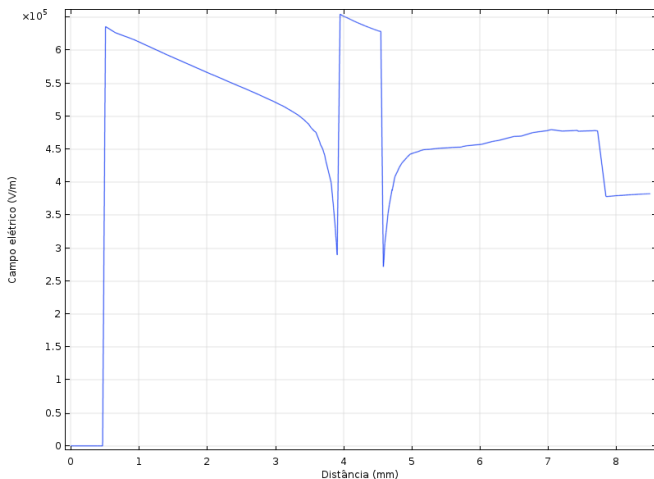


B

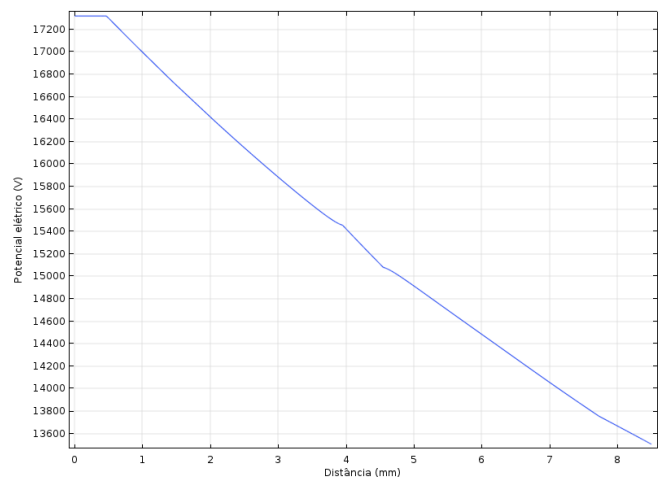
Figura 4.97-Estudo no percurso entre a fonte e R1 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

#### ○ Resistência $R_2$

Da análise da Figura 4.98 retira-se que a bolha de ar entre a segunda resistência e a fonte de tensão regista um campo elétrico de 0,65 MV/m, com uma d.d.p de 1865 V. Na segunda resistência o campo elétrico incide com intensidade de 0,47 MV/m, com uma d.d.p. de 3565 V.



A



B

Figura 4.98-Estudo no percurso entre a fonte e R2 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

#### ○ Resistência $R_3$

Do estudo feito no percurso até à terceira resistência observa-se na Figura 4.99 que a bolha de ar regista um campo elétrico de 0,99 MV/m, com uma d.d.p de 3504 V. Estas grandezas na resistência têm o valor de 0,63 MV/m, com uma d.d.p. de 6214 V.

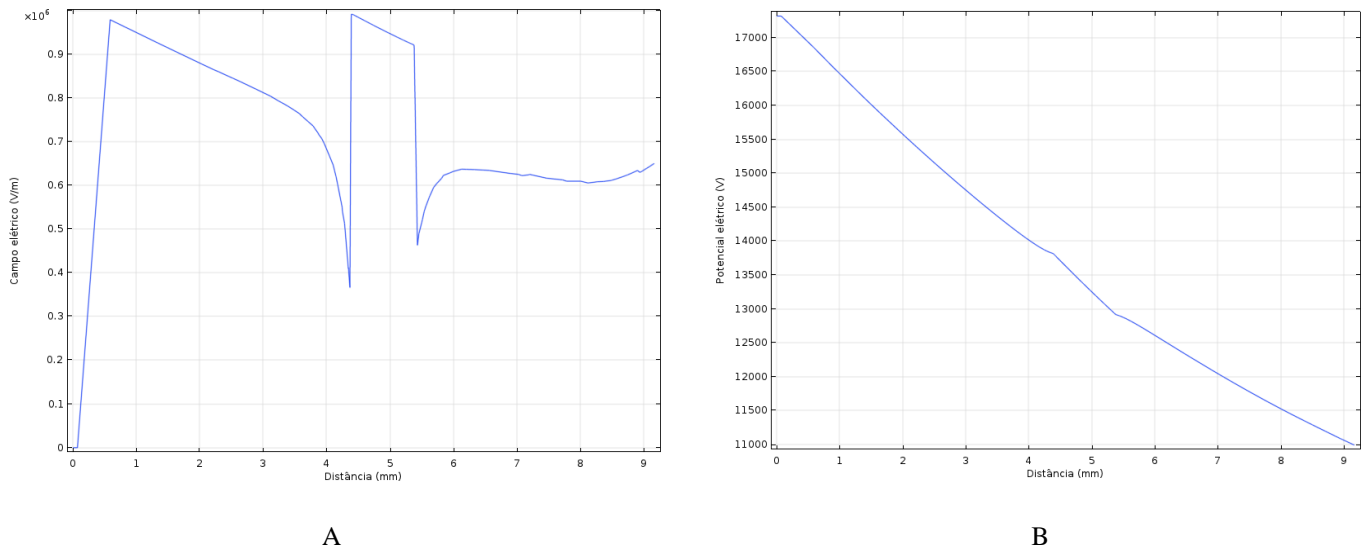


Figura 4.99-Estudo no percurso entre a fonte e R3 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>4</sub>*

Pela Figura 4.100 observa-se que no percurso até R4 o campo elétrico na bolha de ar é 1,29 MV/m, subindo mais de 0,8 MV/m na sua fronteira com a resina e com uma d.d.p de 5255 V. Analogamente a quarta resistência tem um campo elétrico de 0,93 MV/m, com uma d.d.p de 9890 V.

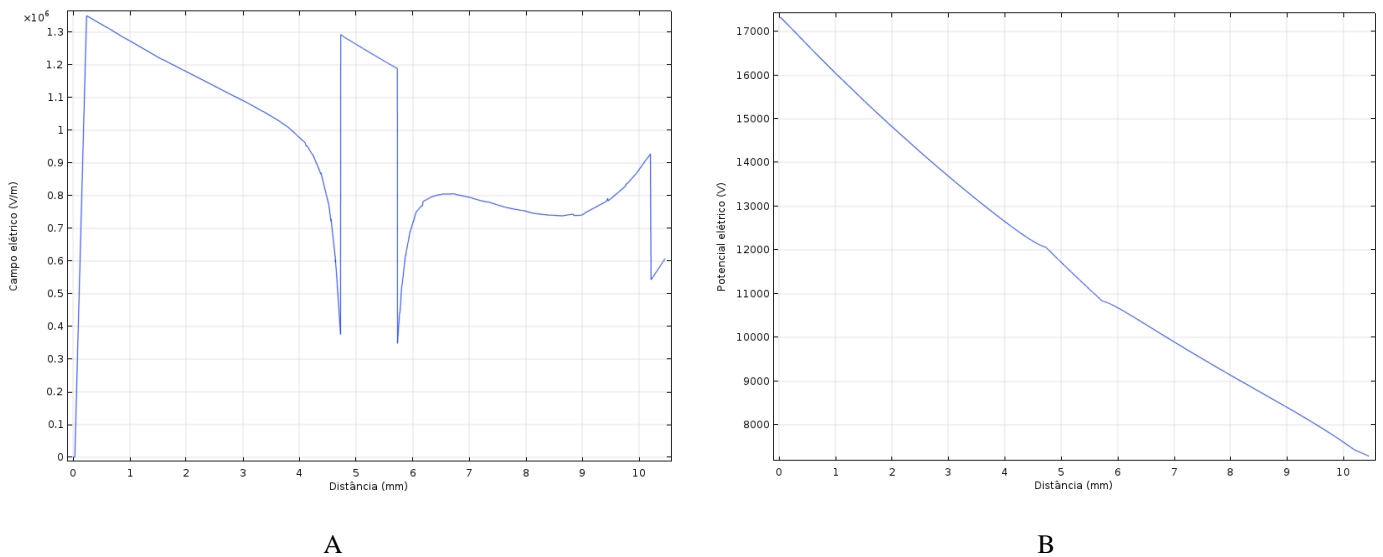
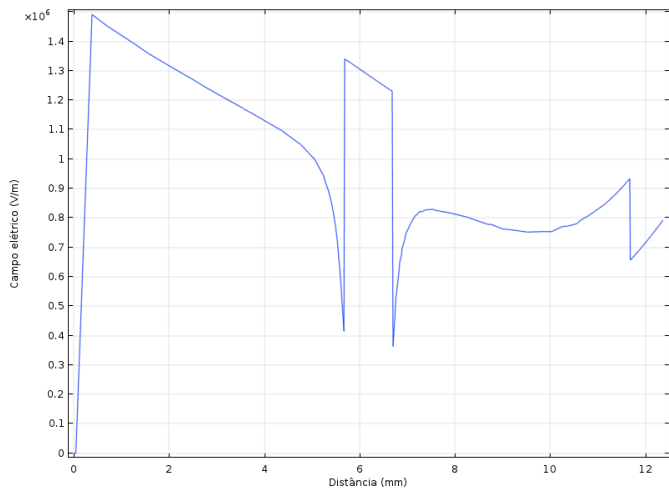


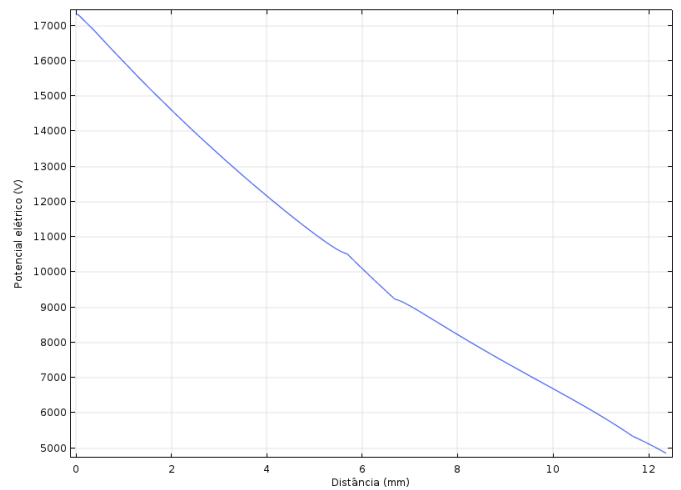
Figura 4.100-Estudo no percurso entre a fonte e R4 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>5</sub>*

A anomalia presente entre a fonte de tensão e a quinta resistência regista um campo elétrico de 1,34 MV/m, com uma d.d.p de 6807 V. Relativamente à quinta resistência incide um campo elétrico de 0,93 MV/m, com uma d.d.p. de 11982 V. Estes valores estão ilustrados na Figura 4.101.



A

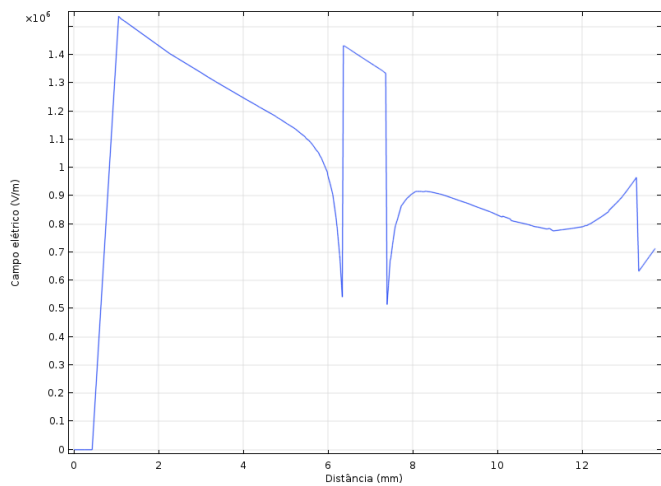


B

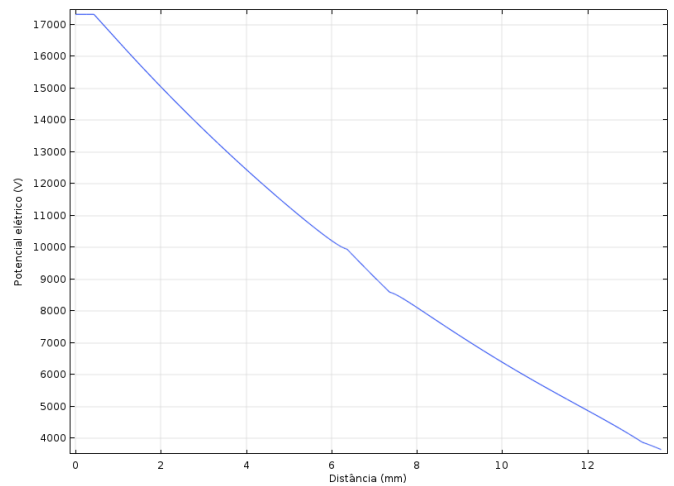
Figura 4.101-Estudo no percurso entre a fonte e R5 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_6$

Através da Figura 4.102 vê-se que na bolha de ar, presente no percurso entre a fonte e a sexta resistência, incide um campo elétrico de 1,43 MV/m, aumentado quase 1 MV/m da resina para o seu interior, com uma d.d.p. de 7373 V. Além disso, também se observa que esta resistência está sujeita a um campo elétrico de 0,96 MV/m, com uma d.d.p de 13433 V.



A

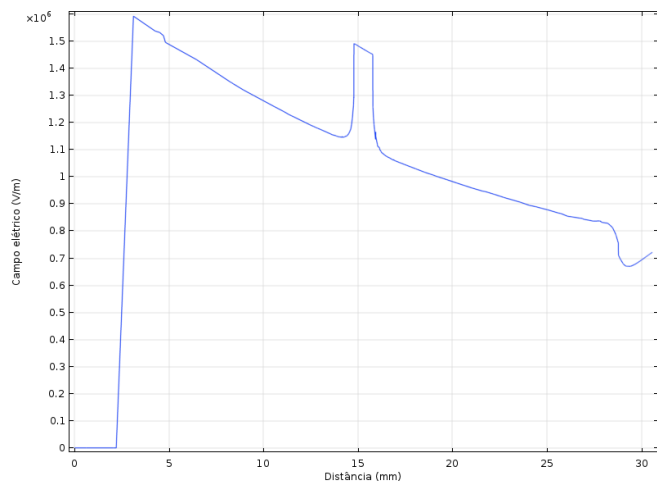


B

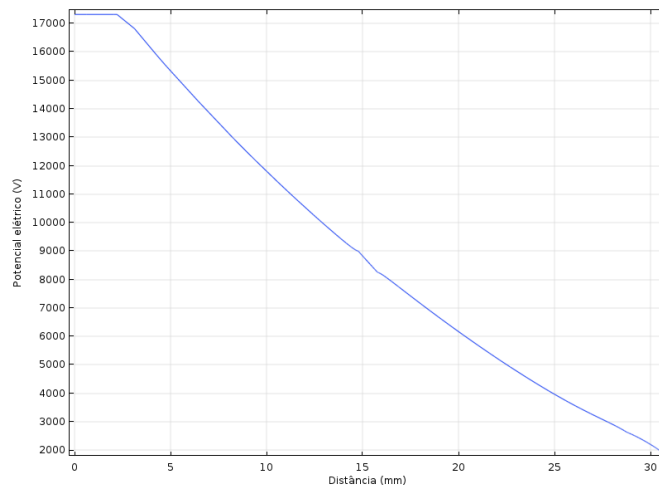
Figura 4.102-Estudo no percurso entre a fonte e R6 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_7$

Sobre a bolha de ar presente no caminho entre o condutor de AT e a penúltima resistência, incide um campo elétrico de 1,49 MV/m, com uma d.d.p de 8324 V. Em relação à resistência R7 o campo elétrico incide com uma intensidade de 0,76 MV/m, com uma d.d.p de 14682 V. Os valores citados encontram-se na Figura 4.103.



A

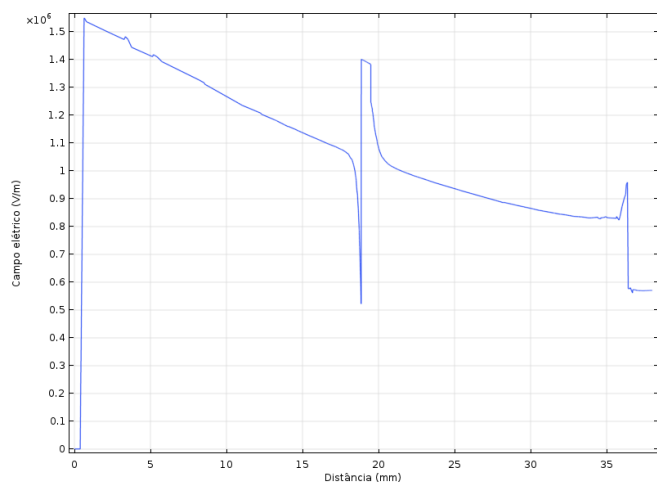


B

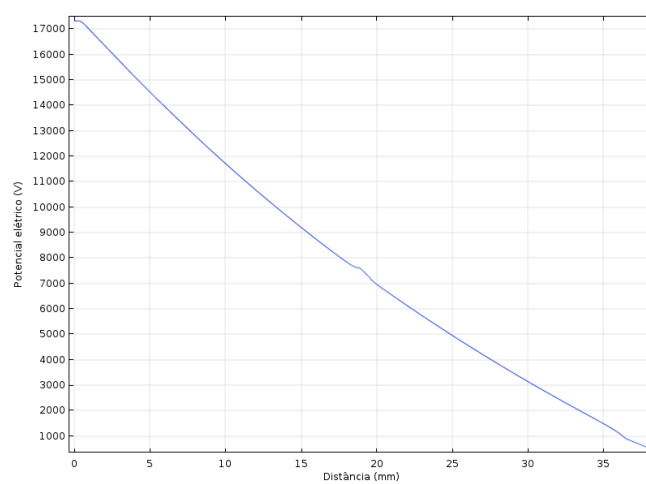
Figura 4.103-Estudo no percurso entre a fonte e R7 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_8$

Do estudo feito no percurso até à última resistência, observa-se na Figura 4.104 que a bolha de ar regista um campo elétrico de 1,40 MV/m, com uma d.d.p de 9708 V. As grandezas de estudo na resistência têm o valor de 0,95 MV/m, com uma d.d.p. de 16380 V.



A



B

Figura 4.104-Estudo no percurso entre a fonte e R8 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

### 4.3.3 Caso B: Isolador com aro da malha enrolado e sem anomalias

Tal como feito no estudo da 1ª cadeia resistiva, neste caso altera-se o raio de curvatura das extremidades superior e inferior da malha para o valor máximo e analisa-se as mesmas grandezas, com as mesmas linhas utilizadas que no caso A.

### 4.3.3.1 Estudo da malha

Tal como observado antes, há diminuição acentuada do campo elétrico junto das extremidades arredondadas. A Figura 4.105 espelha o resultado das novas alterações sobre a geometria da malha, observa-se que o campo elétrico é 1,93 MV/m, com uma d.d.p total (de 17320 V).

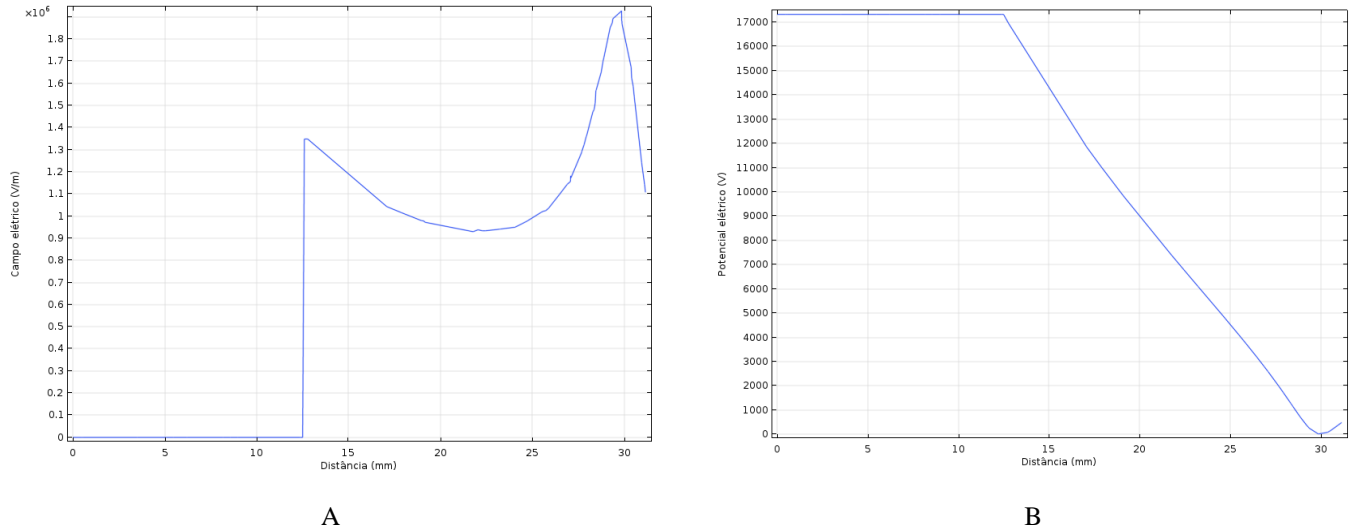


Figura 4.105-Caso B: Estudo das grandezas no percurso entre o condutor e a extremidade da malha. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

### 4.3.3.2 Estudo das resistências

#### ○ Resistência $R_1$

A primeira resistência está sujeita a um campo elétrico de 0,58 MV/m, com uma d.d.p. nula, como se confirma pela Figura 4.106.

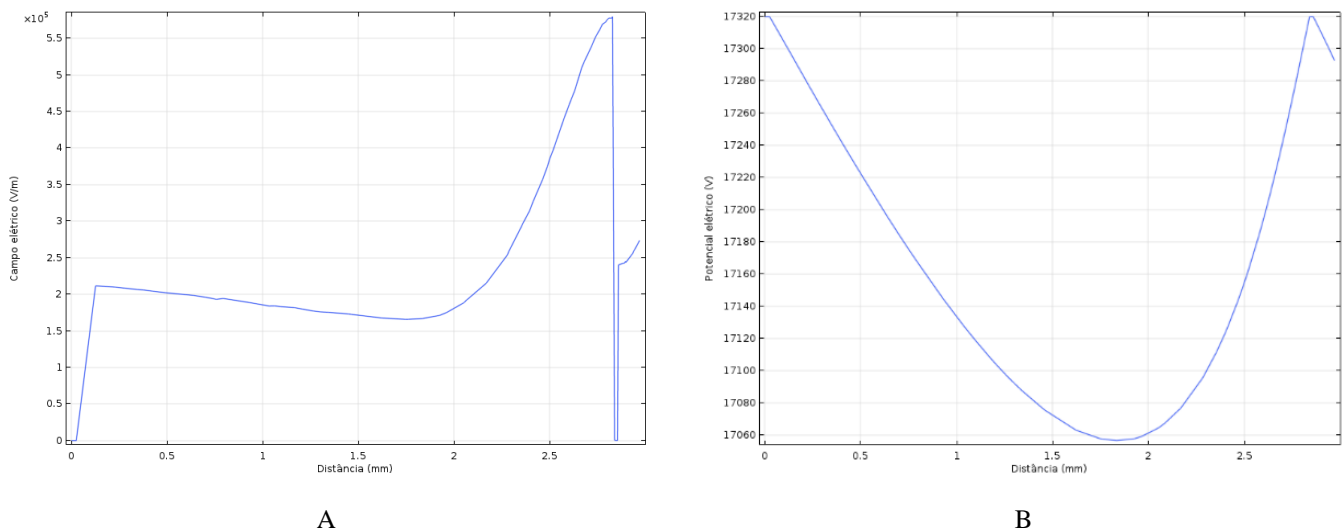
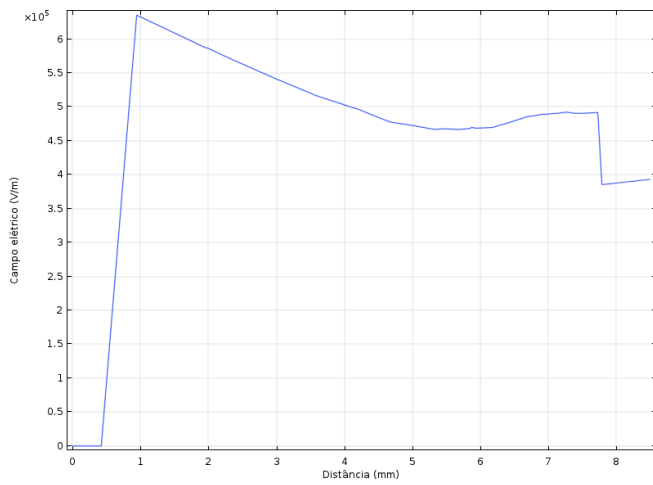


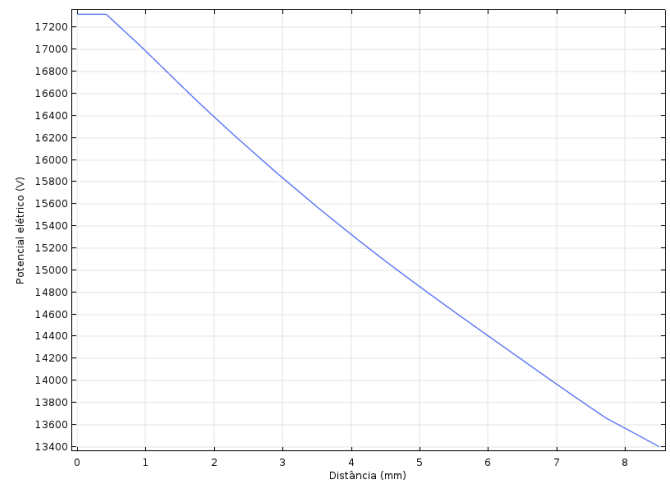
Figura 4.106-Estudo no percurso entre a fonte e  $R_1$ . A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

#### ○ Resistência $R_2$

Da interpretação da Figura 4.107 regista-se que o campo elétrico em R2 é 0,49 MV/m, com uma d.d.p de 3661 V.



A

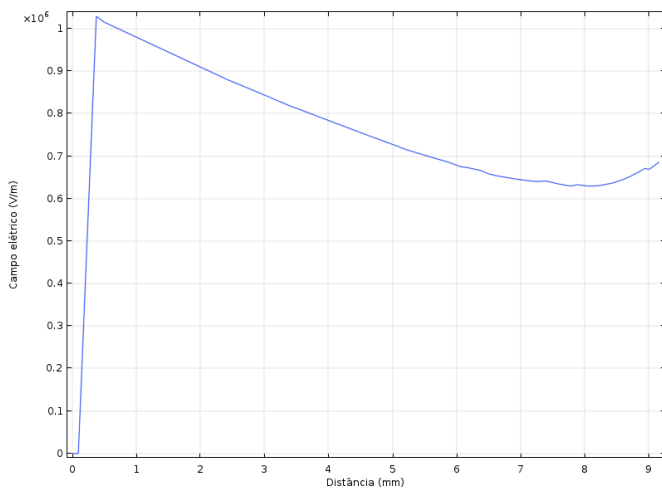


B

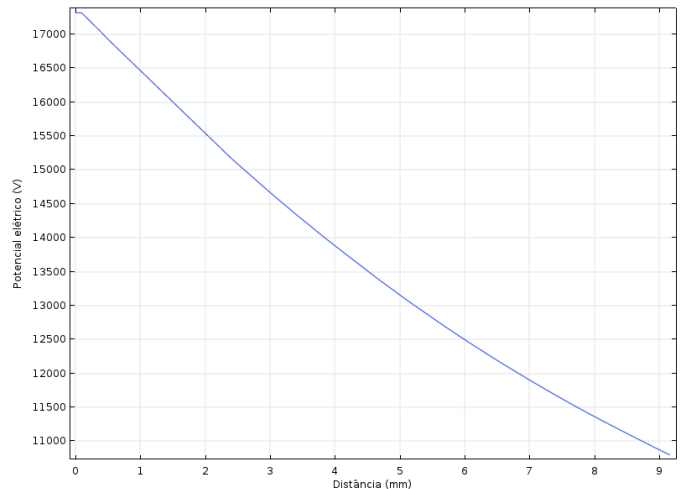
Figura 4.107-Estudo no percurso entre a fonte e R2. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>3</sub>*

Da análise feita à Figura 4.108 percebe-se que a resistência R3 está submetida a um campo elétrico maior que a anterior, de intensidade 0,67 MV/m, com uma d.d.p de 6420 V.



A

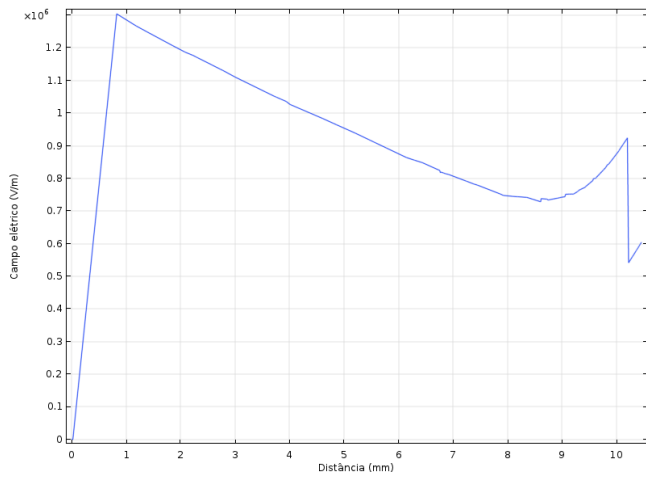


B

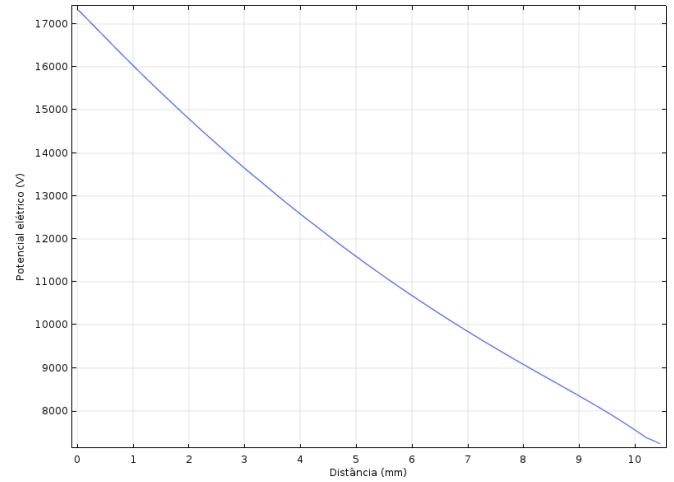
Figura 4.108-Estudo no percurso entre a fonte e R3. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>4</sub>*

No percurso entre o condutor de AT e a quarta resistência incide sobre esta um campo elétrico de 0,92 MV/m, com uma d.d.p. de 9940 V. Estes valores verificam-se na Figura 4.109.



A

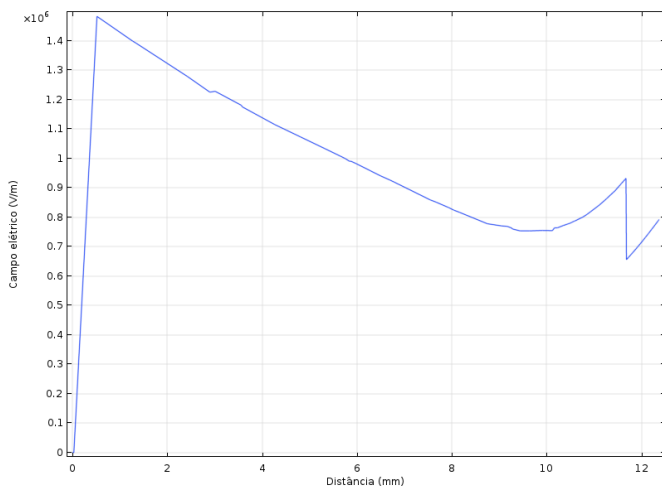


B

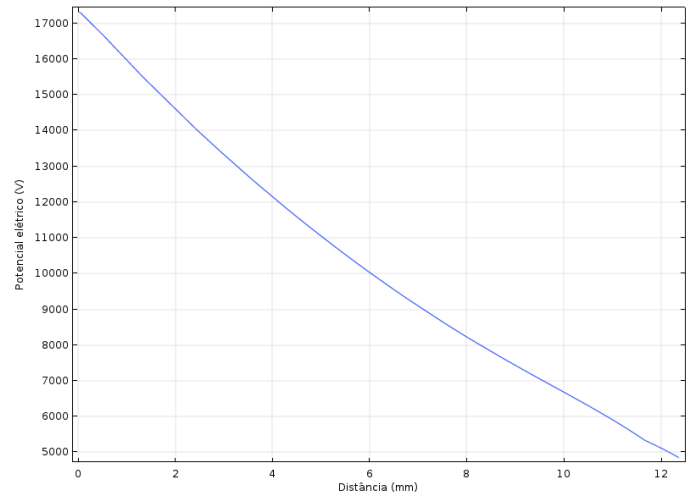
Figura 4.109-Estudo no percurso entre a fonte e R4. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>5</sub>*

Na quinta resistência é registado um campo elétrico, no ponto da fronteira da resina com o núcleo cerâmico, de 0,93 MV/m, com uma d.d.p de 11986 V, como se observa na Figura 4.110.



A

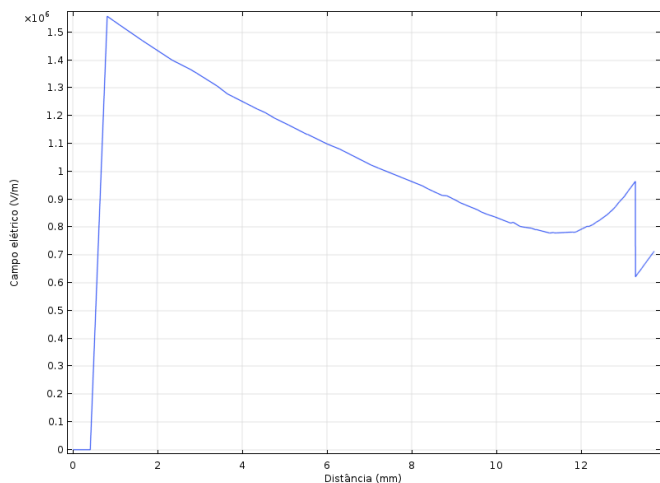


B

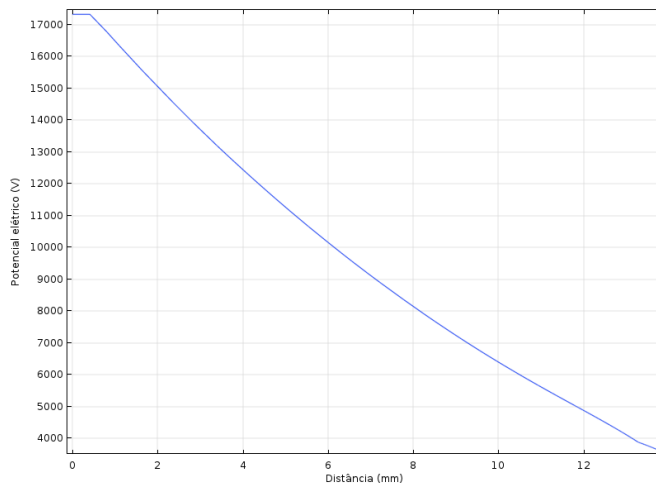
Figura 4.110-Estudo no percurso entre a fonte e R5. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>6</sub>*

Segundo a Figura 4.111 é possível aferir que o campo elétrico desta resistência é de 0,96 MV/m, com uma d.d.p. de 13430 V.



A

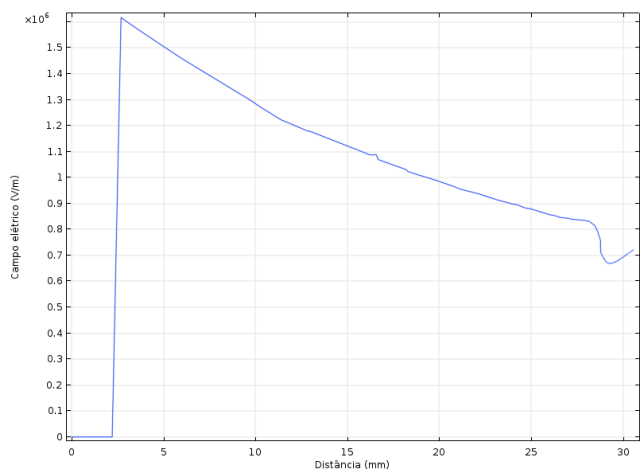


B

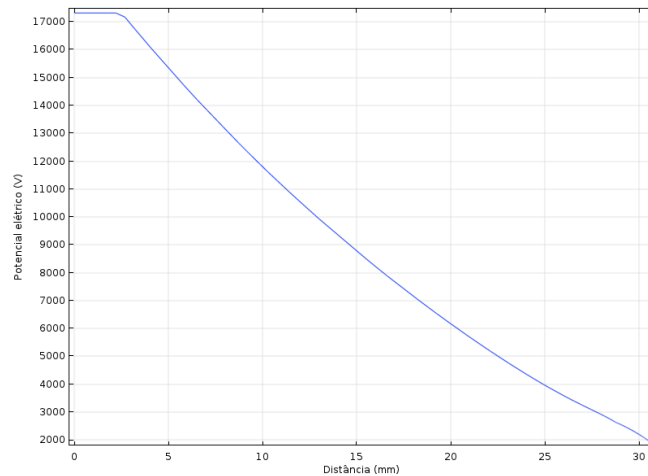
Figura 4.111-Estudo no percurso entre a fonte e R6. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>7</sub>*

Pela Figura 4.112 observa-se que o campo elétrico na penúltima resistência é de 0,76 MV/m, com uma d.d.p. de 14686 V. O campo elétrico diminui porque apesar da d.d.p. ter aumentado, a distância entre o condutor e esta resistência aumenta numa proporção muito maior.



A

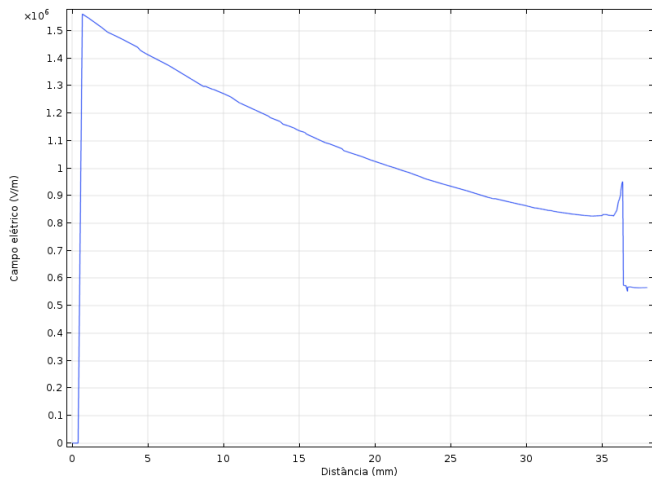


B

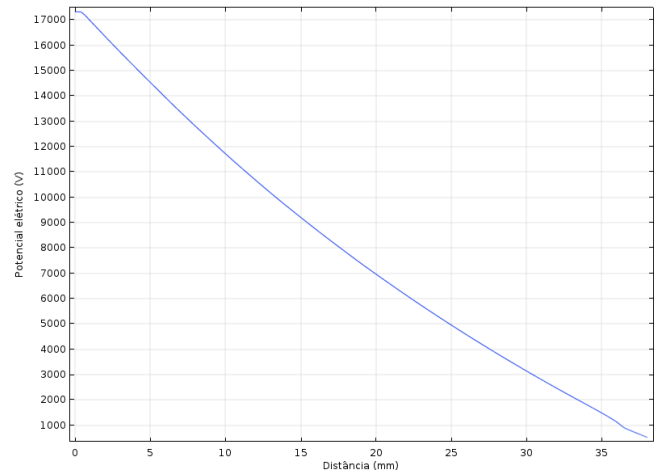
Figura 4.112-Estudo no percurso entre a fonte e R7. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>8</sub>*

Na Figura 4.113 observa-se que a última resistência está sujeita a um campo elétrico de 0,95 MV/m e com a maior d.d.p da cadeia resistiva, no valor de 16385 V, visto ser a que faz ligação ao potencial nulo.



A



B

Figura 4.113-Estudo no percurso entre a fonte e R8. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

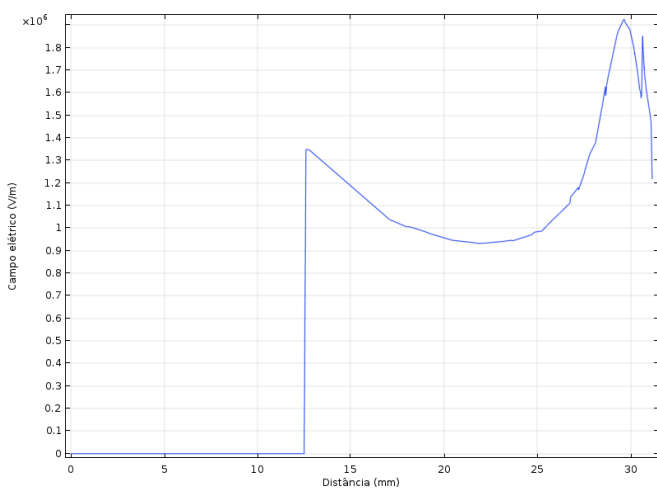
#### 4.3.4 Caso B: Isolador com aro da malha enrolado e anomalias

No cenário de falhas as bolhas de ar são colocadas nas mesmas coordenadas que no caso A com anomalias e, a bolha tangente ao aro da malha está na mesma posição que no caso B com anomalias da 1ª cadeia resistiva. Este é um dos cenários que serve para concluir qual a tipologia onde há melhor desempenho do isolador.

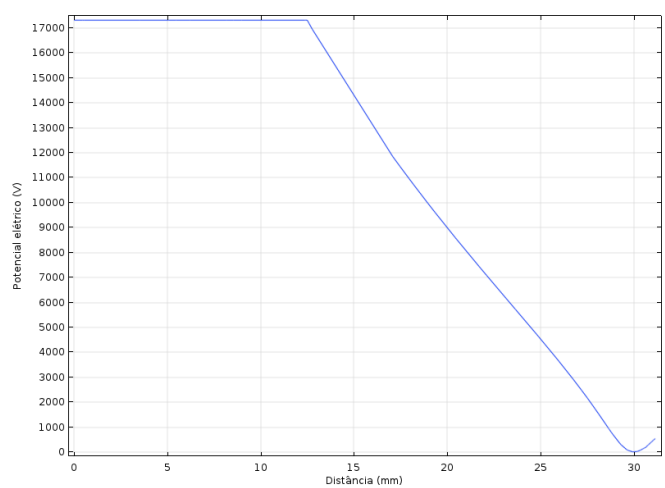
##### 4.3.4.1 Estudo da malha e condutor de AT

###### ○ *Bolha de ar na extremidade da malha*

Na bolha de ar tangente ao aro da malha verifica-se através da Figura 4.114, que ocorre um campo elétrico de 1,85 MV/m, com uma d.d.p de 17210 V. Já sobre a extremidade da malha incorre um campo elétrico de 1,92 MV/m, com uma d.d.p de 17140 V.



A



B

Figura 4.114-Estudo no percurso entre o condutor de AT e a malha com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *2ª Bolha de ar na malha*

Pela Figura 4.115 verifica-se que a segunda bolha inserida na malha está sujeita a um campo elétrico de 1,08 MV/m, com uma d.d.p de 17040 V. Tal como no caso A, existem as mesmas diferenças numéricas no cenário com e sem bolha de ar, daí não se fazer a comparação.

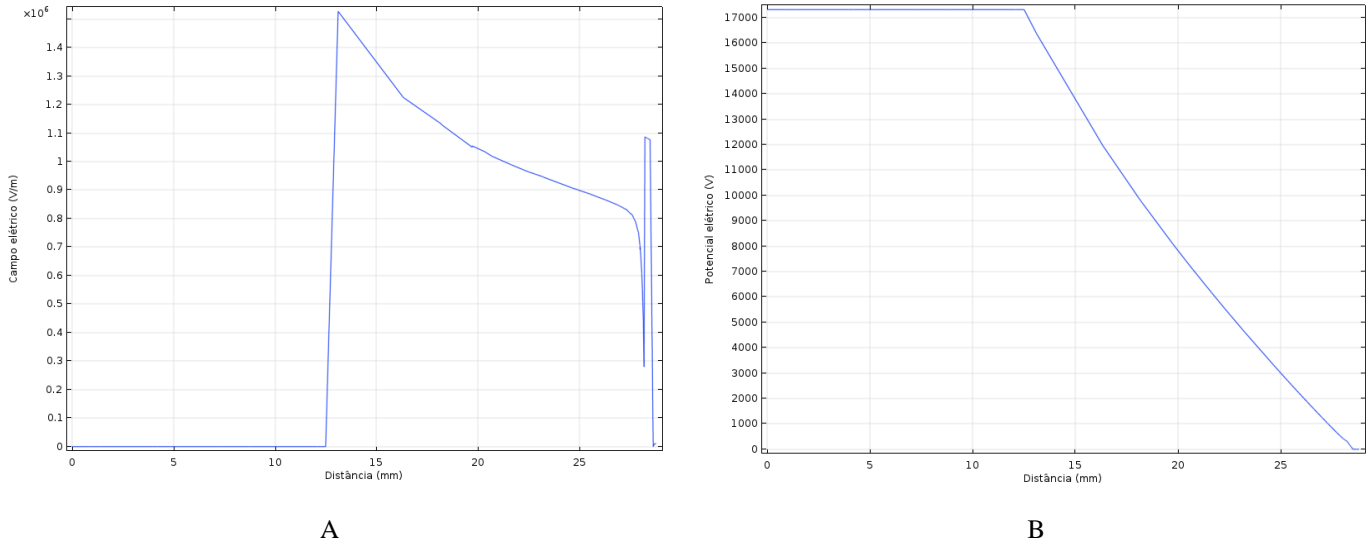


Figura 4.115-Estudo no percurso entre o condutor de AT e 2ª anomalia na malha. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Bolha de ar no condutor*

Pela análise da Figura 4.116 a bolha alocada ao condutor de AT está associada ao campo elétrico de intensidade 1,16 MV/m. Do condutor até à extremidade da bolha há uma d.d.p. de 70 V. Tal como no caso A, existem as mesmas diferenças neste cenário com e sem bolha de ar, portanto, opta-se por não repetir os mesmos resultados.

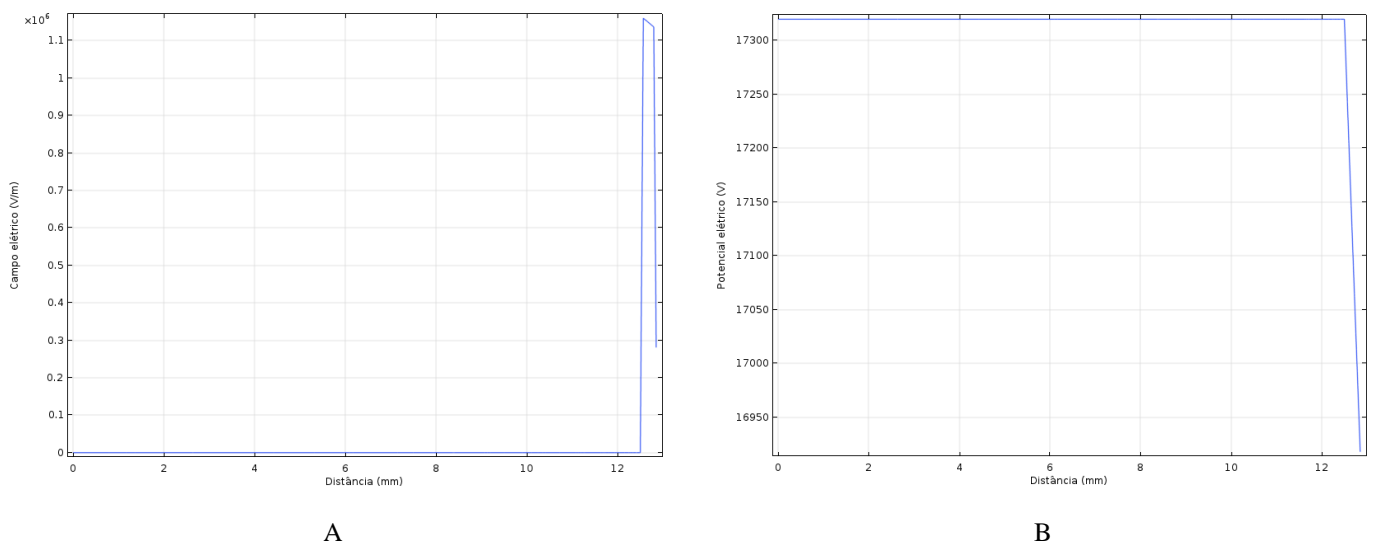


Figura 4.116-Estudo no percurso entre o centro do isolador e condutor de AT, com anomalia no condutor de AT. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

#### 4.3.4.2 Estudo das resistências

##### ○ Resistência $R_1$

Na análise do percurso entre o condutor de AT e a primeira resistência, a bolha de ar localizada a meio deste caminho está sujeita a um campo elétrico de 0,39 MV/m, com uma d.d.p. de 204 V. O campo elétrico nesta resistência é de 0,58 MV/m, com uma d.d.p. nula. Estes valores estão representados na Figura 4.117.

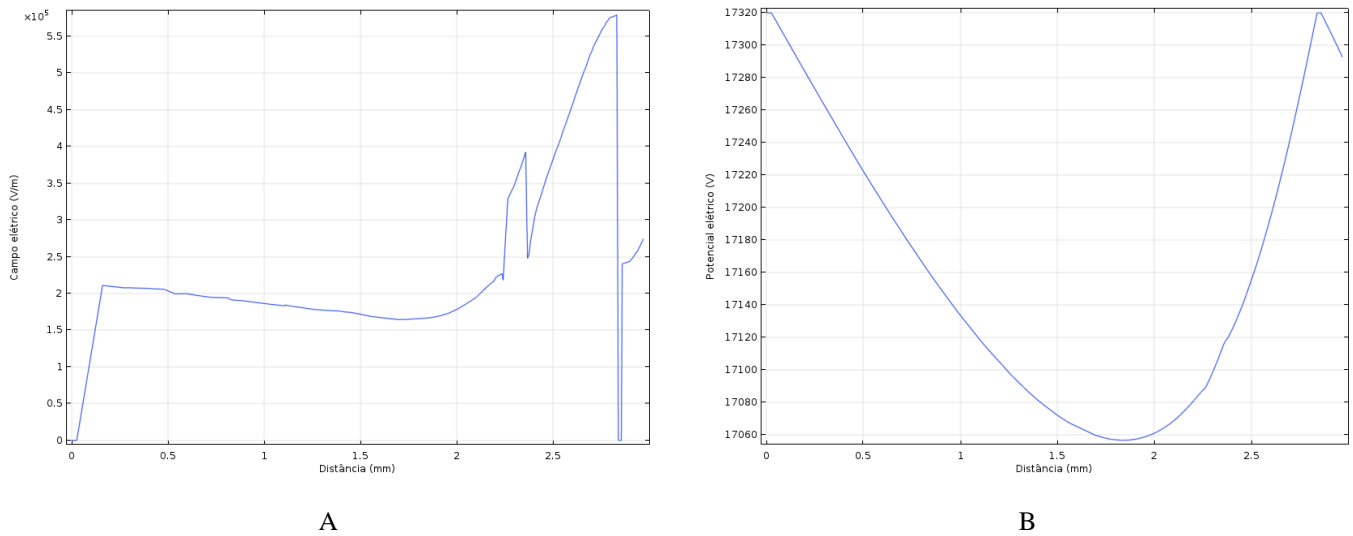


Figura 4.117-Estudo no percurso entre a fonte e R1 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

##### ○ Resistência $R_2$

Pela Figura 4.118 retira-se que o campo elétrico na bolha é 0,67 MV/m, com uma d.d.p. de 1923 V. Relativamente à resistência ocorre sobre esta um campo elétrico de 0,49 MV/m, com uma d.d.p. de 3662 V.

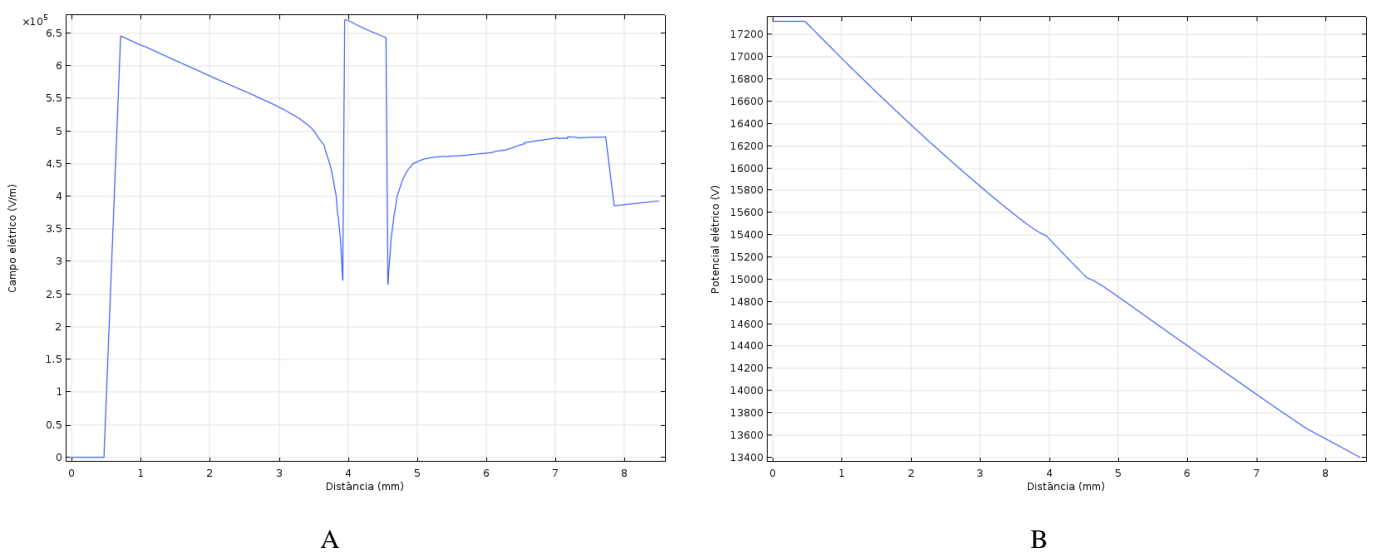


Figura 4.118-Estudo no percurso entre a fonte e R2 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

##### ○ Resistência $R_3$

A bolha de ar que está a meio do percurso entre a fonte de tensão e a terceira resistência está sujeita a um campo elétrico de 1,02 MV/m, com uma d.d.p de 3607 V. Na resistência ocorre um campo elétrico de 0,67 MV/m, com uma d.d.p. de 6420 V. Os valores referidos encontram-se na Figura 4.119.

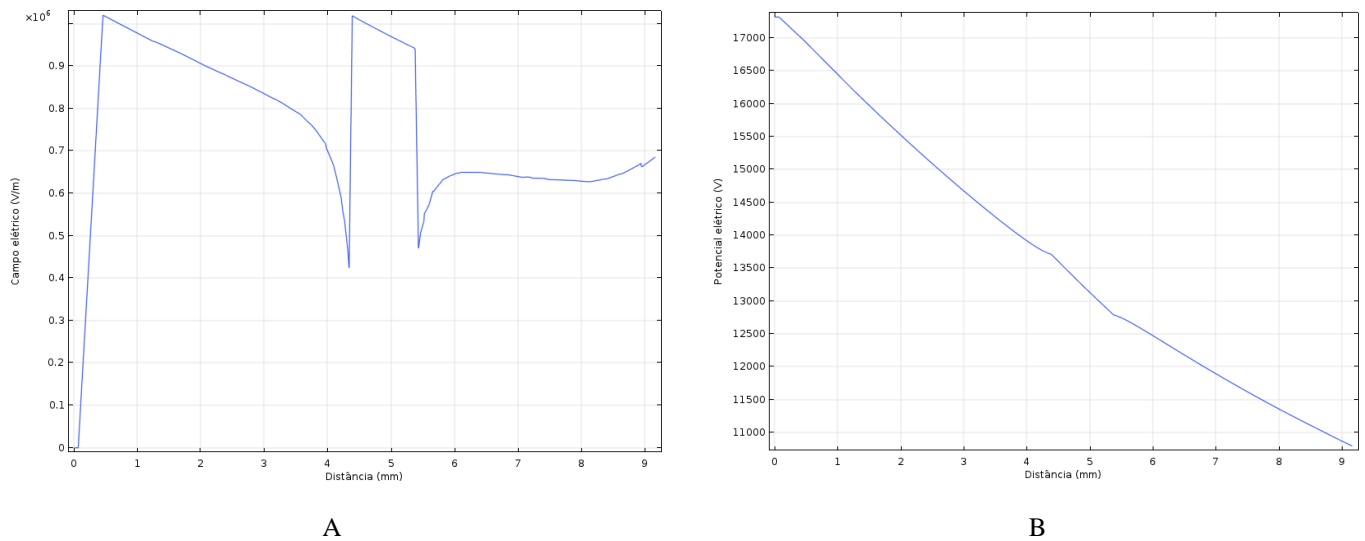


Figura 4.119-Estudo no percurso entre a fonte e R3 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência  $R_4$*

Através da Figura 4.120, observa-se que na anomalia incide um campo elétrico de 1,30 MV/m, com uma d.d.p. de 5308 V. Na fronteira da bolha de ar com a resina o campo elétrico cresce perto de 0,9 MV/m. Além disso verifica-se que o campo elétrico a que a resistência está submetida é de 0,92 MV/m, com uma d.d.p. de 9940V.

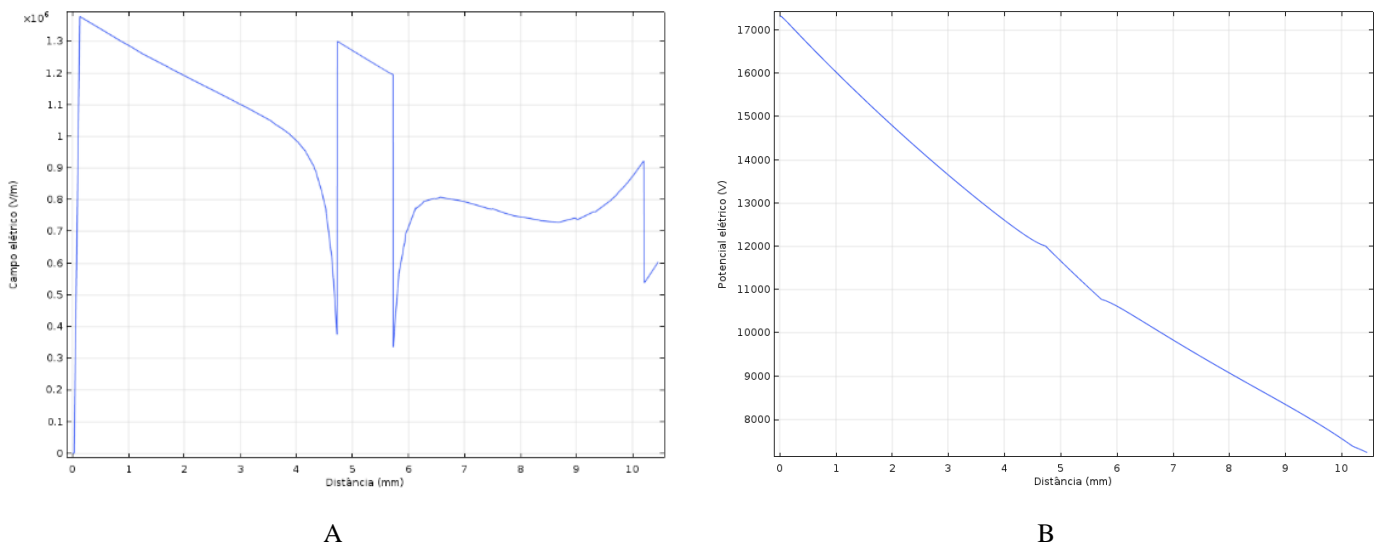


Figura 4.120-Estudo no percurso entre a fonte e R4 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência  $R_5$*

Pela Figura 4.121 regista-se que o campo elétrico na bolha de ar é de 1,34 MV/m e a sua d.d.p. de 6811 V. Mais uma vez o campo elétrico aumenta perto de 0,9 MV/m na fronteira da bolha de ar com

a resina. Paralelamente na resistência o campo elétrico incidente é de 0,93 MV/m e a sua d.d.p. de 11986 V.

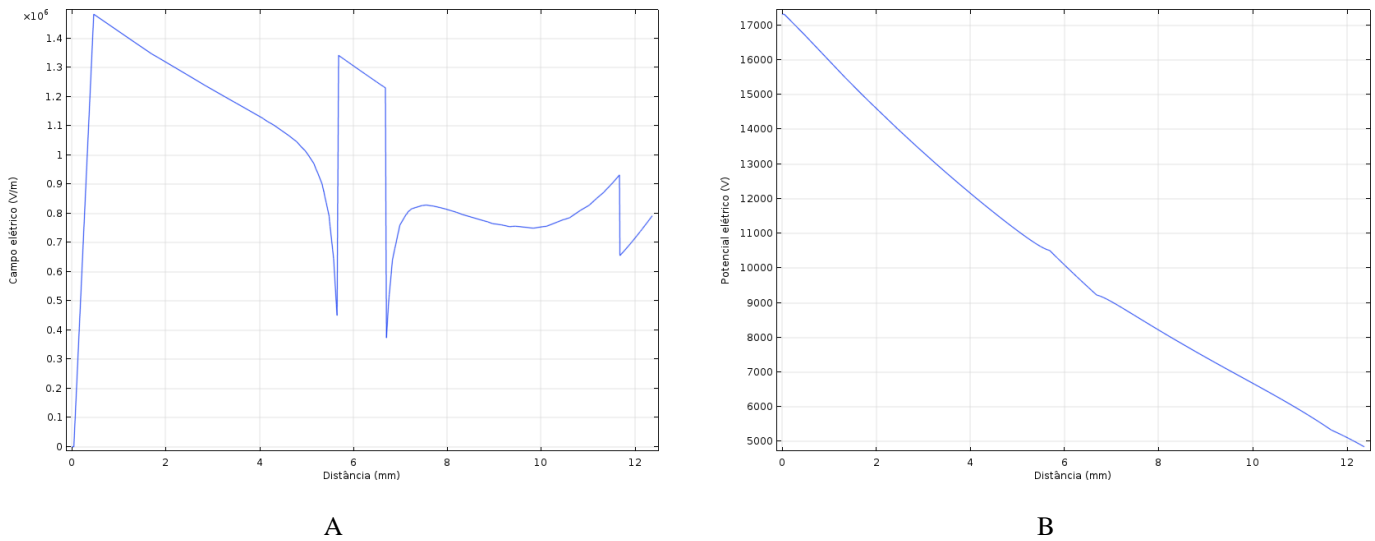


Figura 4.121-Estudo no percurso entre a fonte e R5 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>6</sub>*

No percurso do condutor de AT à sexta resistência, o campo elétrico que incide na bolha é 1,43 MV/m, com uma d.d.p. de 7375 V. O campo elétrico na fronteira da bolha volta a subir perto de 0,9 MV/m. Na resistência regista-se um campo elétrico de 0,97 MV/m, com uma d.d.p. de 13430 V. Os dados mencionados encontram-se na Figura 4.122.

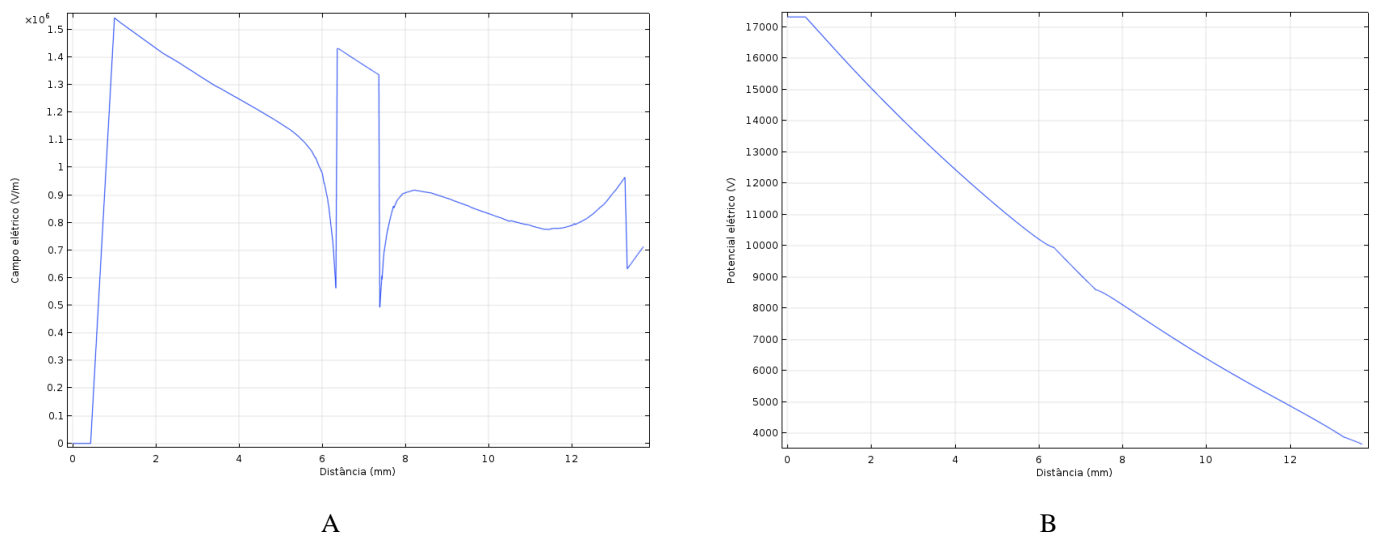
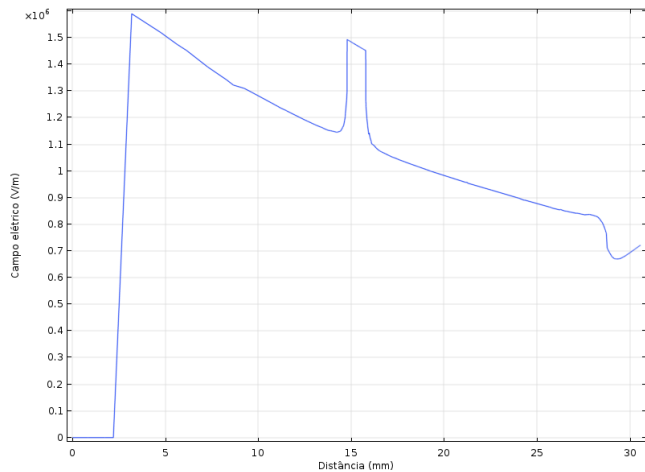


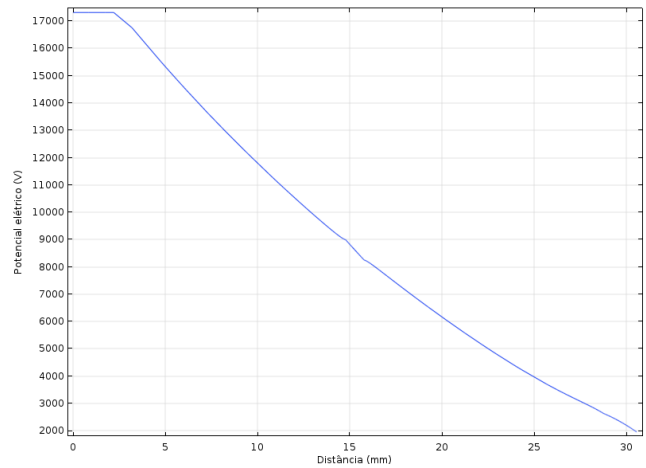
Figura 4.122-Estudo no percurso entre a fonte e R6 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>7</sub>*

No percurso entre o condutor e a penúltima resistência o campo elétrico da bolha de ar volta a subir para uma intensidade de 1,49 MV/m, com uma d.d.p. de 8325 V. O campo elétrico na penúltima resistência é 0,77 MV/m, com uma d.d.p. de 14667 V. O facto da distância da linha 3D de análise aumentar faz com que o campo elétrico nesta componente diminua, nos cenários com e sem falhas. Os valores referidos estão representados na Figura 4.123.



A

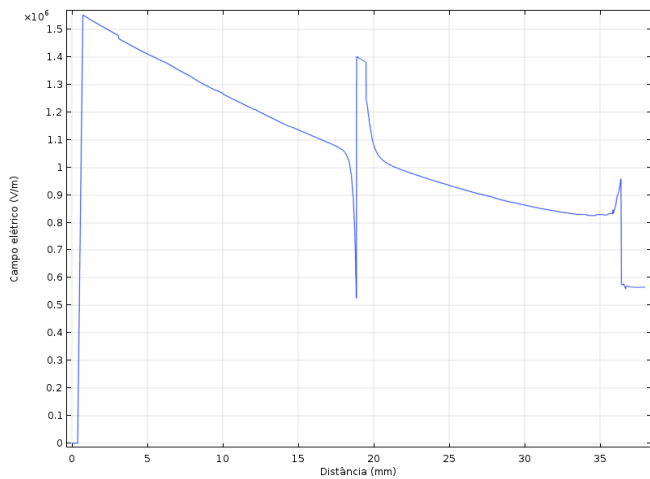


B

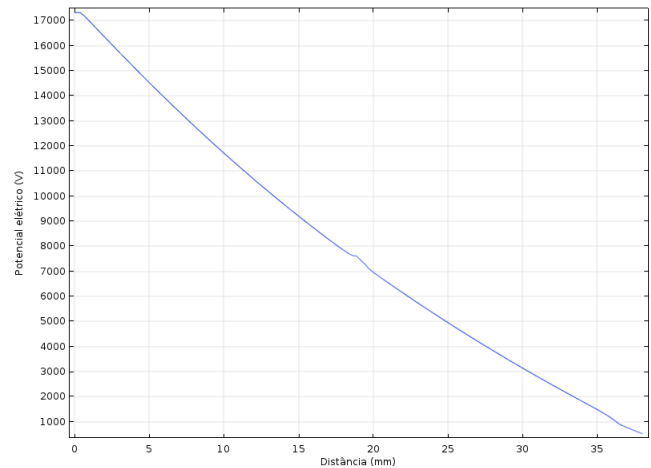
Figura 4.123-Estudo no percurso entre a fonte e R7 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_8$

Do estudo feito no percurso entre o condutor de AT e a última resistência, observa-se na Figura 4.124 que a bolha de ar está sujeita a um campo elétrico de 1,40 MV/m, com uma d.d.p. de 9710 V. Em relação à resistência, o seu campo elétrico na fronteira com a resina tem a intensidade de 0,95 MV/m, com uma d.d.p. de 16392 V. De referir que nesta resistência face à anterior o campo elétrico subiu ligeiramente, devido à maior queda de potencial e à sua distância ao condutor não ter aumentado muito, face à distância que R7 está do condutor de AT.



A



B

Figura 4.124-Estudo no percurso entre a fonte e R8 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

#### 4.4 Comparação das duas primeiras cadeias de oito resistências

Com o objetivo de comparar as duas cadeias resistivas atrás estudadas, representa-se em tabela os dados de cada tipologia do isolador, com posterior análise nos regimes de funcionamento normal e anomalias.

Tabela 4.1-Resultados da 1ª cadeia resistiva no cenário sem anomalias

1ª Cadeia Resistiva					
Materiais	Campo elétrico (MV/m)		d.d.p. (V)		Relação $\frac{E_{\alpha=20^\circ}}{E_{\alpha=300^\circ}}$ (%)
	Caso A: $\alpha=20^\circ$	Caso B: $\alpha=300^\circ$	$\alpha=20^\circ$	$\alpha=300^\circ$	
Ângulo de curvatura da extremidade da malha ( $\alpha$ )					
Aro da malha	6,65	1,99	17320	17320	335,01
R1	0,79	0,81	0	0	96,77
R2	0,67	0,69	3975	4100	96,25
R3	0,93	0,93	5902	6055	99,95
R4	1,11	1,13	7990	8045	98,30
R5	1,11	1,11	8877	8887	100,45
R6	1,12	1,12	10683	10688	99,98
R7	1,33	1,51	12080	12809	87,91
R8	4,34	4,34	15155	15155	100,02
Média $E_{resistencias}$ ( $\bar{X}$ )	1,43	1,46	-	-	-

Pela análise da Tabela 4.1 observa-se que o campo elétrico, junto do aro da malha, na situação em que este é reduzido, é mais do triplo do registado com o aro enrolado. Relativamente ao rácio do campo elétrico incidente nas resistências, na última coluna observa-se que a grandeza tem valores equiparados nos dois casos. Em algumas resistências do caso A o campo elétrico é no geral até 5% menor que no caso B, exceção registada num caso específico que é 13% menor. No computo geral a média do campo elétrico a que as resistências no interior do isolador estão sujeitas é similar nos dois casos, sendo um pouco menor no caso A.

Tabela 4.2-Resultados da 2ª cadeia resistiva no cenário sem anomalias

2ª Cadeia Resistiva					
Materiais	Campo elétrico  E  (MV/m)		d.d.p. (V)		Relação $\frac{E_{\alpha=20^\circ}}{E_{\alpha=300^\circ}}$ (%)
	Caso A: $\alpha=20^\circ$	Caso B: $\alpha=300^\circ$	$\alpha=20^\circ$	$\alpha=300^\circ$	
Aro da Malha	6,06	1,93	17320	17320	314,40
R1	0,53	0,58	0	0	92,01
R2	0,48	0,49	3565	3661	97,55
R3	0,64	0,67	6233	6420	94,78
R4	0,93	0,92	9890	9940	100,81
R5	0,93	0,93	11980	11986	100,21
R6	0,97	0,96	13432	13430	100,10
R7	0,77	0,76	14670	14686	101,19
R8	0,98	0,95	16398	16385	102,63
Média $E_{resistencias}$ ( $\overline{X_R}$ )	0,78	0,78	-	-	-

Através da análise feita aos resultados da segunda cadeia resistiva sem anomalias, expostos na Tabela 4.2, observa-se novamente que no caso A o campo elétrico incidente no aro da malha é mais do triplo do caso B. Na observação da última coluna infere-se que os campos elétricos nas resistências nos dois casos são semelhantes, no entanto devido à geometria da malha, esta análise resume que a maioria destas componentes no caso B, apresentam campos elétricos pouco menores que no caso A.

Tabela 4.3-Resultados da 1ª cadeia resistiva no cenário com anomalias

1ª Cadeia Resistiva					
Materiais	Campo elétrico  (MV/m)		d.d.p. (V)		Relação $\frac{E_{\alpha=20^\circ}}{E_{\alpha=300^\circ}}$ (%)
	Caso A: $\alpha=20^\circ$	Caso B: $\alpha=300^\circ$	$\alpha=20^\circ$	$\alpha=300^\circ$	
Ângulo de curvatura da extremidade da malha ( $\alpha$ )					
Aro da malha	9,63	1,97	17305	17235	488,98
Bolha de ar no aro da malha	3,90	1,81	17086	17320	214,99
2ª bolha de ar na malha	1,19	1,15	16920	16979	103,13
Bolha de ar no condutor	1,61	1,66	970	1080	96,87
R1	0,78	0,82	0	0	95,95
Bolha de ar associada a R1	0,59	0,62	174	181	96,13
R2	0,67	0,69	3980	4107	96,24
Bolha de ar associada a R2	0,92	0,94	1918	1977	97,29
R3	0,90	0,93	5932	6057	97,41
Bolha de ar associada a R3	1,26	1,28	3010	3074	98,29
R4	1,11	1,11	7993	8042	99,73
Bolha de ar associada a R4	1,56	1,57	4010	4040	99,62
R5	1,10	1,10	8893	8882	99,91
Bolha de ar associada a R5	1,78	1,78	4397	4405	99,66
R6	1,12	1,12	10666	10673	100,00
Bolha de ar associada a R6	1,89	1,89	5633	5636	99,98
R7	1,33	1,32	12084	12127	100,49
Bolha de ar associada a R7	2,03	2,03	6532	6533	99,75
R8	4,33	4,33	15155	15155	100,02
Bolha de ar associada a R8	2,12	2,16	5595	7720	98,38

Média nas bolhas ( $\overline{X_B}$ )	1,52	1,53	-	-	-
Média $E_{resistencias}$ ( $\overline{X_R}$ )	1,42	1,43	-	-	-

Com os resultados representados na Tabela 4.3 observa-se que neste cenário, com defeitos junto ao aro da malha reduzido o campo elétrico neste é quase cinco vezes maior que o do aro da malha enrolado. Visto que no geral os valores são semelhantes, para sintetizar melhor os dados utilizou-se a média do campo elétrico nas bolhas de ar associadas às resistências ( $\overline{X_B}$ ) e a média do campo elétrico nas resistências ( $\overline{X_R}$ ). A média do campo elétrico das resistências e bolhas de ar nos dois casos é semelhante, sendo ligeiramente menor no caso A. A diferença de campos elétricos entre os casos A e B é sempre na ordem das dezenas de milhar de volt por metro e a disparidade da d.d.p. no máximo das dezenas de volt, sendo que o resumo desta avaliação pende para o caso A por apresentar valores de média menores.

Tabela 4.4-Resultados 2ª cadeia resistiva cenário com anomalias

2ª Cadeia Resistiva					
Materiais	Campo elétrico  (MV/m)		d.d.p. (V)		Relação $\frac{E_{\alpha=20^\circ}}{E_{\alpha=300^\circ}}$ (%)
	Caso A: $\alpha=20^\circ$	Caso B: $\alpha=300^\circ$	$\alpha=20^\circ$	$\alpha=300^\circ$	
Ângulo de curvatura da extremidade da malha ( $\alpha$ )					
Aro da malha	6,25	1,93	17320	17140	324,68
Bolha de ar no aro da malha	5,41	1,85	17120	17210	281,19
2ª bolha de ar na malha	1,09	1,09	17050	17040	100,37
Bolha de ar no condutor	1,12	1,16	70	70	102,76
R1	0,56	0,58	0	0	96,24
Bolha de ar associada a R1	0,38	0,39	197	204	96,05
R2	0,48	0,49	3565	3662	97,25
Bolha de ar associada a R2	0,67	0,66	1865	1923	97,62
R3	0,63	0,67	6214	6420	94,49
Bolha de ar associada a R3	0,99	1,02	3504	3607	97,25
R4	0,93	0,92	9890	9940	100,60
Bolha de ar associada a R4	1,29	1,30	5255	5308	99,54
R5	0,93	0,93	11982	11986	100,16
Bolha de ar associada a R5	1,34	1,34	6807	6811	100,00
R6	0,97	0,97	13433	13430	100,04
Bolha de ar associada a R6	1,43	1,43	7373	7375	100,07
R7	0,76	0,77	14682	14667	98,76
Bolha de ar associada a R7	1,49	1,49	8324	8325	99,94
R8	0,96	0,96	16380	16392	99,93
Bolha de ar associada a R8	1,40	1,40	9708	9710	99,93

Média $E_{bolhas}$ ( $\bar{X}_B$ )	1,12	1,13	-	-	-
Média $E_{resistencias}$ ( $\bar{X}_R$ )	0,78	0,79	-	-	-

Através da Tabela 4.4 observam-se pequenas diferenças entre os campos elétricos que incidem nos materiais de estudo dos casos A e B, aro da malha mínimo e máximo, respetivamente. No caso A verifica-se maioritariamente as menores intensidades de campo elétrico. No entanto, apesar de nos dois casos ter sido o caso A a ter melhores resultados de campo e potencial elétrico por diferenças ínfimas, o caso que servirá de estudo daqui em diante será o B. Esta escolha é explicada pela extremidade da malha neste caso não estar sujeita a campos tão elevados como no caso A, dessa forma não a coloca em perigo de disrupção, ou alteração das suas propriedades condutoras. A malha tem grande relevo neste sistema, visto que dentro do isolador é o elemento que tem a função fundamental de fazer a ligação ao potencial nulo e serve como tensão de referência. Além de que, a diferença máxima de 5% de campo elétrico do caso A para o caso B é um fator bastante reduzido para sujeitar a malha a um elevado campo elétrico, pois poderia colocar a integridade deste isolador em causa, daí a seleção do caso B.

De referir que desta comparação, a 2ª cadeia resistiva é a que contém menor média de campo elétrico nas resistências (menos de 50% da média da 1ª cadeia resistiva), tal como é nesta que as diferenças de potencial se distribuem de forma mais uniforme em cada resistência, perfazendo quase na totalidade os 17320 V de tensão simples. Esse facto está comprovado no gráfico, das d.d.p das resistências com o seu desvio-padrão face ao valor teórico, representado na Figura 4.125. Neste gráfico a segunda cadeia tem claramente melhores resultados, pois o seu desvio-padrão é menor que na primeira cadeia. Portanto a escolha da tipologia da cadeia resistiva, para um conjunto de dez resistências, resultará da posterior comparação entre a segunda e a terceira cadeia. Finalmente, como o estudo da extremidade da malha mostrou de forma inequívoca que quando o aro está enrolado o campo elétrico é menos intenso, assume-se essa geometria da malha no estudo da última cadeia resistiva e, portanto, não se fará nova análise sobre esse material.

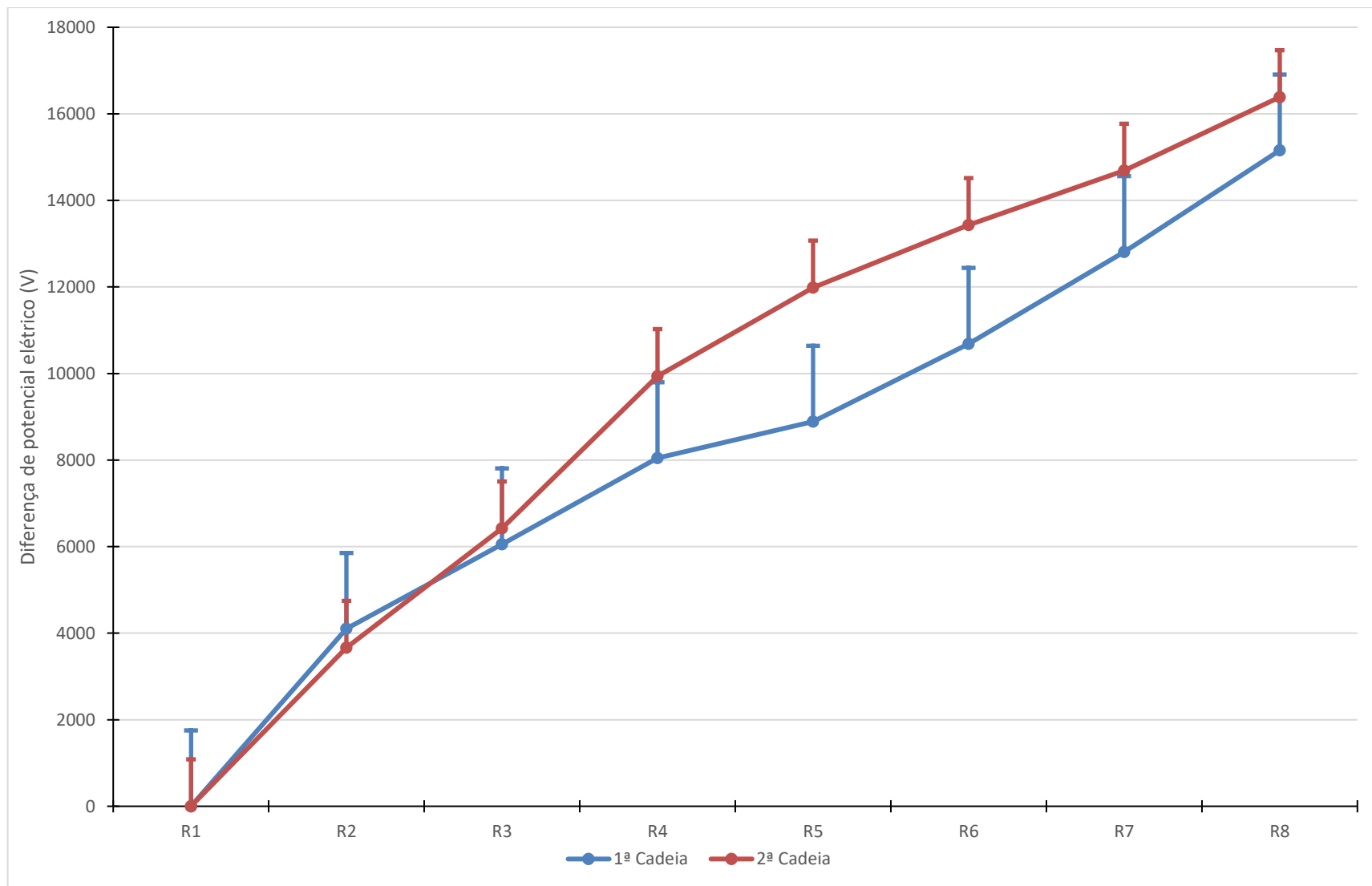


Figura 4.125-Diferença de potencial elétrico entre o condutor de AT e cada resistências da primeira e segunda cadeias resistivas com o seu desvio-padrão.



## 4.5 3ª Cadeia de oito resistências à tensão de funcionamento 36 kV com conector isolante

Neste subcapítulo é analisada a terceira cadeia resistiva, representada no capítulo atrás, em cenários com e sem anomalias

### 4.5.1 Isolador sem anomalias

#### 4.5.1.1 Estudo das resistências

##### ○ Resistência $R_1$

Através do plano 2D que abrange  $R_1$ , presente na Figura 4.126, observa-se que nesta tipologia a primeira resistência está numa posição diferente das outras duas cadeias. Confirma-se novamente que o fio que liga  $R_1$  (ponto a azul claro) à fonte de AT tem um campo elétrico no redor da camada externa mais intenso que a vizinhança, tal como nas capas de estanho da resistência. As linhas equipotenciais nesta cadeia distribuem-se de forma radialmente uniforme, não havendo o problema na disposição geométrica da primeira resistência como antes.

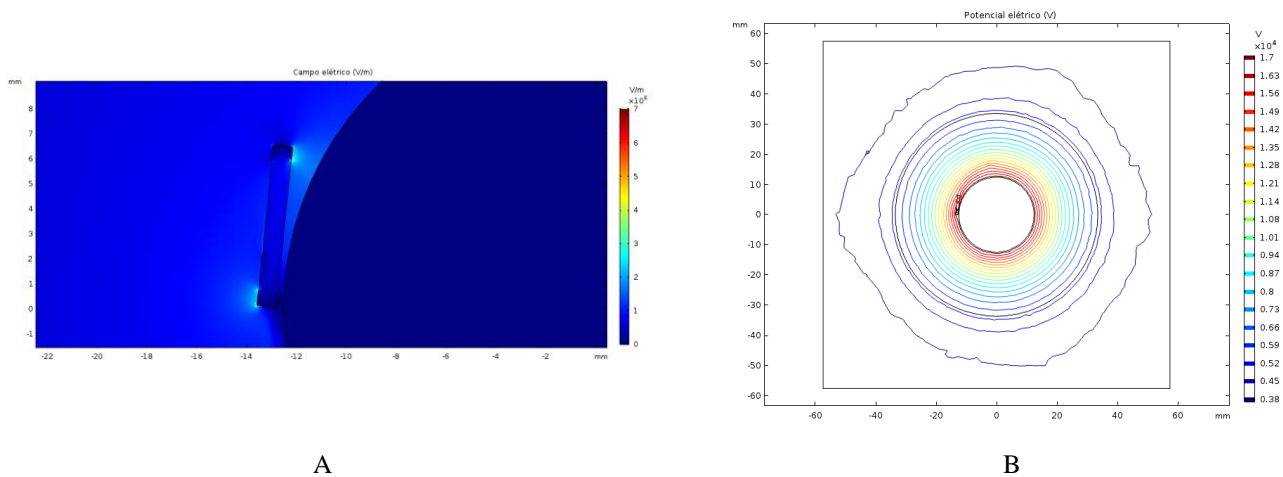


Figura 4.126-Estudo num plano 2D que intersecta a fonte e  $R_1$ . A – Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

No caminho representado na Figura 4.127 o campo elétrico, que incide na primeira resistência tem uma intensidade de 0,47 MV/m, com uma d.d.p nula. Os dados mencionados são verificados pela Figura 4.128.

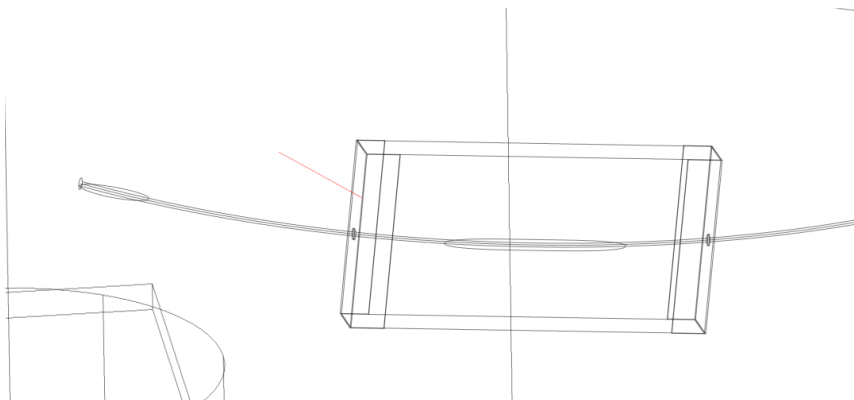
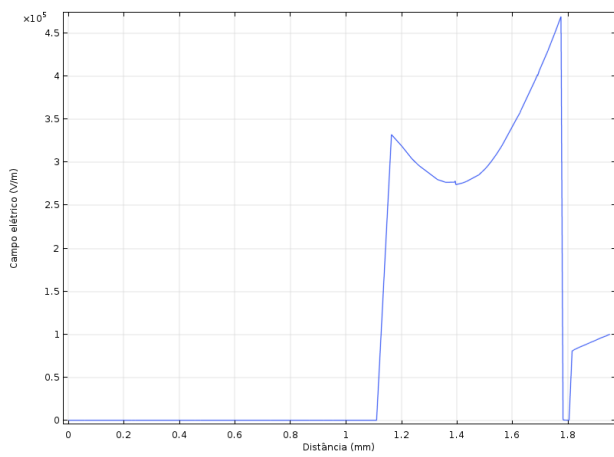
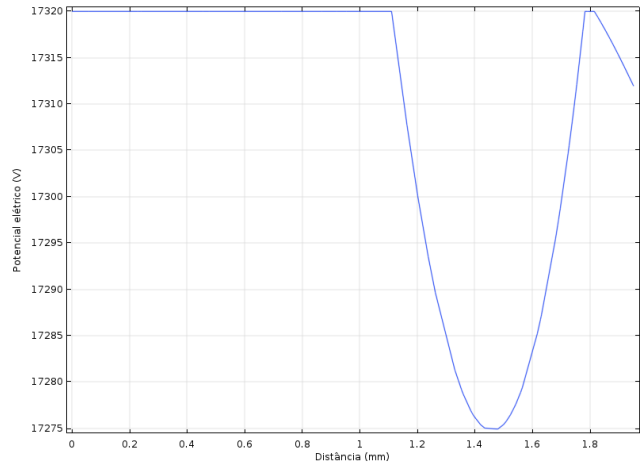


Figura 4.127-Linha de estudo entre a fonte e  $R_1$ .



A



B

Figura 4.128-Estudo no percurso entre a fonte e R1. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_2$

Através do percurso representado na Figura 4.129 observa-se que a segunda resistência está sujeita a um campo elétrico de 0,98 MV/m, com uma d.d.p. de 3288 V. Os dados referidos são confirmados na Figura 4.130.

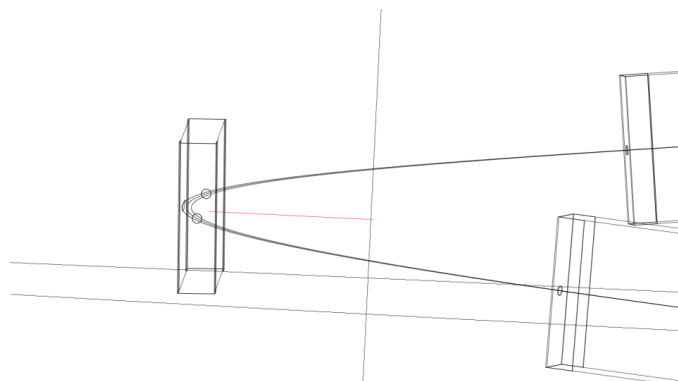
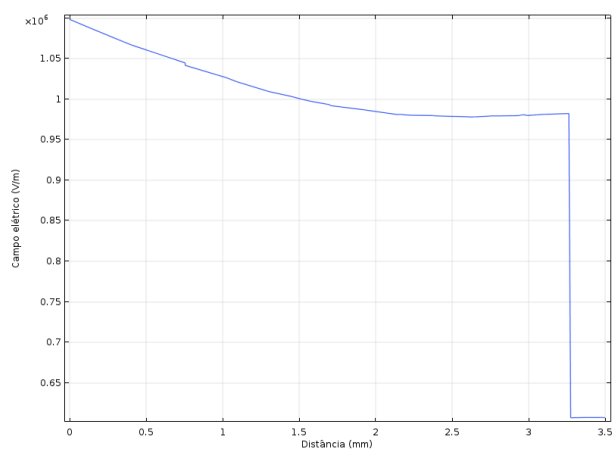
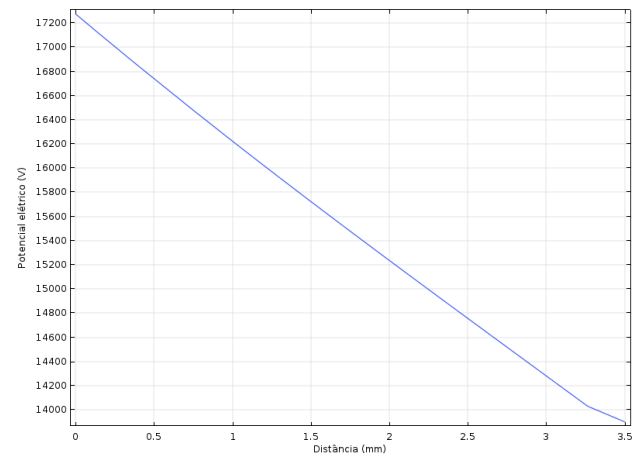


Figura 4.129-Linha de estudo entre a fonte e R2.



A



B

Figura 4.130-Estudo no percurso entre a fonte e R2. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência  $R_3$*

Através do estudo do percurso, representado na Figura 4.131, observa-se que o campo elétrico em  $R_3$  diminui face à resistência anterior para uma intensidade de 0,93 MV/m, com uma d.d.p de 5466 V. Estes dados estão representados Figura 4.132.

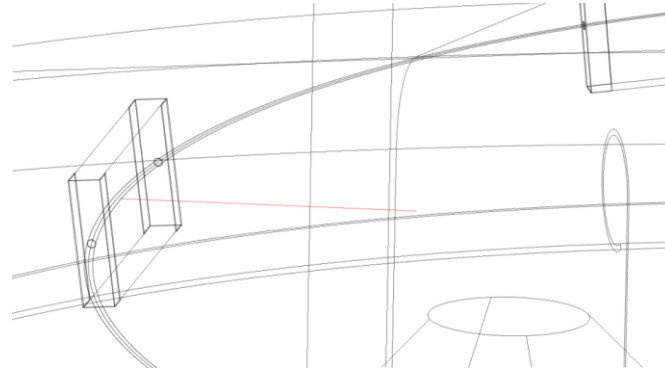


Figura 4.131-Linha de estudo entre a fonte e  $R_3$ .

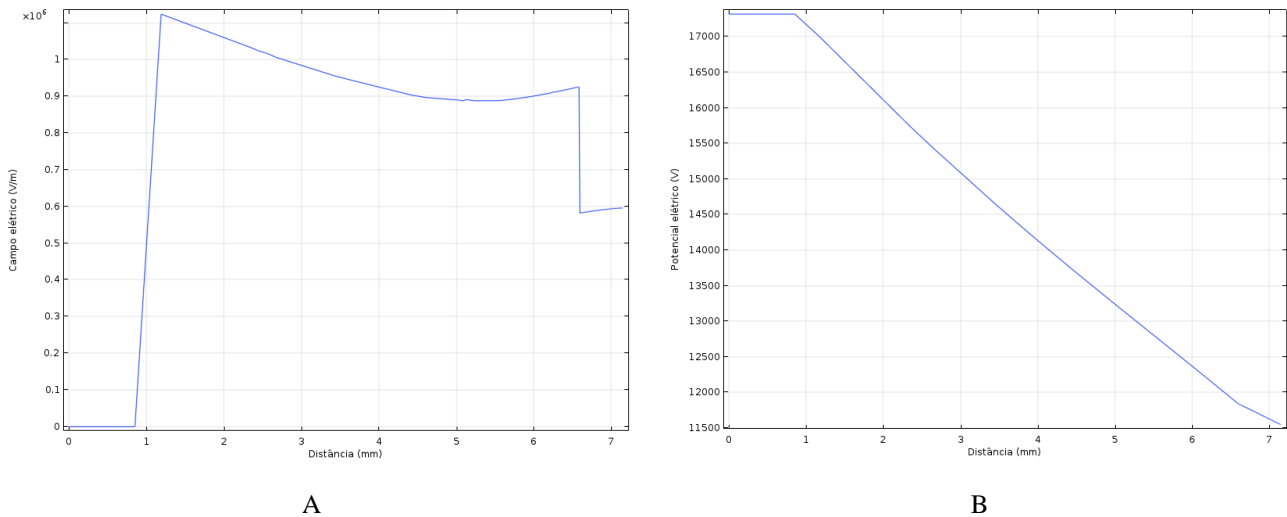


Figura 4.132-Estudo no percurso entre a fonte e  $R_3$ . A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência  $R_4$*

No caminho até à quarta resistência, que está representado na Figura 4.133, o campo elétrico sentido na resistência tem o valor de 0,87 MV/m, com uma d.d.p. de 7763 V, como se pode observar na Figura 4.134.

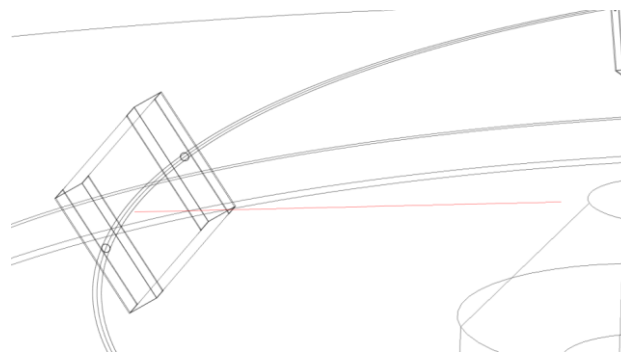
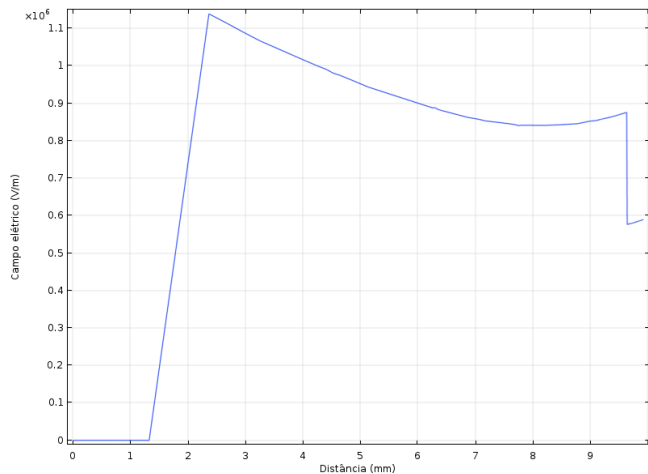
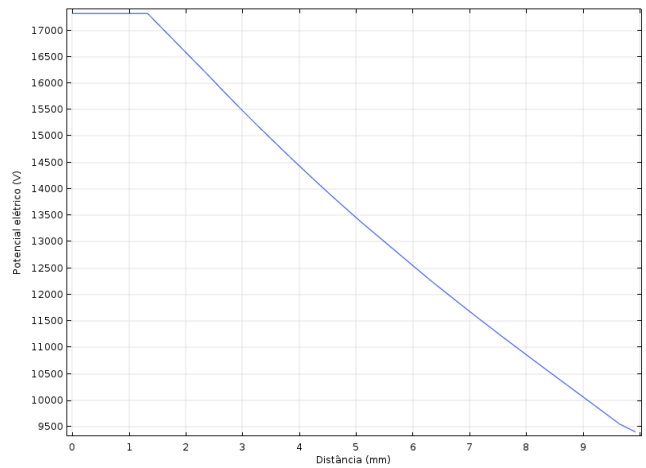


Figura 4.133-Linha de estudo entre a fonte e  $R_4$ .



A



B

Figura 4.134-Estudo no percurso entre a fonte e R4. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_5$

No percurso ilustrado na Figura 4.135, entre o condutor de AT e a quinta resistência o campo elétrico incide nesta com uma intensidade de 0,91 MV/m, com uma d.d.p de 9940 V, como se verifica pela Figura 4.136.

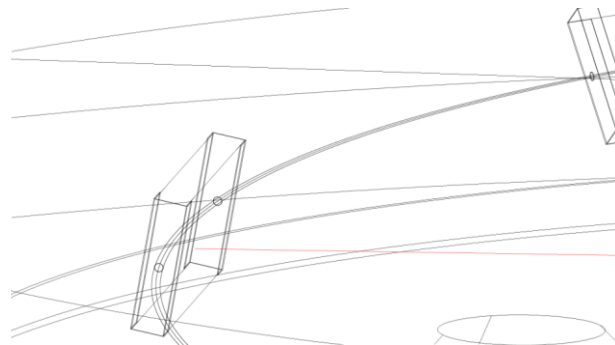
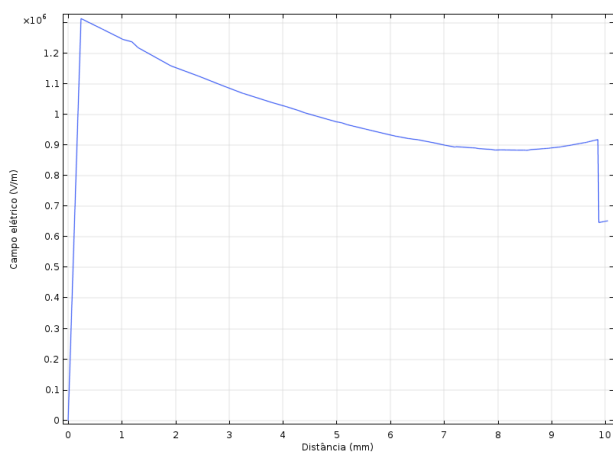
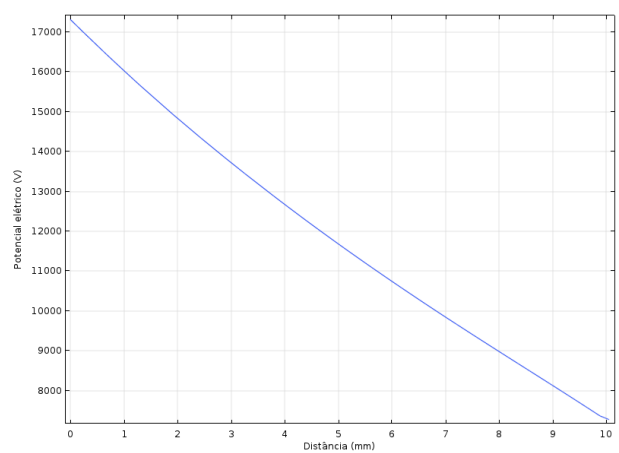


Figura 4.135-Linha de estudo entre a fonte e R5.



A



B

Figura 4.136-Estudo no percurso entre a fonte e R5. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>6</sub>*

Através da linha que representa o percurso entre o condutor de AT e R6 (Figura 4.137), conclui-se pelos gráficos da Figura 4.138 que esta resistência está submetida a um campo elétrico de 0,98 MV/m, com uma d.d.p. de 11885 V.

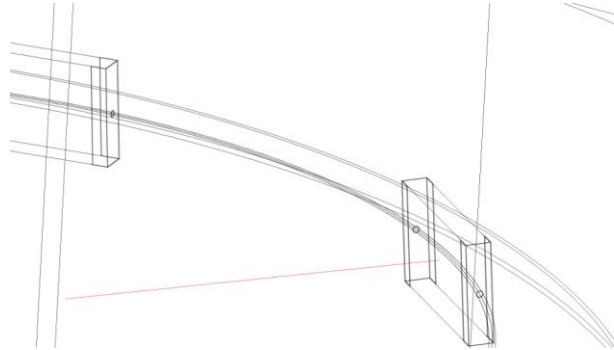
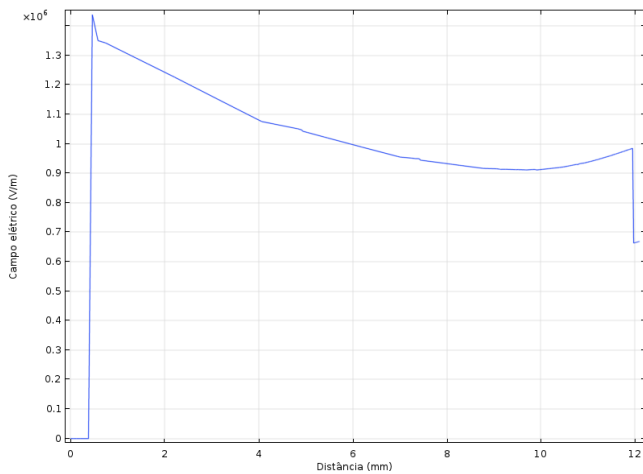
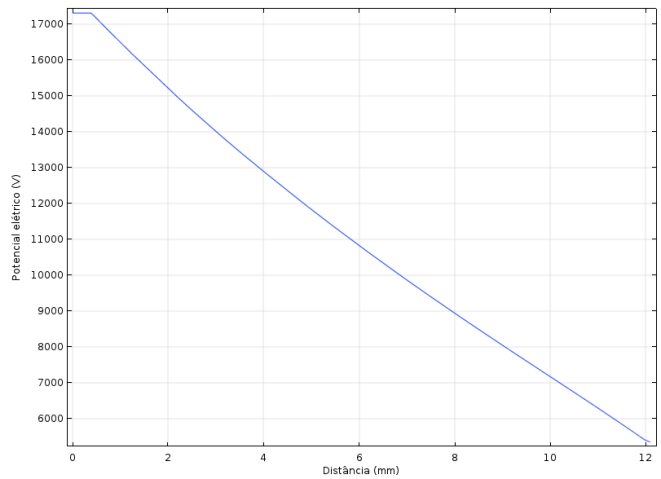


Figura 4.137-Linha de estudo entre a fonte e R6.



A



B

Figura 4.138-Estudo no percurso entre a fonte e R6. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>7</sub>*

Com o auxílio da linha 3D representada na Figura 4.139, conclui-se que sobre R7 incide um campo elétrico de intensidade 1,10 MV/m, com uma d.d.p. de 14040 V. Os valores aqui referidos estão presentes na Figura 4.140.

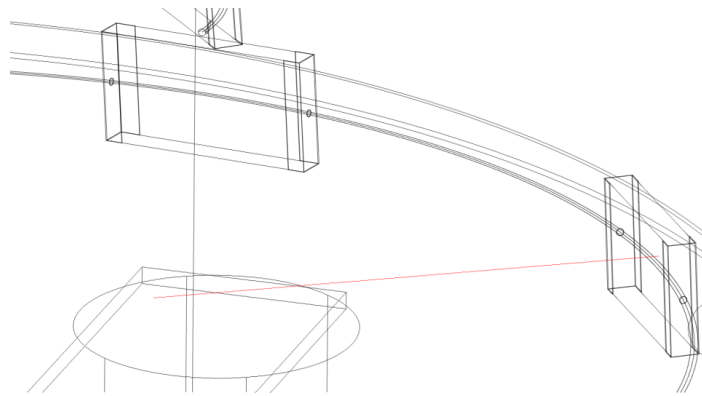
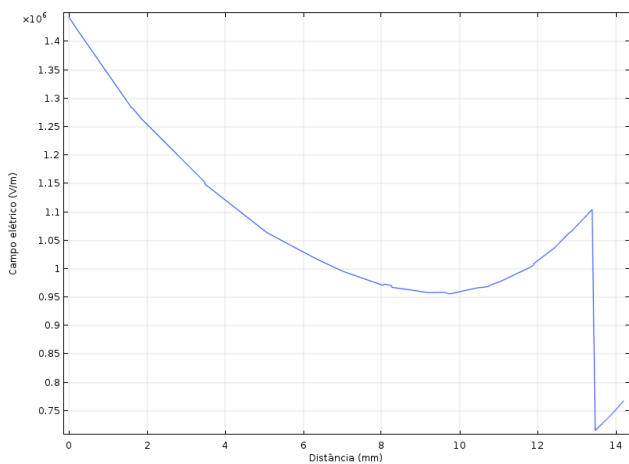
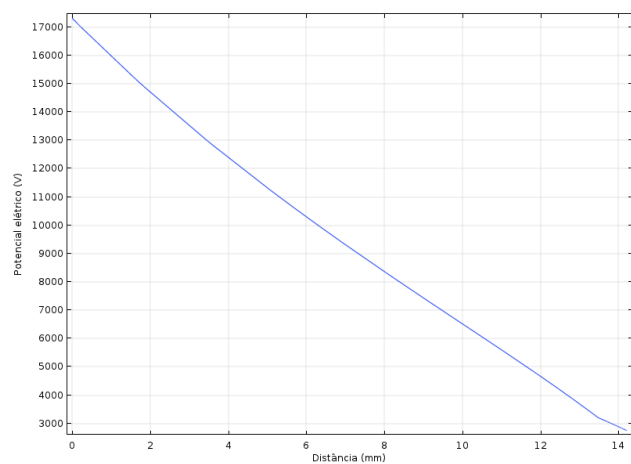


Figura 4.139-Linha de estudo entre a fonte e R7.



A



B

Figura 4.140-Estudo no percurso entre a fonte e R7. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_8$

Por meio da linha representada na Figura 4.141 obtêm-se os gráficos da Figura 4.142, onde é possível verificar que na última resistência o campo elétrico volta a aumentar em relação à resistência anterior, incide com uma intensidade de 1,23 MV/m e com uma d.d.p de 16090 V.

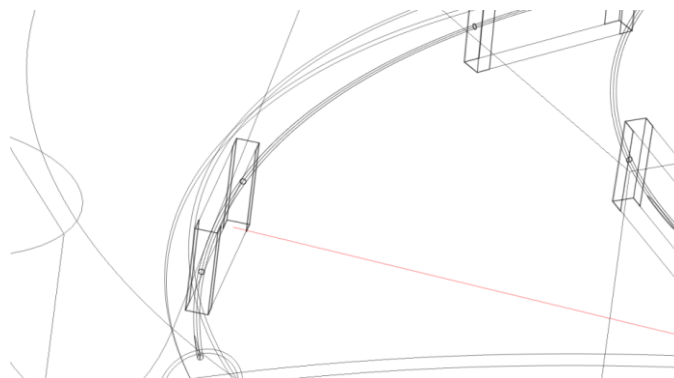
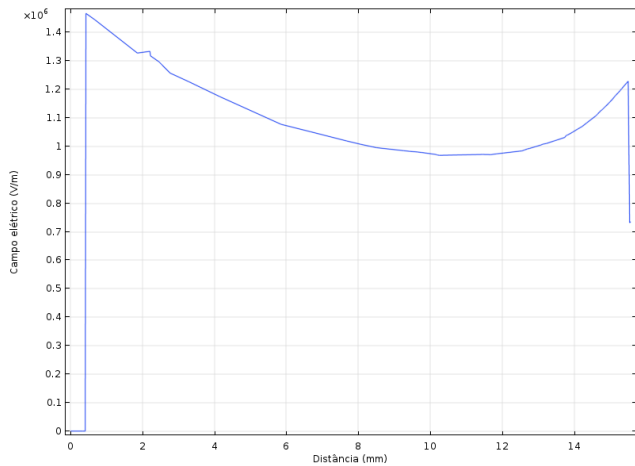
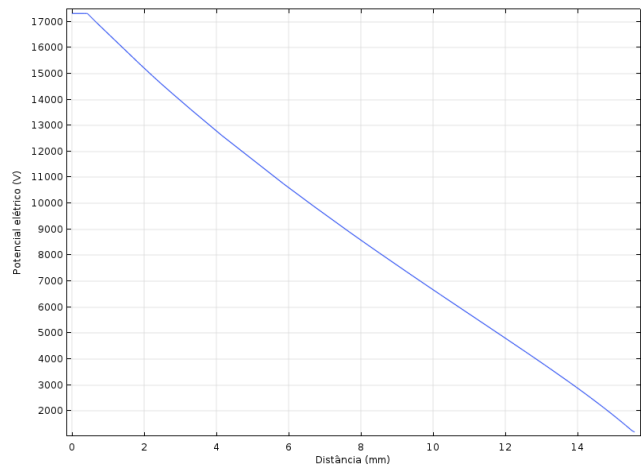


Figura 4.141-Linha de estudo entre a fonte e R8.



A



B

Figura 4.142-Estudo no percurso entre a fonte e R8. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

#### 4.5.2 Isolador com anomalias

Com a introdução de falhas no sistema é possível tirar conclusões do funcionamento no seu pior caso e dessa forma fazer uma avaliação comparativa completa. Neste cenário são novamente utilizadas as mesmas linhas 3D que as representadas no ponto atrás, à exceção da utilizada no estudo do condutor.

##### 4.5.2.1 Estudo do condutor

###### ○ *Bolha de ar no condutor*

Através da linha 3D representada na Figura 4.143, observa-se que na ausência da bolha de ar tangente ao condutor de AT o campo elétrico teve intensidade 1,18 MV/m, com uma d.d.p nula, como se verifica pelos gráficos da Figura 4.144. Com a introdução da bolha de ar o campo elétrico subiu para 1,57 MV/m e a sua d.d.p. para 158 V, pontos que estão representados nos gráficos da Figura 4.145. Finalmente, conclui-se que a presença da bolha junto ao condutor não é problema, porque a norma do campo elétrico é menor que o  $E_d$  do ar, tendo uma d.d.p de 158 V.

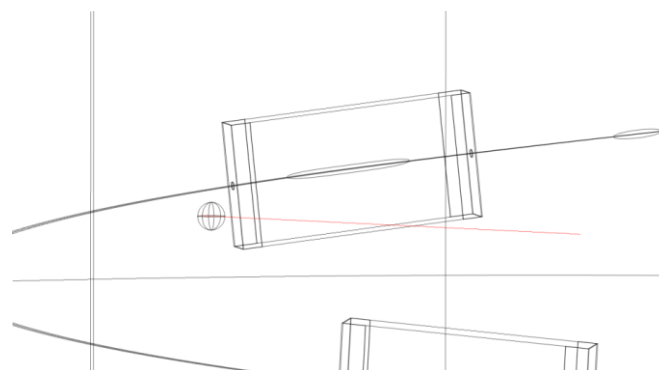
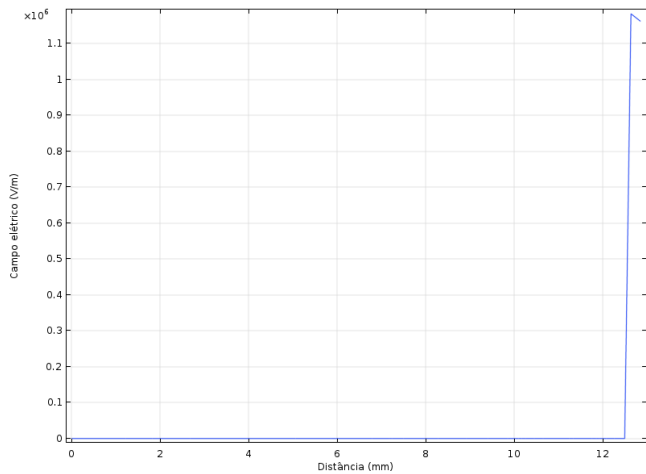
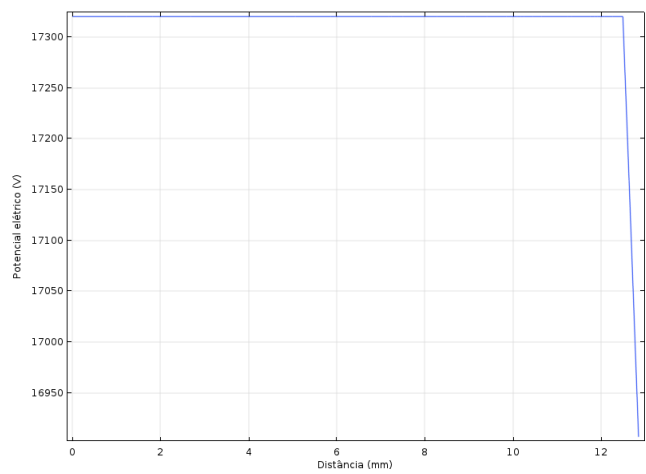


Figura 4.143-Linha de estudo entre o centro do isolador e o condutor de AT com anomalia.

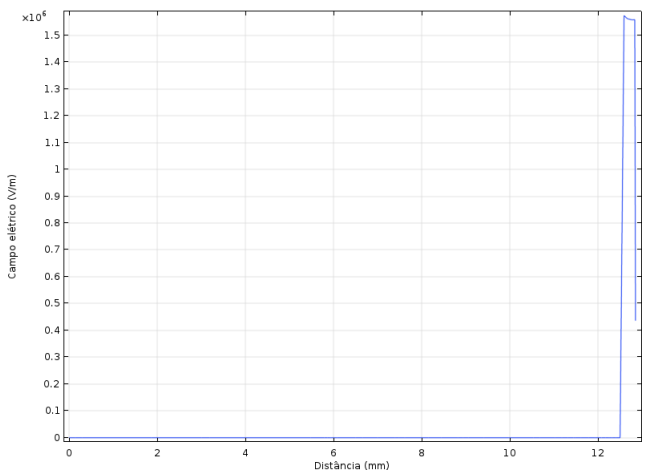


A

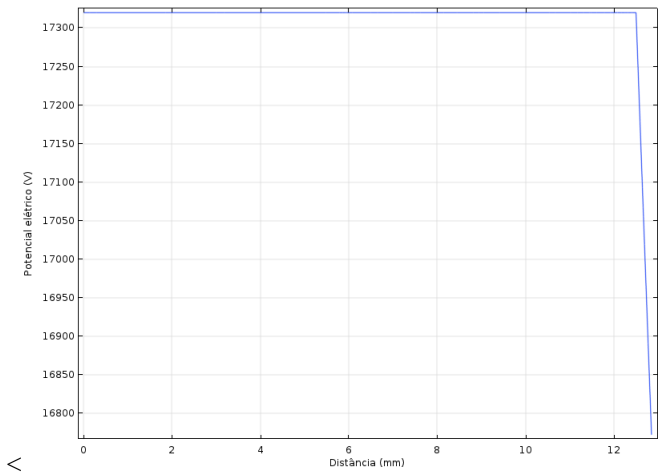


B

Figura 4.144-Estudo das grandezas antes da introdução da segunda anomalia junto ao condutor de AT. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.



A



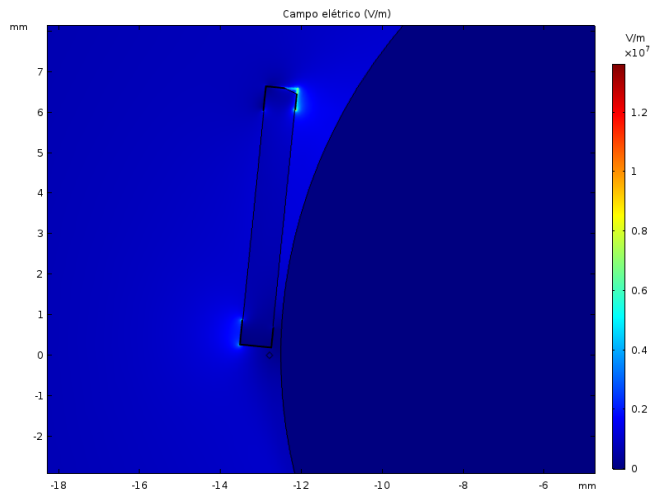
B

Figura 4.145-Presença de anomalia junto ao condutor de AT. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

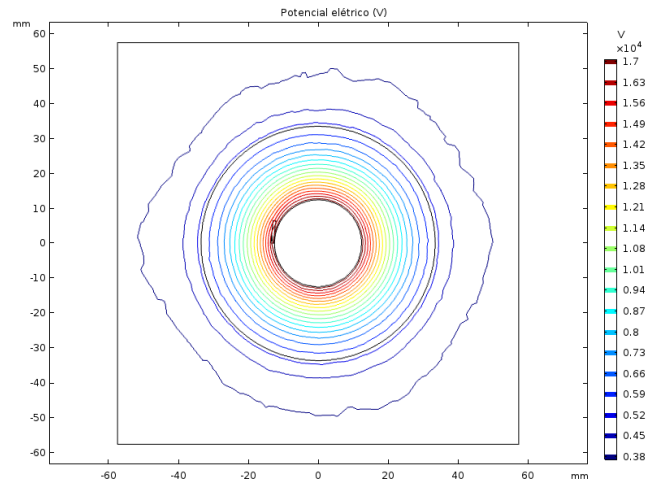
#### 4.5.2.2 Estudo das resistências

##### ○ Resistência $R_1$

Através da observação da Figura 4.146 verifica-se a 2D que a intensidade de campo elétrico na bolha de ar é desprezável, face à registada nos terminais de R1. Relativamente às linhas equipotenciais apresentam uma clara distribuição radial sem interferências visíveis, pois esta cadeia resistiva apresenta uma hélice perfeita. Analisando os gráficos da Figura 4.147 observa-se um campo elétrico, na fronteira da bolha de ar com a resina *epoxy*, de 0,46 MV/m, com uma d.d.p. de 52 V. Na primeira resistência verifica-se um campo elétrico de 0,54 MV/m, com uma d.d.p. nula.

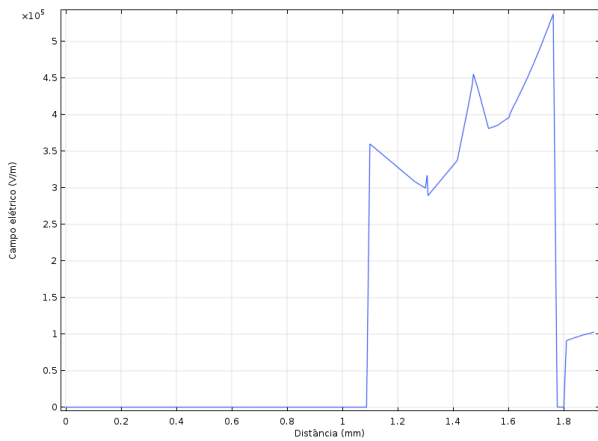


A

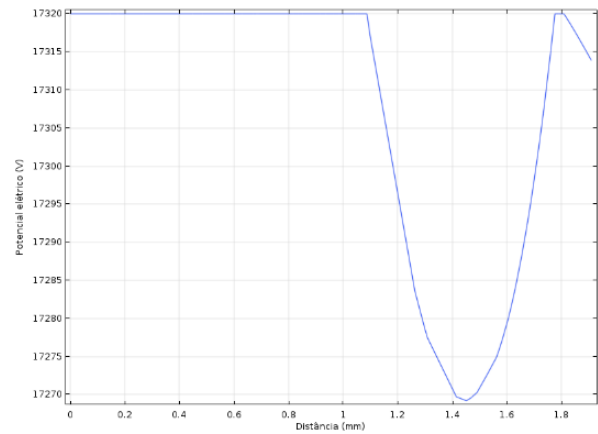


B

Figura 4.146 Estudo num plano 2D que intersecta a fonte e R1 em cenário de anomalia. A – Campo elétrico. B - Potencial elétrico.



A

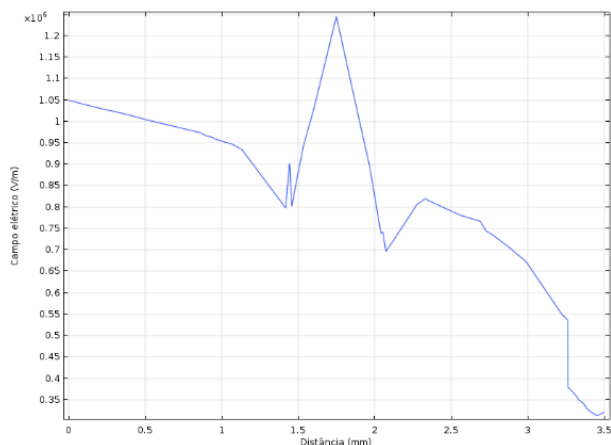


B

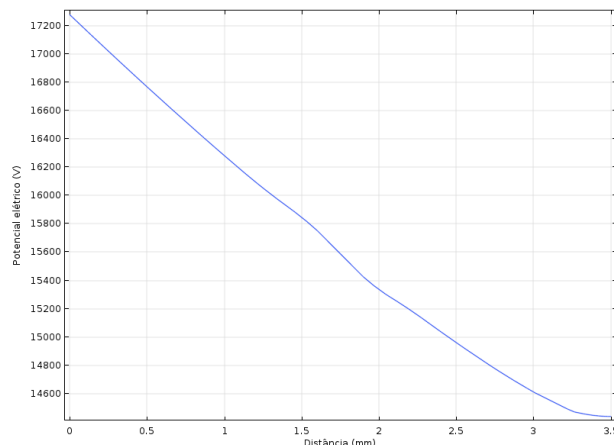
Figura 4.147-Estudo no percurso entre a fonte e R1 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência  $R_2$*

Através da Figura 4.148 infere-se que a bolha de ar a meio do caminho entre o condutor de AT e R2 está sujeita a um campo elétrico de 1,25 MV/m, com uma d.d.p. de 1732 V. Paralelamente na resistência o campo é menos intenso, com um valor de 0,54 MV/m e com uma d.d.p. de 2849 V.



A

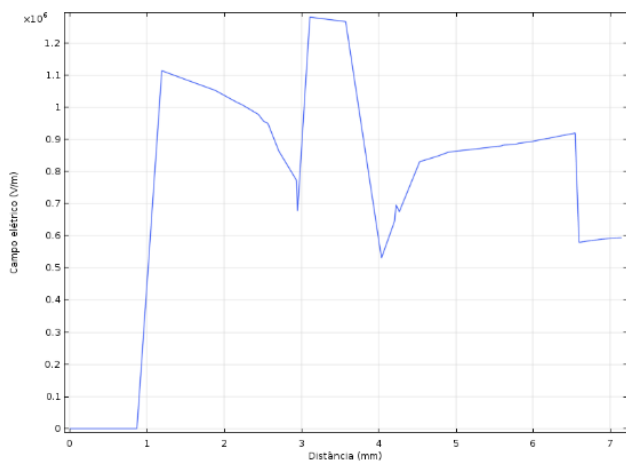


B

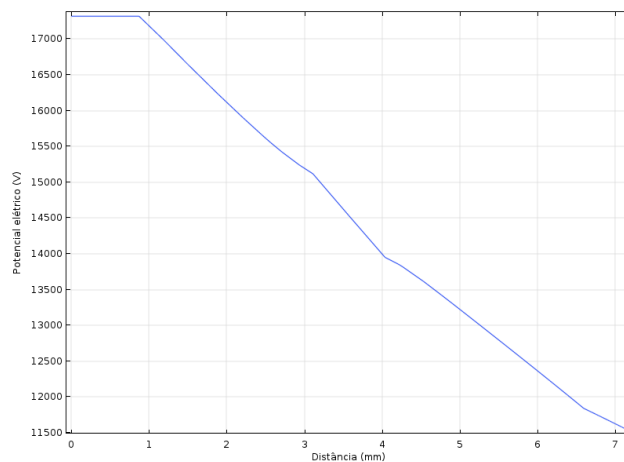
Figura 4.148-Estudo no percurso entre a fonte e R2 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>3</sub>*

A meio do caminho entre a fonte de tensão e a terceira resistência está presente uma bolha de ar, com um campo elétrico de 1,28 MV/m, com uma d.d.p de 2215 V. A resistência R3 é atingida por um campo elétrico de intensidade 0,92 MV/m, com uma d.d.p. de 5435 V. Os valores mencionados encontram-se representados nos gráficos da Figura 4.149.



A

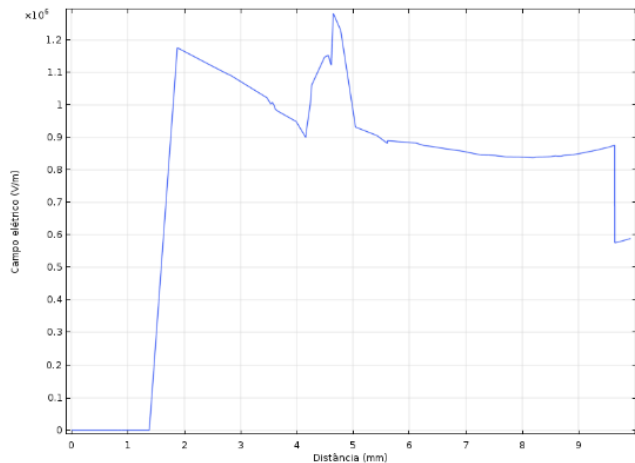


B

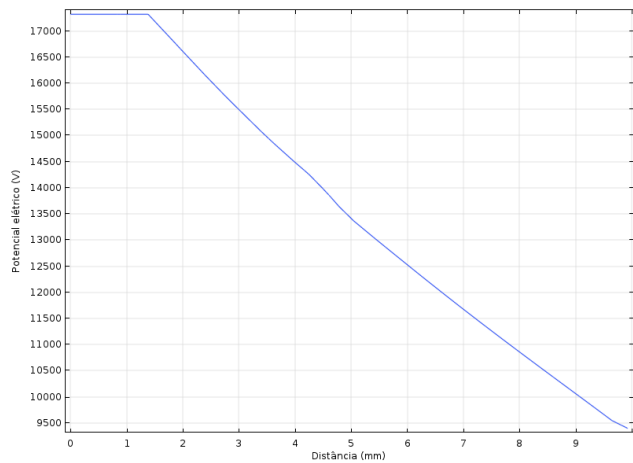
Figura 4.149-Estudo no percurso entre a fonte e R3 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>4</sub>*

Pela Figura 4.150 observa-se que a anomalia entre o condutor de AT e R4 está submetida a um campo elétrico de 1,28 MV/m, com uma d.d.p de 3512 V. Analogamente a quarta resistência está sujeita a um campo elétrico de 0,88 MV/m, a que está associada uma d.d.p. de 7772 V.



A

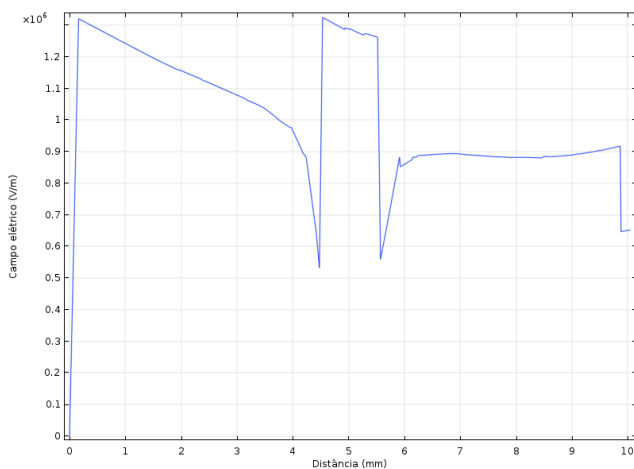


B

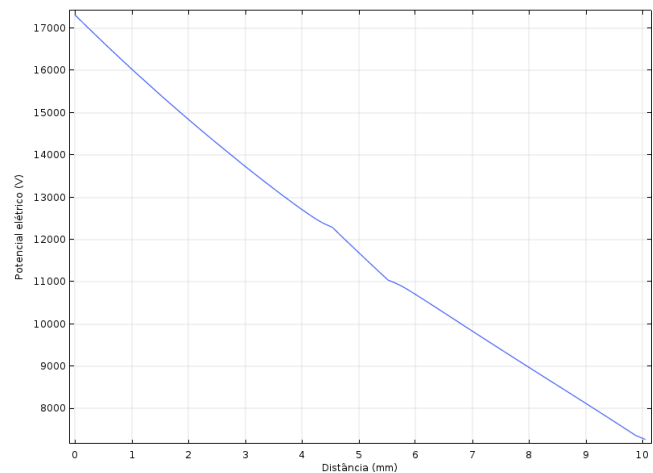
Figura 4.150-Estudo no percurso entre a fonte e R4 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_5$

No percurso entre a fonte de tensão e a quinta resistência, o campo elétrico incidente na bolha de ar é de 1,32 MV/m, com uma d.d.p de 5027 V. A resistência é atingida por um campo elétrico de intensidade 0,92 MV/m, com uma d.d.p de 9943 V. Os valores referidos estão presentes na Figura 4.151.



A



B

Figura 4.151-Estudo no percurso entre a fonte e R5 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_6$

Com base na Figura 4.152, entende-se que a bolha de ar entre o condutor de AT e a sexta resistência sofre o impacto de um campo elétrico de intensidade 1,36 MV/m, com uma d.d.p. de 6358 V. Em relação a R6 observa-se que o seu campo elétrico incidente é 0,99 MV/m, com uma d.d.p de 11900 V.

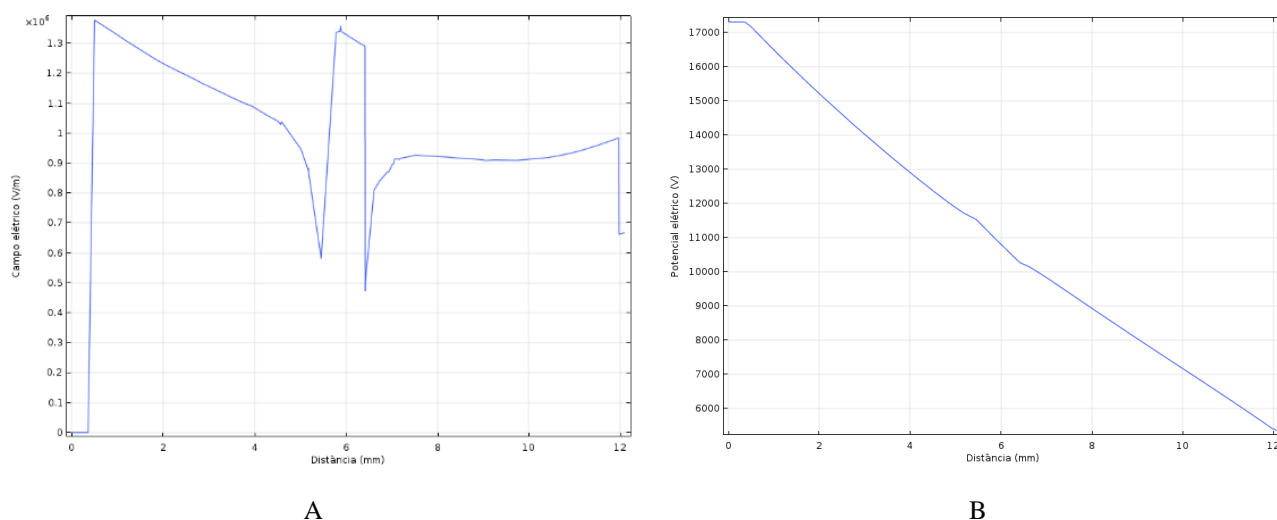


Figura 4.152-Estudo no percurso entre a fonte e R6 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>7</sub>*

A bolha de ar presente entre o condutor a resistência R7 sofre a ação de um campo elétrico com intensidade de 1,30 MV/m, com uma d.d.p. de 8440 V, sendo que na fronteira epoxy-ar subiu perto de 0,5 MV/m. Na resistência incide um campo elétrico de 1,11 MV/m, a que está associada uma d.d.p. de 14077 V. Os valores mencionados encontram-se ilustrados na Figura 4.153.

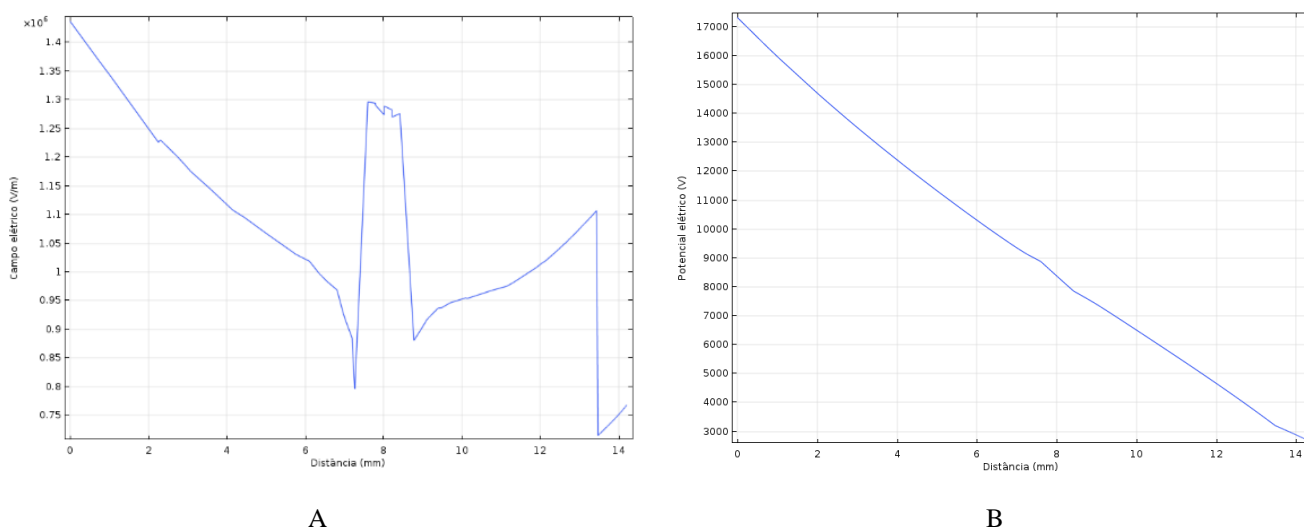
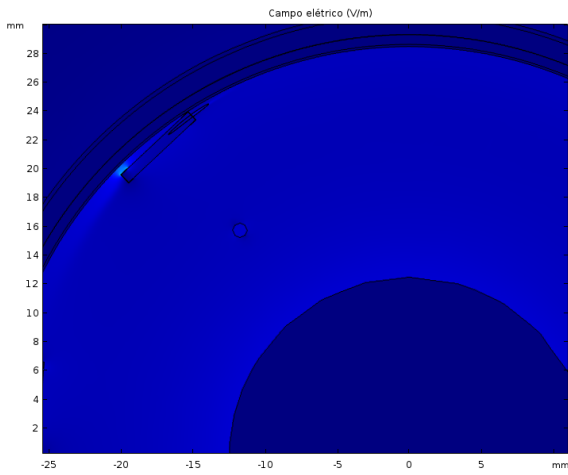


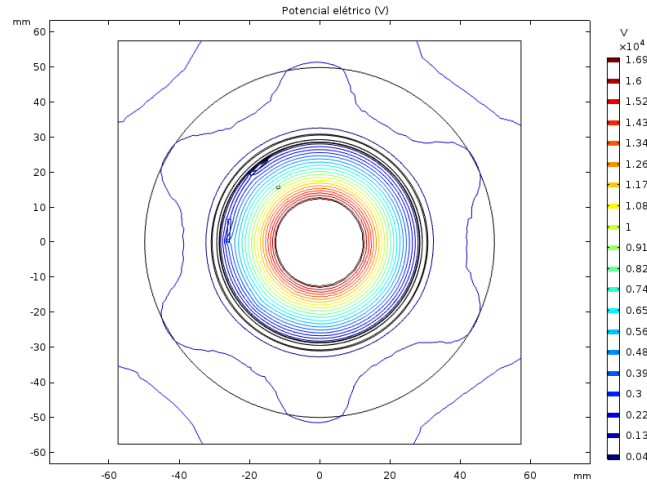
Figura 4.153-Estudo no percurso entre a fonte e R7 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>8</sub>*

Pela Figura 4.154 a 2D observa-se que na última resistência tal como na primeira, o campo elétrico na vizinhança é mais intenso junto aos seus terminais, nomeadamente em redor da capa de estanho. Note-se que a presença da bolha de ar não tem interferência sobre o campo elétrico visto neste plano. Através da Figura 4.155 regista-se que o campo elétrico na bolha de ar é 1,39 MV/m, com uma d.d.p. de 7900 V. Paralelamente na última resistência o campo elétrico incidente é 1,23 MV/m, com uma d.d.p. de 16088 V.

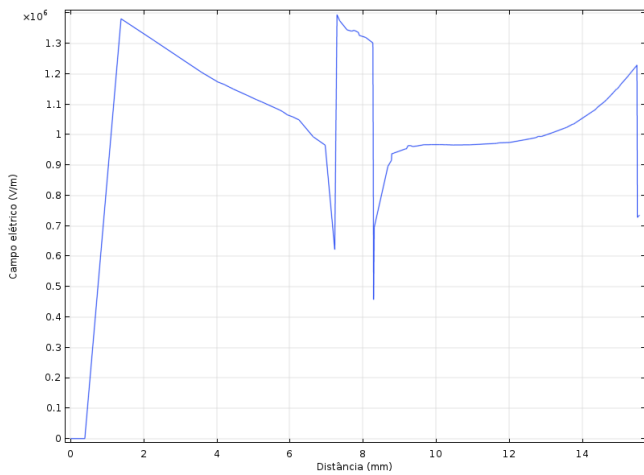


A

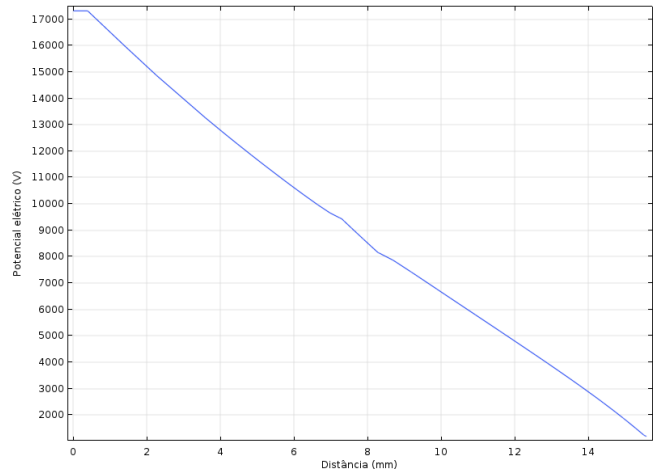


B

Figura 4.154-Estudo num plano 2D que intersecta o condutor de AT e a resistência R8 em cenário de anomalia. A – Campo elétrico. B - Potencial elétrico



A



B

Figura 4.155-Estudo no percurso entre a fonte e R8 com anomalia. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

## 4.6 Escolha da melhor cadeia resistiva

Para a escolha da cadeia resistiva que obtém os resultados mais satisfatórios, representa-se em tabela os resultados das grandezas, descritos e analisados atrás, de modo a fazer-se um elo de comparação. De seguida é representado um gráfico da d.d.p das duas cadeias resistivas em função da resistência de análise, para se entender qual das duas se aproxima do comportamento esperado

Tabela 4.5-Resultados da 2ª e 3ª cadeia resistiva em cenário sem anomalias

Materiais	2ª Cadeia Resistiva		3ª Cadeia Resistiva		Relação $\frac{E_{2ca-deia}}{E_{3ca-deia}}$ (%)
	Campo elétrico  E  (MV/m)	d.d.p. (V)	Campo elétrico  E  (MV/m)	d.d.p. (V)	
Aro da Malha	1,93	17320	1,89	17320	101,98
R1	0,58	0	0,47	0	123,45
R2	0,49	3661	0,98	3288	49,90
R3	0,67	6420	0,93	5466	72,43
R4	0,92	9940	0,87	7763	105,61
R5	0,93	11986	0,91	9940	102,42
R6	0,96	13430	0,98	11885	98,37
R7	0,76	14686	1,10	14040	68,73
R8	0,95	16385	1,23	16090	77,30
Média ( $\bar{X}_R$ )	0,78	-	0,93	-	-

Da análise à Tabela 4.5 verifica-se pela última coluna que os campos elétricos da 2ª cadeia resistiva são na maioria das resistências, menores que os da terceira cadeia. Visto esta não ser uma técnica fiável de fazer uma avaliação ímpar, opta-se por fazer uma média apenas do campo elétrico que incide sobre cada uma das resistências. Pelo valor da média verifica-se que na segunda cadeia o campo elétrico no geral é 0,15 MV/m menor que na terceira cadeia.

Tabela 4.6-Resultados da 2ª e 3ª cadeia resistiva em cenário com anomalias

Materiais	2ª Cadeia Resistiva		3ª Cadeia Resistiva		Relação $\frac{E_{2ca}}{E_{3ca}}$ (%)
	Campo elétrico  (MV/m)	d.d.p. (V)	Campo elétrico  (MV/m)	d.d.p. (V)	
Bolha de ar no condutor	1,16	70	1,57	158	73,85
R1	0,58	0	0,54	0	107,80
Bolha de ar associada a R1	0,39	204	0,46	52	86,26
R2	0,49	3662	0,54	2849	91,87
Bolha de ar associada a R2	0,67	1923	1,25	1732	53,90
R3	0,67	6420	0,92	5435	72,93
Bolha de ar associada a R3	1,02	3607	1,28	2215	79,61
R4	0,92	9940	0,88	7772	105,43
Bolha de ar associada a R4	1,30	5308	1,28	3512	101,48
R5	0,93	11986	0,92	9943	101,55
Bolha de ar associada a R5	1,34	6811	1,32	5027	101,21
R6	0,96	13430	0,99	11900	97,93
Bolha de ar associada a R6	1,43	7375	1,36	6358	105,30
R7	0,77	14667	1,11	14077	69,21
Bolha de ar associada a R7	1,49	8325	1,30	8440	115,24
R8	0,96	16392	1,23	16088	78,01
Bolha de ar associada a R8	1,40	9710	1,39	7900	100,50
Média nas bolhas ( $\overline{X_B}$ )	1,13	-	1,20	-	-
Média $E_{resistencias}$ ( $\overline{X_R}$ )	0,79	-	0,89	-	-

Através da Tabela 4.6 verifica-se as mesmas conclusões retiradas antes: na segunda cadeia a intensidade de campo elétrico na maioria das resistências é bastante menor que na terceira cadeia. O rácio entre os campos elétricos das bolhas de ar e das resistências, da segunda com a terceira cadeia, aponta resultados a favor da segunda. Avaliando individualmente não se infere um desempenho geral da cadeia, portanto faz-se a média do campo elétrico, nas bolhas e nas resistências. Apesar destes resultados não serem desnivelados, a segunda cadeia volta a apresentar resultados mais satisfatórios, sendo que apresenta uma média menor, com diferença de cerca de uma dezena de milhar de V/m, face à terceira cadeia. De referir que nos dois cenários de cada tipologia, os valores das grandezas de estudo se mantêm praticamente inalteráveis. Pelo gráfico da Figura 4.156 observa-se que na terceira cadeia a d.d.p cresce de forma quase linear, porém o desvio-padrão geral (relativamente ao valor teórico) é menor na segunda cadeia do que na terceira, ponto que pesa a favor da escolha da segunda cadeia.

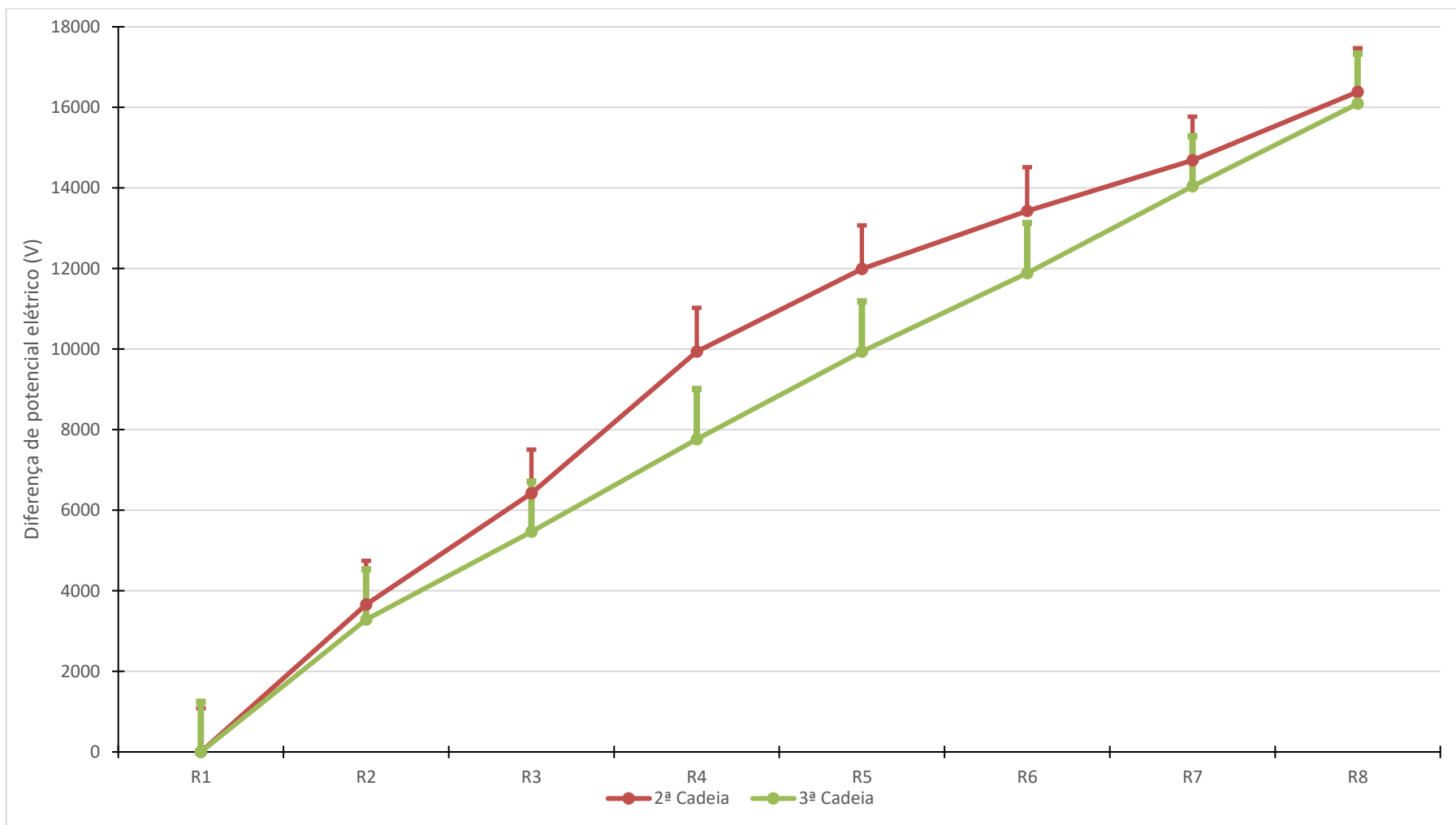


Figura 4.156-Diferença de potencial elétrico entre o condutor de AT e cada resistências da segunda e terceira cadeias resistivas com o seu desvio-padrão.

Portanto, as duas cadeias têm vantagens e desvantagens, sendo cada uma delas selecionável pelos resultados semelhantes. A decisão pela cadeia exequível em conjunto com a Indisol recai sobre a terceira, independentemente de inferior desempenho. Isto foi considerado devido à facilidade da montagem que esta cadeia apresenta no interior da peça, face à segunda cadeia. Segundo o relatório da fábrica, apesar dos melhores resultados do campo elétrico e do menor desfasamento da d.d.p face ao valor teórico, a estrutura da segunda cadeia no interior da travessia é insustentável. Um argumento que apoia a terceira montagem é que a d.d.p entre o condutor de AT e cada uma das resistências cresce de forma mais linear e uniforme que na segunda cadeia.

Feita a análise de todas variáveis presentes neste estudo escolhe-se a terceira cadeia, pelas razões de execução de montagem, como tipologia apontada para realizar os ensaios em fábrica.

## 4.7 Cadeia de dez resistências à tensão de funcionamento de 36 kV com conector isolante

Neste subcapítulo é analisada a terceira cadeia resistiva aplicada no conjunto de dez resistências, apenas no seu funcionamento normal, pois a tipologia de deteção de sinal já foi escolhida, logo não se faz o estudo com bolhas de ar.

### 4.7.1 Isolador sem anomalias

#### 4.7.1.1 Estudo das resistências

##### ○ Resistência $R_1$

Pelo plano 2D da Figura 4.157 a primeira resistência do conjunto tem os mesmos problemas de campo elétrico que os referidos atrás (maior incidência de campo elétrico junto das extremidades retas de raio de curvatura praticamente nulo). As linhas equipotenciais nesta cadeia distribuem-se de forma quase uniforme, apresentando um ligeira deformação na linha de maior potencial, para agrupar a capa de estanho da resistência.

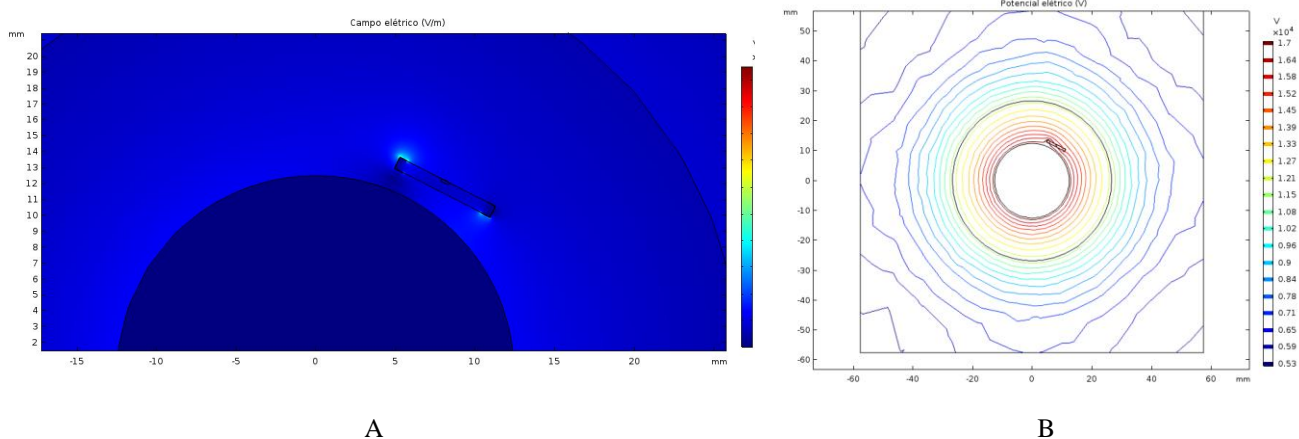


Figura 4.157-Estudo num plano 2D que intersecta a fonte e  $R_1$ . A – Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

No percurso representado na Figura 4.158, o campo elétrico tem uma intensidade na primeira resistência de 0,75 MV/m e uma d.d.p. de 0 V. Os valores referidos estão representados na Figura 4.159.

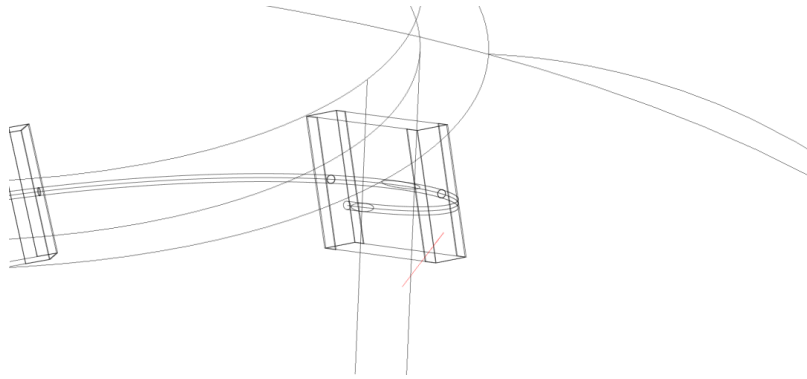
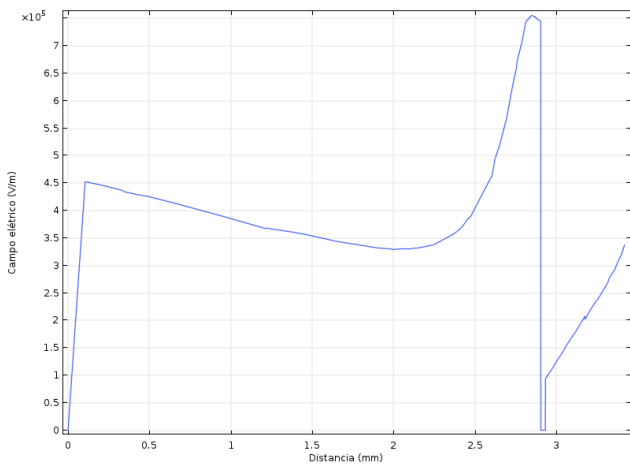
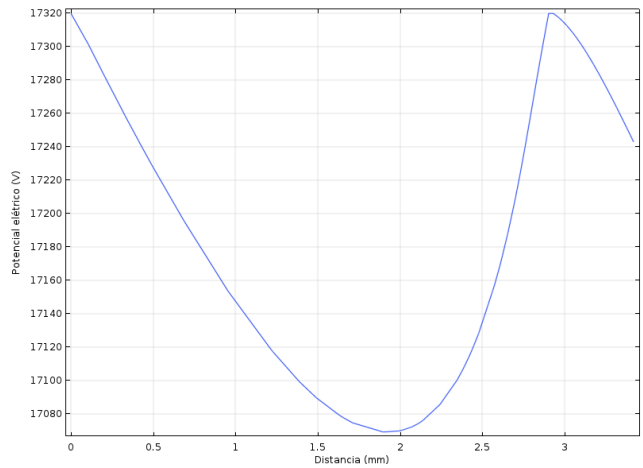


Figura 4.158-Linha de estudo entre a fonte e R1



A



B

Figura 4.159-Estudo no percurso entre a fonte e R1. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>2</sub>*

Através do percurso representado na Figura 4.160 verifica-se em R2 um campo elétrico de 0,60 MV/m, com uma d.d.p. de 2158 V. Os valores referidos estão representados na Figura 4.161.

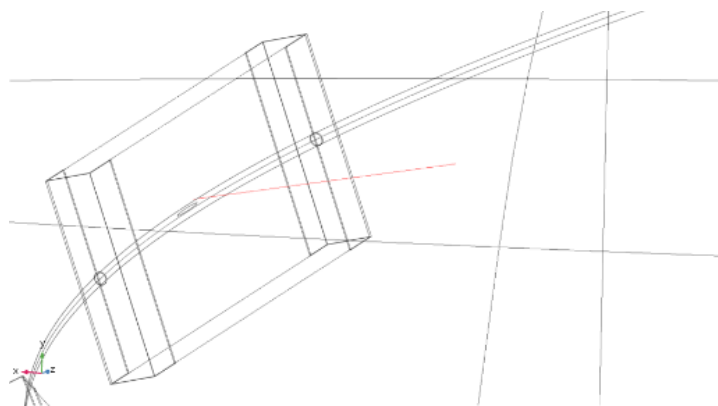
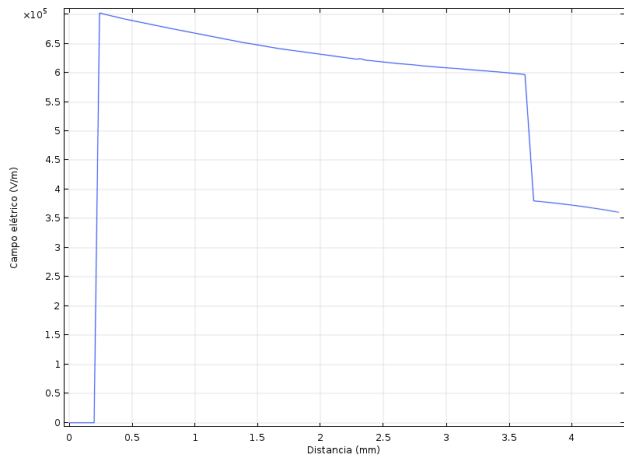
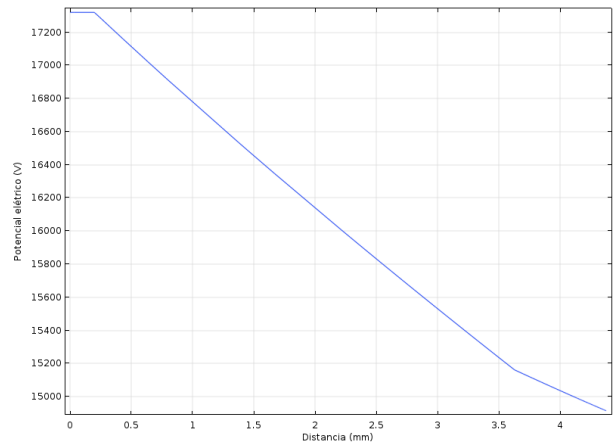


Figura 4.160-Linha de estudo entre a fonte e R2



A



B

Figura 4.161-Estudo no percurso entre a fonte e R2. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_3$

Como se observa pela Figura 4.163, sobre R3 incide um campo elétrico com intensidade de 0,61 MV/m, com uma d.d.p de 3622 V. A linha utilizada para aceder a estas grandezas está representada na Figura 4.162.

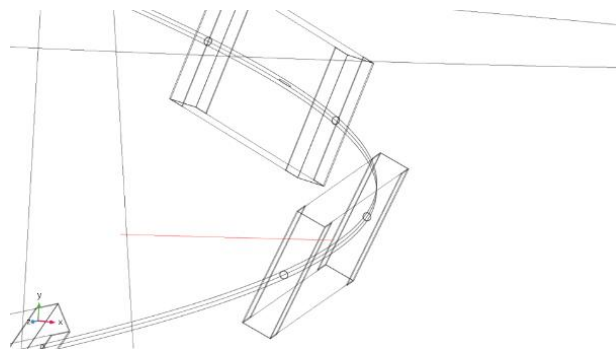
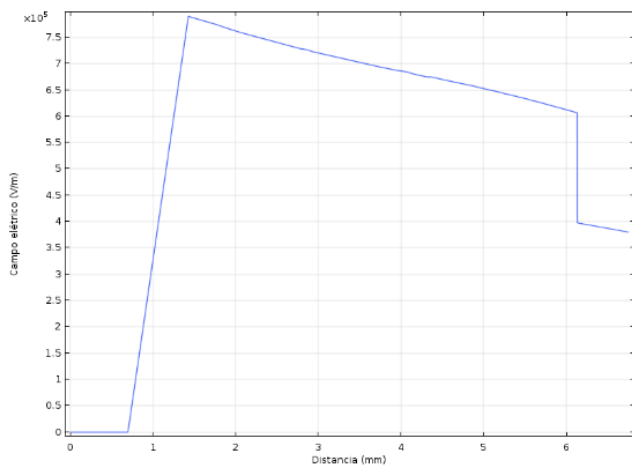
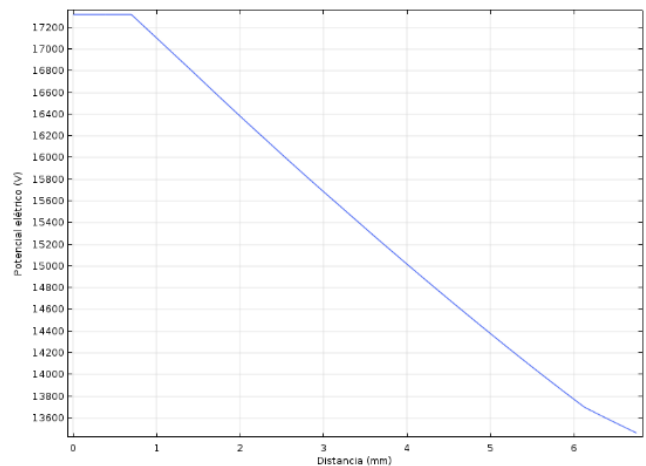


Figura 4.162-Linha de estudo entre a fonte e R3



A



B

Figura 4.163-Estudo no percurso entre a fonte e R3. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico

○ *Resistência R<sub>4</sub>*

Através do percurso presente na Figura 4.164 regista-se uma intensidade de campo elétrico em R4 de 0,64 MV/m e uma d.d.p de 4942 V. Os valores referidos estão representados na Figura 4.165.

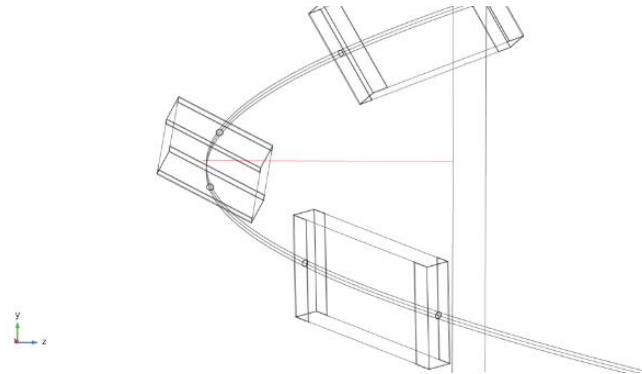


Figura 4.164-Linha de estudo entre a fonte e R4

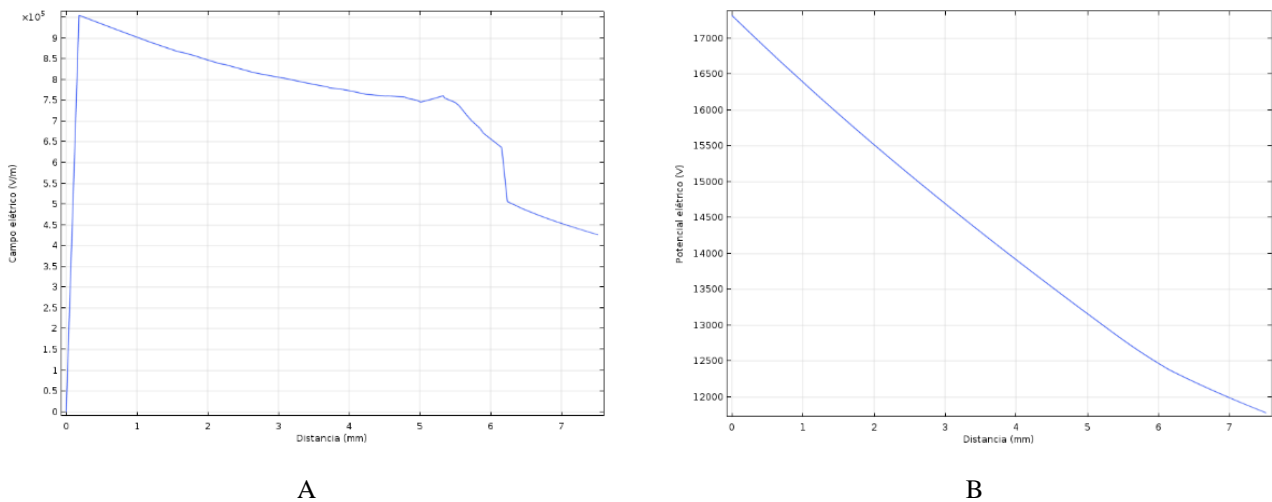


Figura 4.165-Estudo no percurso entre a fonte e R4. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico

○ *Resistência R<sub>5</sub>*

No caminho entre a fonte e a quinta resistência (Figura 4.166) observa-se na Figura 4.167 um campo elétrico em R5 de 0,73 MV/m, com uma d.d.p de 6839 V.

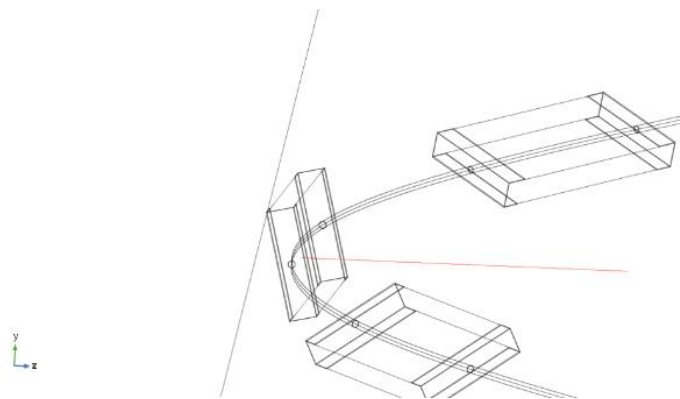
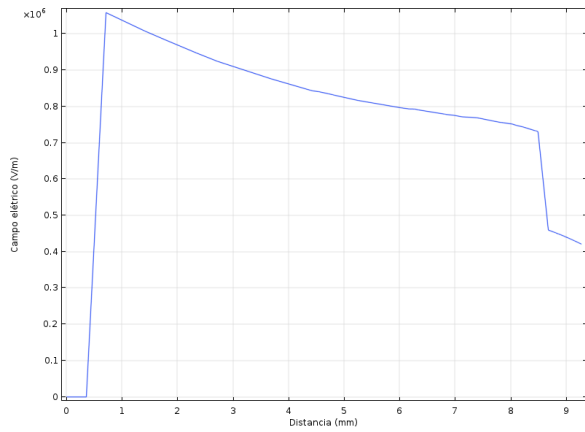
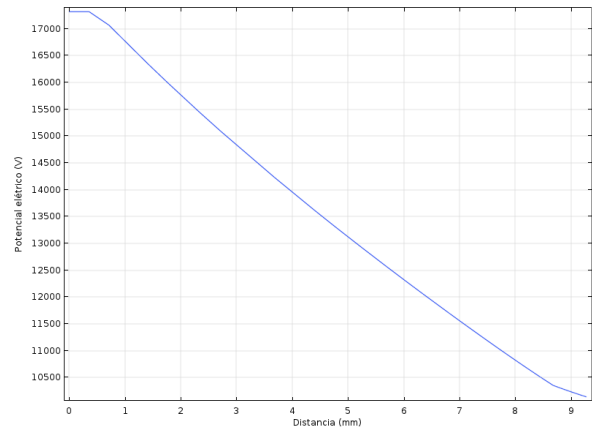


Figura 4.166-Linha de estudo entre a fonte e R5



A



B

Figura 4.167-Estudo no percurso entre a fonte e R5. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico

○ *Resistência R<sub>6</sub>*

Na Figura 4.169 observa-se que o campo elétrico em R6 é de 0,64 MV/m, com uma d.d.p de 8672 V. O caminho utilizado para estudar estas grandezas está exposto na Figura 4.168.

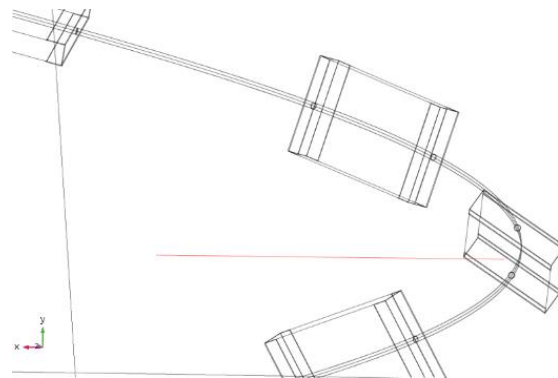
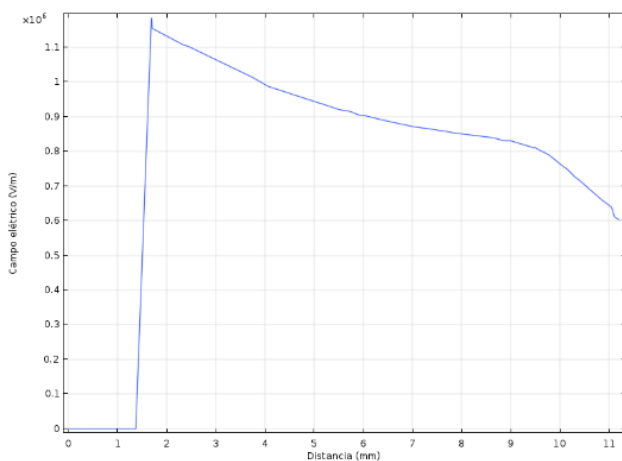
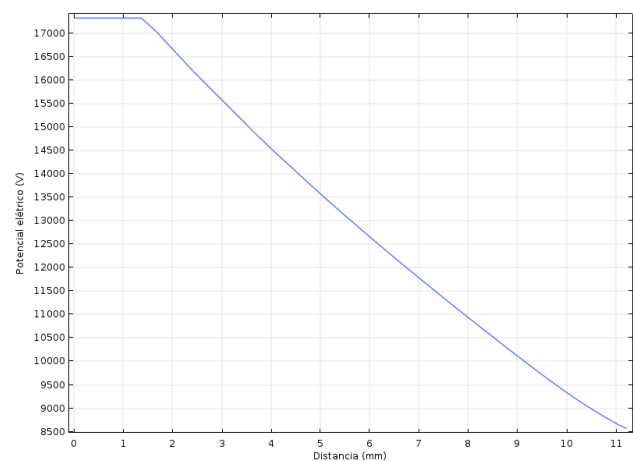


Figura 4.168-Linha de estudo entre a fonte e R6



A



B

Figura 4.169-Estudo no percurso entre a fonte e R6. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico

○ *Resistência R<sub>7</sub>*

Na sétima resistência o campo elétrico volta a aumentar, alcançando o valor de 0,69 MV/m, com uma d.d.p de 10308 V, como se pode ver na Figura 4.171. O percurso da linha utilizada para análise destas duas grandezas está representado na Figura 4.170.

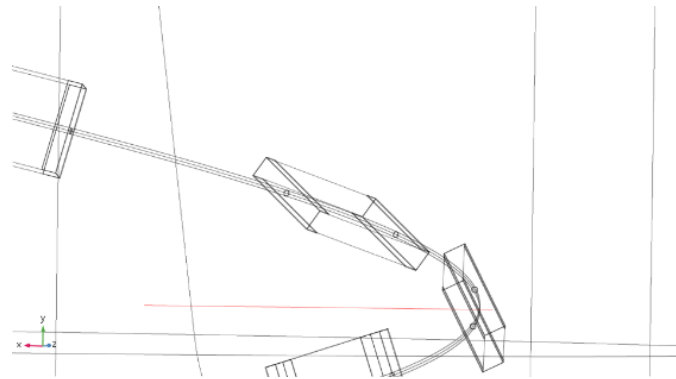
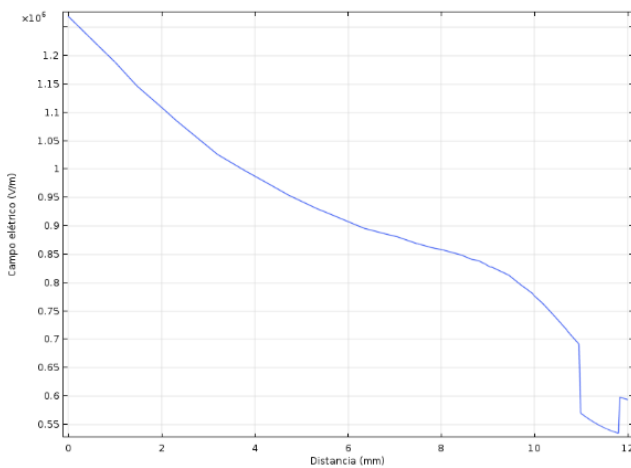
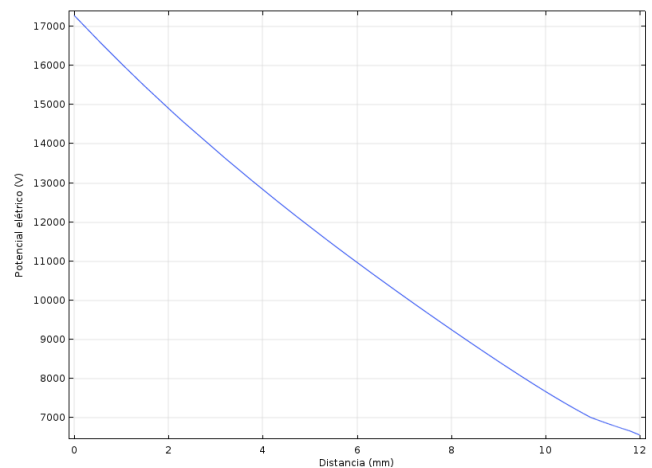


Figura 4.170-Linha de estudo entre a fonte e R7



A



B

Figura 4.171-Estudo no percurso entre a fonte e R7. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico

○ Resistência  $R_8$

Pela análise da Figura 4.173 infere-se que incide sobre R8 um campo elétrico com intensidade de 0,85 MV/m, com uma d.d.p de 12110 V. A linha 3D usada para análise destas duas grandezas está representada na Figura 4.172.

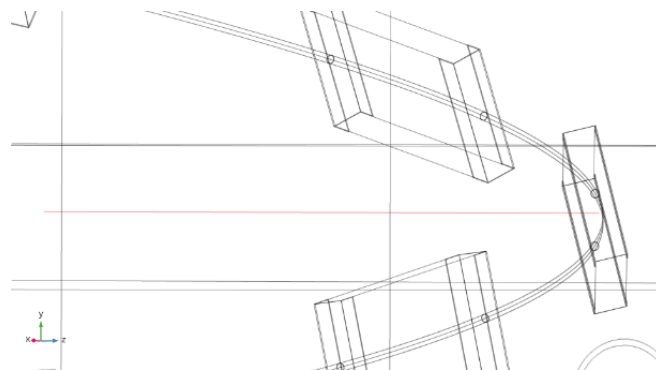
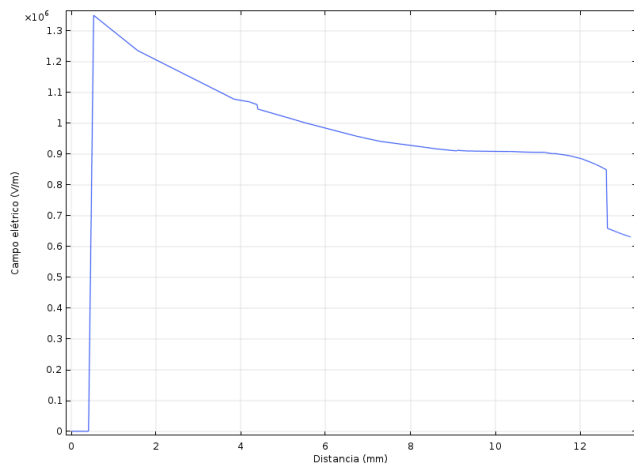
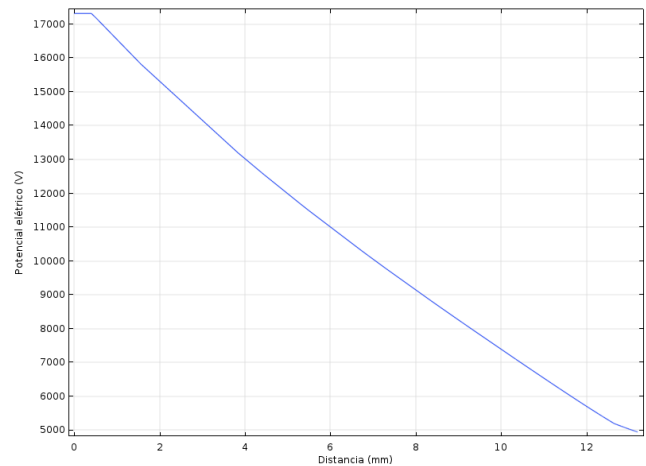


Figura 4.172-Linha de estudo entre a fonte e R8



A



B

Figura 4.173-Estudo no percurso entre a fonte e R8. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico

○ *Resistência R<sub>9</sub>*

Com o auxílio da linha ilustrada na Figura 4.174 regista-se que incide sobre a penúltima resistência um campo elétrico de 1,03 MV/m, com uma d.d.p de 14068 V. Os valores mencionados encontram-se na Figura 4.175.

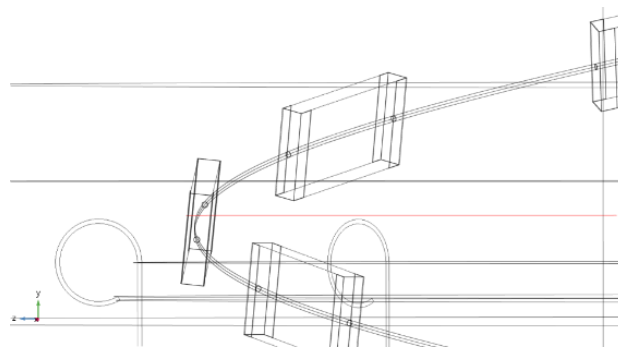
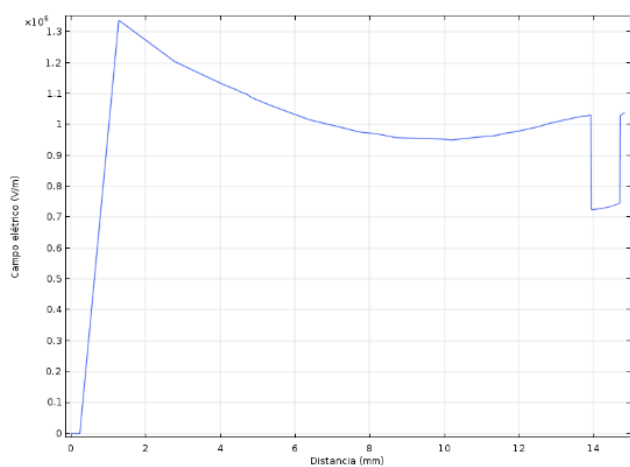
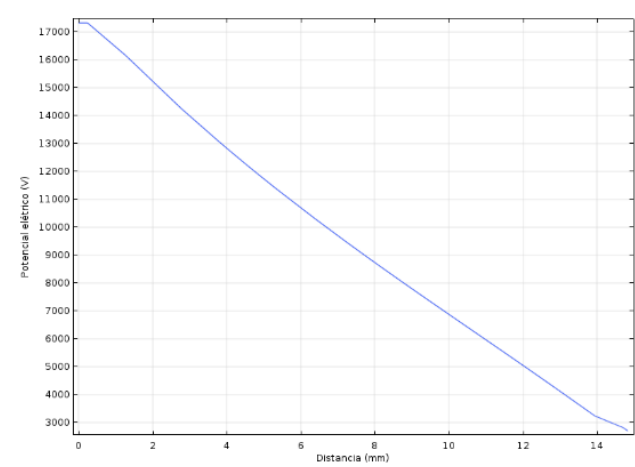


Figura 4.174-Linha de estudo entre a fonte e R9



A



B

Figura 4.175-Estudo no percurso entre a fonte e R9. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico

○ Resistência  $R_{10}$

Da análise feita à Figura 4.177 constata-se que é na última resistência que ocorre a maior intensidade de campo, com um valor de 1,14 MV/m, com uma d.d.p de 16125 V. Estes resultados foram obtidos através da linha 3D representada na Figura 4.176.

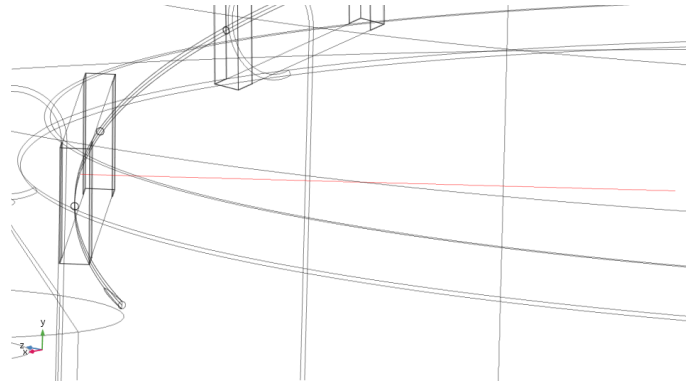
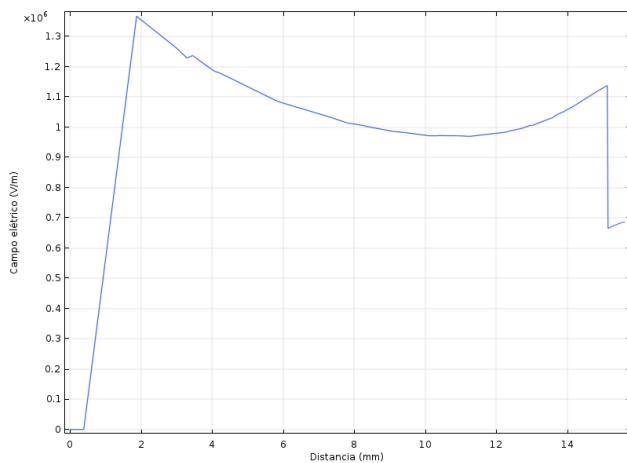
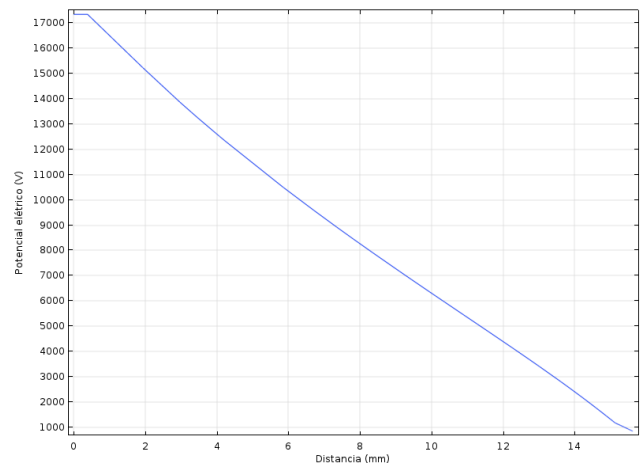


Figura 4.176-Linha de estudo entre a fonte e R10



A



B

Figura 4.177-Estudo no percurso entre a fonte e R10. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico

No subcapítulo anterior fez-se a análise do pior caso (Tabela 4.6 – página 128), que foi quando as resistências estiveram submetidas a campos elétricos mais intensos, devido ao menor número de resistências. Nessa análise, não houve criação de possíveis descargas parciais junto às resistências e anomalias inseridas.

Consequentemente, nesta tipologia com dez resistências não há necessidade de análise num cenário de anomalias, pois logicamente quanto maior for o seu número, menor será o campo elétrico a que cada uma estará sujeita. Como tal assume-se que a análise com defeitos, depois desta informação e, de se já ter escolhido a cadeia final, não acrescenta informação relevante.

Tabela 4.7-Resultados do modelo final no regime de funcionamentos normal.

Modelo delineado sem anomalias		
Materiais	Campo elétrico  (MV/m)	d.d.p. (V)
R1	0,75	0
R2	0,60	2158
R3	0,61	3622
R4	0,64	4942
R5	0,73	6839
R6	0,64	8672
R7	0,69	10308
R8	0,85	12110
R9	1,03	14068
R10	1,14	16125
Média $E_{resistencias}$ ( $\bar{X}_R$ )	0,77	-

Da análise da Tabela 4.7 a intensidade de campo elétrico de todas as resistências desta cadeia (exceto na primeira) comparada às da cadeia de oito (representada na Tabela 4.6) é logicamente é menor, porque tal como provado no capítulo anterior pelo divisor de tensão se o número de resistências aumentar as d.d.p baixam e consecutivamente o campo elétrico também.

## 4.8 Cadeia de dez resistências à tensão de sobrecarga de 70 kV com conector isolante

Tal como referido no capítulo anterior o isolador será submetido a um ensaio de 70 kV durante um minuto, para observar a rigidez dielétrica. Neste subcapítulo, para se perceber o que sucede no interior da travessia, não ao nível térmico e de fraturas a observar em fábrica, mas sim ao nível eletrostático, é feita a simulação à tensão de sobrecarga com e sem anomalias. Para estudo dos efeitos de campo elétrico foram utilizadas as mesmas linhas do ponto anterior, pois apenas muda a tensão de funcionamento.

### 4.8.1 Isolador sem anomalias

#### 4.8.1.1 Estudo das resistências

##### ○ Resistência $R_1$

Tal como representado atrás observa-se novamente na Figura 4.178, que numa tensão bastante superior, o campo elétrico da primeira resistência não sofre alterações visíveis com o aumento da intensidade de campo na vizinhança da capa de estanho. Mais se acrescenta que as linhas equipotenciais continuam a circundar a fonte de tensão uniformemente. Da análise da Figura 4.179 observa-se que  $R_1$  regista um campo elétrico de 3,01 MV/m e uma d.d.p nula.

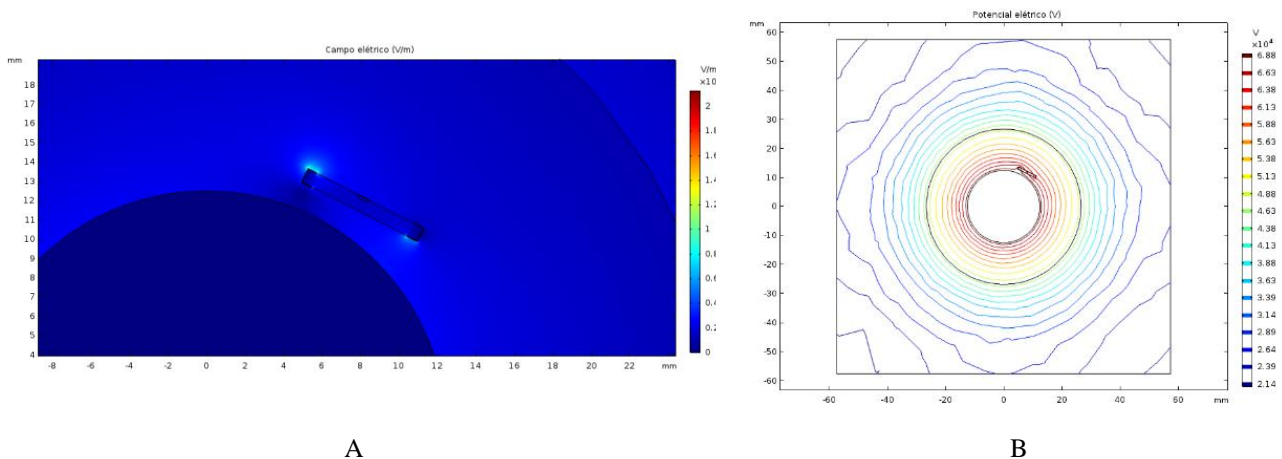
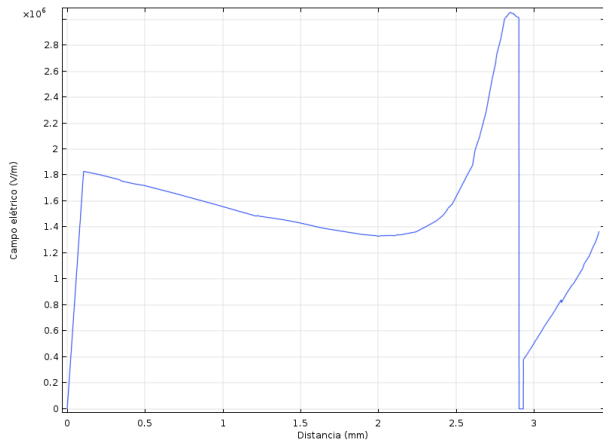
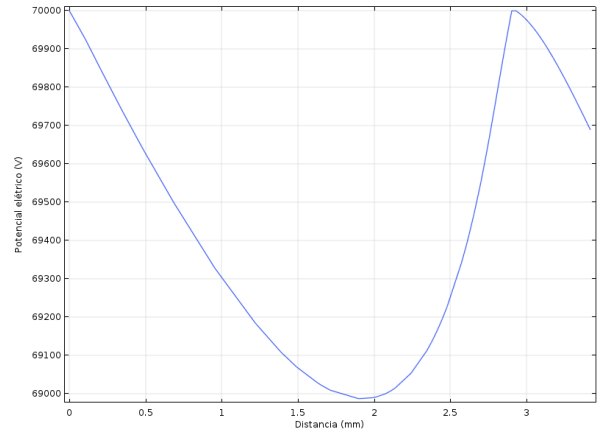


Figura 4.178-Estudo num plano 2D que intersecta a fonte e  $R_1$ . A – Campo elétrico. B - Potencial elétrico.



A

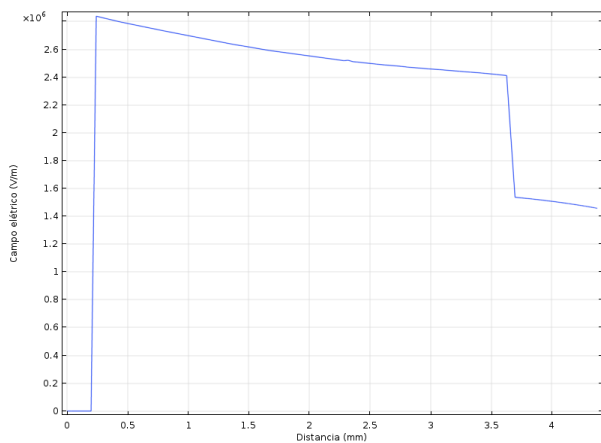


B

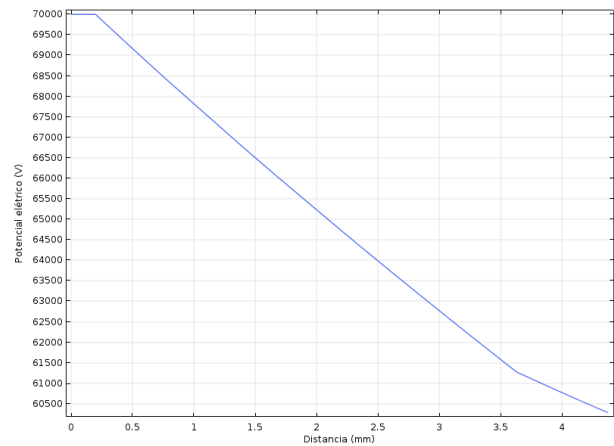
Figura 4.179-Estudo no percurso entre a fonte e R1. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência  $R_2$*

Observa-se na Figura 4.180 que o campo elétrico incidente em R2 é 2,41 MV/m, diminuindo a sua intensidade em quase 0,8 MV/m no seu interior. Esta resistência tem uma d.d.p de 8720 V.



A

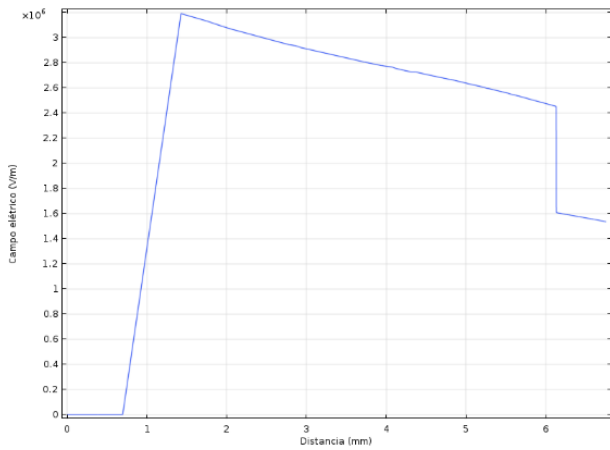


B

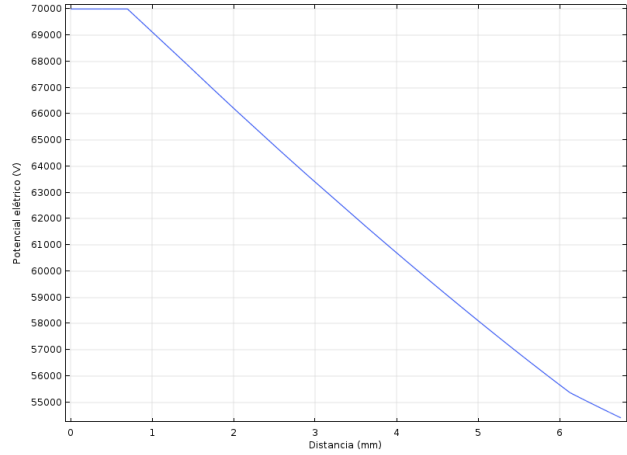
Figura 4.180-Estudo no percurso entre a fonte e R2. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência  $R_3$*

Em R3 há um campo elétrico incidente de 2,45 MV/m, com uma d.d.p de 14637 V, como se confirma pela Figura 4.181.



A

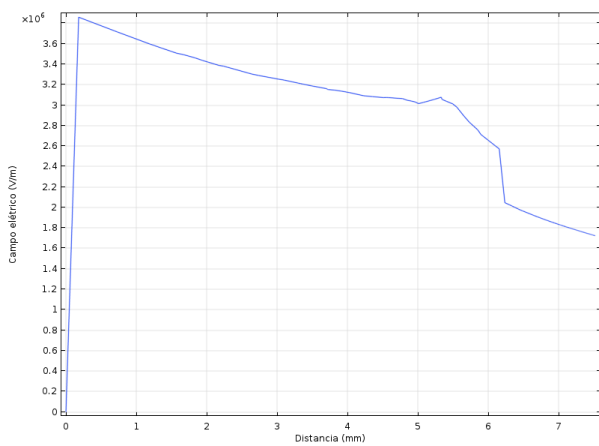


B

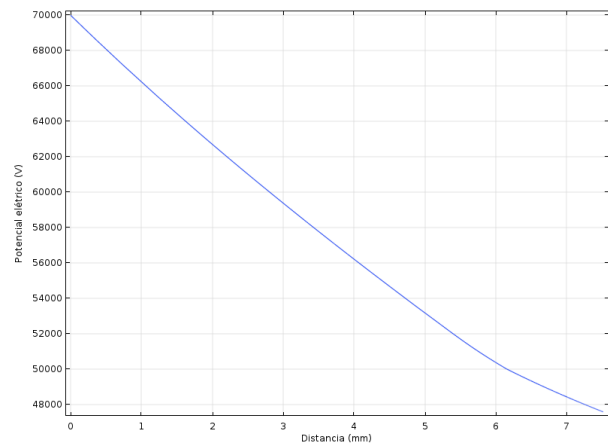
Figura 4.181-Estudo no percurso entre a fonte e R3. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>4</sub>*

Através da Figura 4.182 é inferido que a intensidade do campo elétrico que incide sobre R4 é 2,58 MV/m, com uma d.d.p de 19975 V.



A

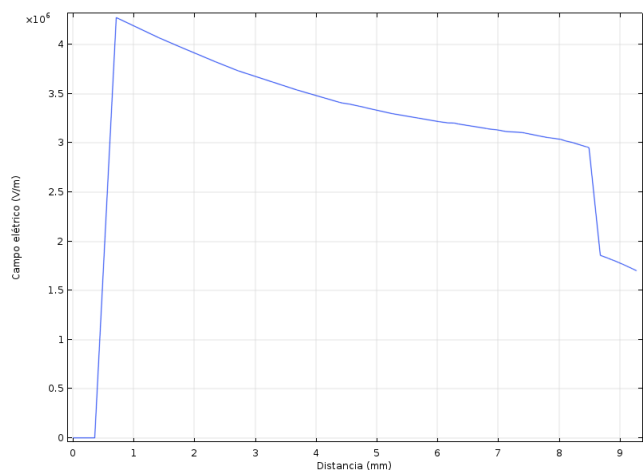


B

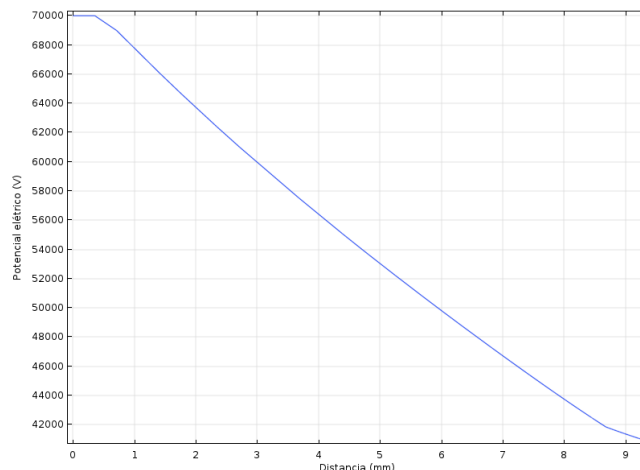
Figura 4.182-Estudo no percurso entre a fonte e R4. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>5</sub>*

Sobre a quinta resistência incide um campo elétrico de 2,95 MV/m, com uma d.d.p de 27642 V. Da superfície para o interior da resistência o campo elétrico diminui sensivelmente 1,2 MV/m. Estes dados são confirmados pela Figura 4.183.



A

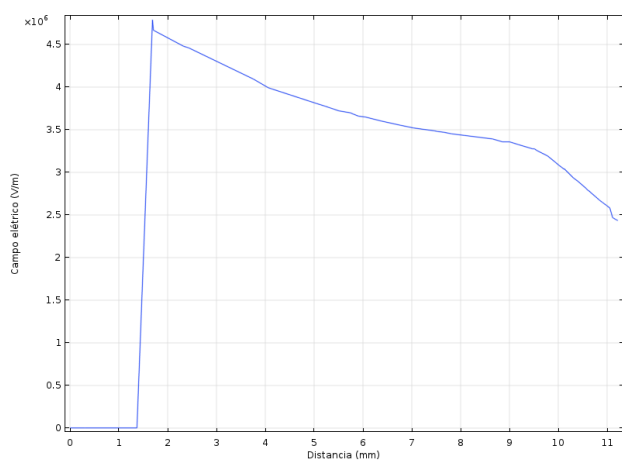


B

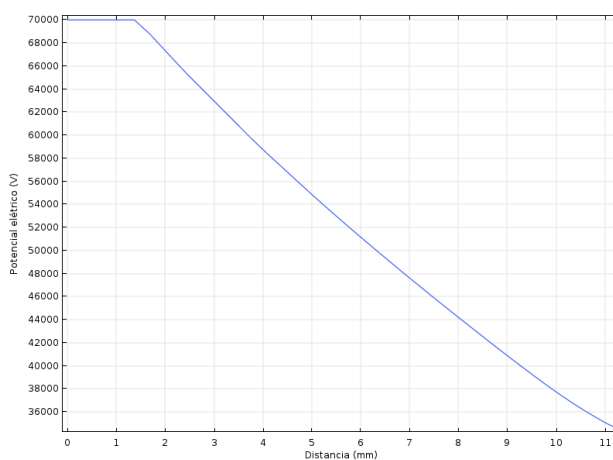
Figura 4.183-Estudo no percurso entre a fonte e R5. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>6</sub>*

Da análise feita à Figura 4.184, conclui-se que a intensidade de campo elétrico incidente na superfície da sexta resistência diminui face à anterior, registando um valor de 2,58 MV/m e uma d.d.p associada de 35045 V. De referir que é bastante reduzida a intensidade de campo elétrico que diminui nesta resistência, algo refletido pelo aumento da distância face à linha utilizada para estudar a componente anterior.



A

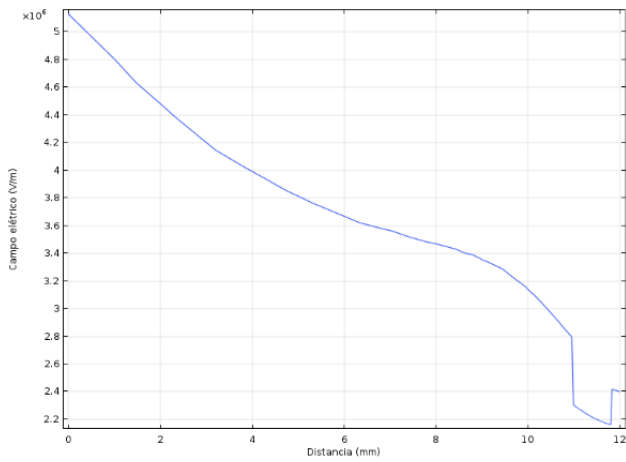


B

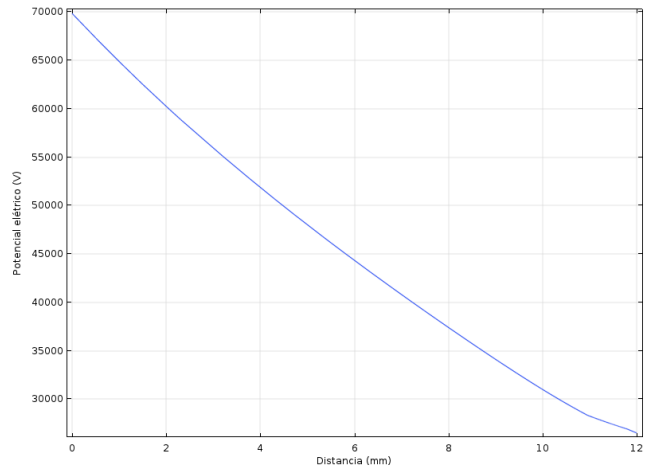
Figura 4.184-Estudo no percurso entre a fonte e R6. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>7</sub>*

Na Figura 4.185 observa-se que a sétima resistência é atingida pelo um campo elétrico de 2,80 MV/m, com uma d.d.p de 41663 V.



A

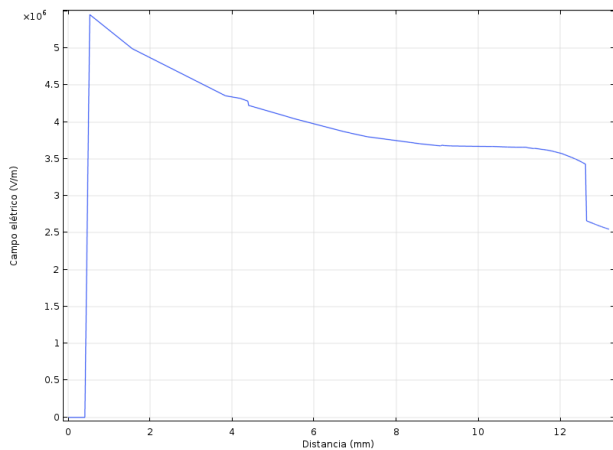


B

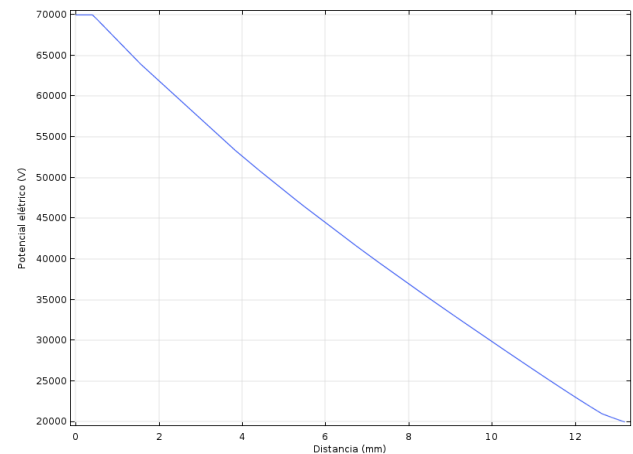
Figura 4.185-Estudo no percurso entre a fonte e R7. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>8</sub>*

Segundo a Figura 4.186 é possível aferir que o campo elétrico que atinge esta resistência é de 3,43 MV/m, com uma d.d.p. de 48946 V.



A

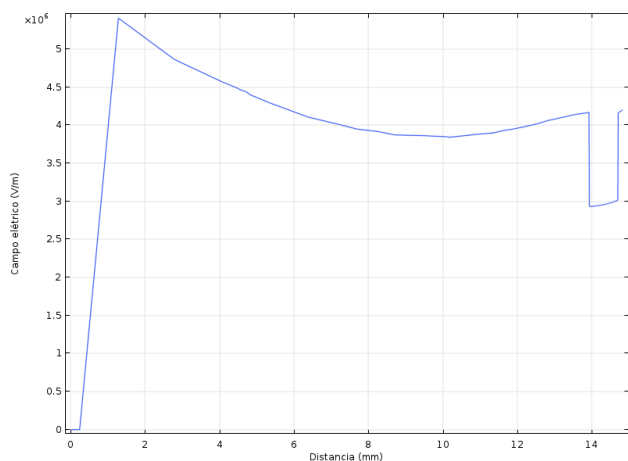


B

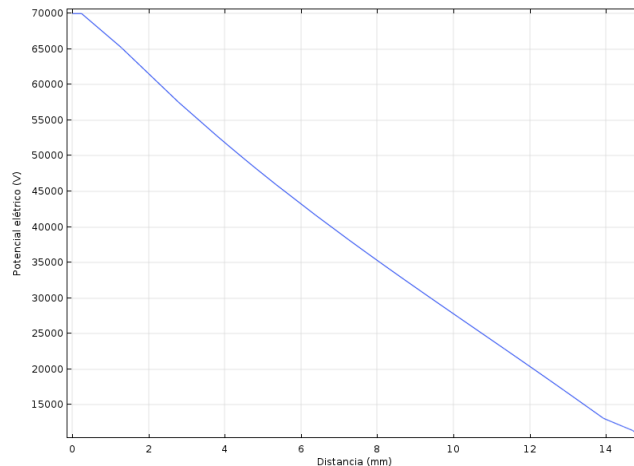
Figura 4.186-Estudo no percurso entre a fonte e R8. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>9</sub>*

Nesta resistência o campo elétrico sobe extremamente face à anterior, para um valor de 4,17 MV/m, com uma d.d.p de 56853 V. De referir que na fronteira entre esta e a resina o campo elétrico desce mais de 1 MV/m. Os valores mencionados estão ilustrados na Figura 4.187



A

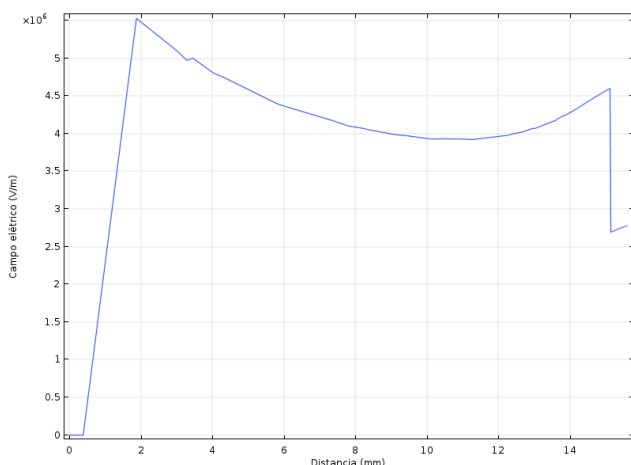


B

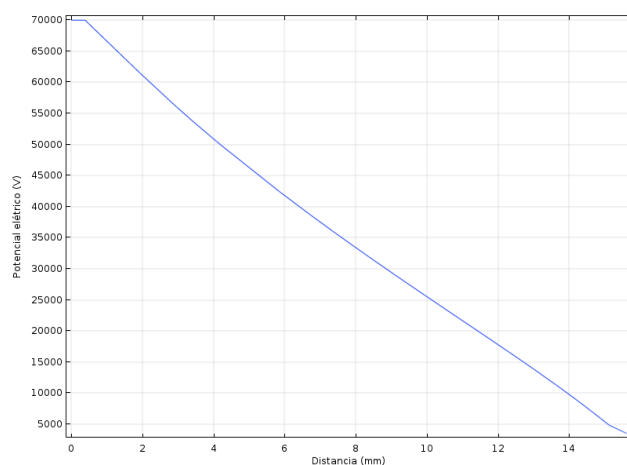
Figura 4.187-Estudo no percurso entre a fonte e R9. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_{10}$

Na última resistência incide o campo elétrico mais intenso de todas, com uma norma de 4,60 MV/m e uma d.d.p de 65168 V. A diferença do meio da resina para o interior da resistência é de quase 2 MV/m. Os valores referidos estão expostos na Figura 4.188.



A



B

Figura 4.188-Estudo no percurso entre a fonte e R10. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

## 4.8.2 Isolador com anomalias

### 4.8.2.1 Estudo do condutor

Através da Figura 4.189 A observa-se que o campo elétrico na bolha de ar, tangente à fonte de tensão, tem uma intensidade considerável, tal como a restante vizinhança da fonte. Relativamente ao potencial elétrico relacionado com a vizinhança da bolha de ar, não há interferências nesta grandeza como se observa na Figura 4.189 B. Com o auxílio da linha 3D, ilustrada na Figura 4.190, observa-se os valores antes e depois da introdução da anomalia e conclui-se que existem consequências graves da sua presença.

Pela Figura 4.191 entende-se que com esta tensão de funcionamento qualquer bolha de ar junto ao condutor terá tendência para criar DP, pois a intensidade do campo sem a presença da anomalia é de 5,35 MV/m, bastante superior ao campo de disrupção do ar e com uma d.d.p de 1382 V. Da observação à Figura 4.192 conclui-se que ocorrerá uma DP, visto o campo elétrico ter aumentado ainda mais que o valor anterior, para 7,08 MV/m. De referir que há uma diferença de potencial de 1836 V na superfície desta bolha de ar.

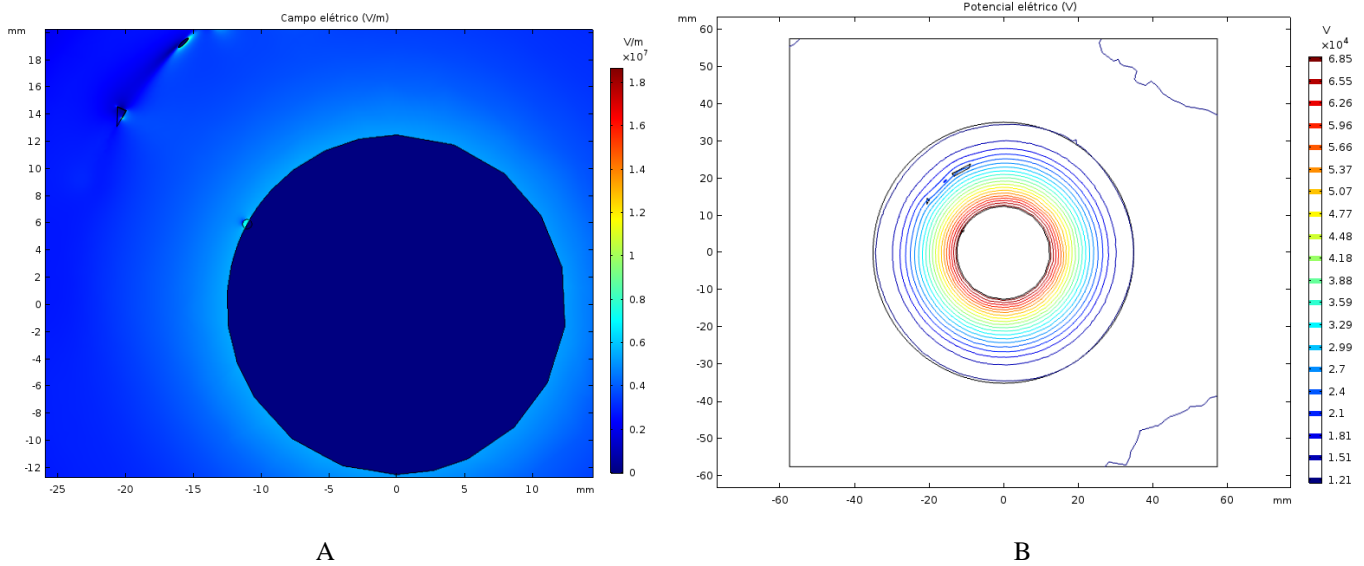


Figura 4.189-Cenário de anomalia num plano 2D que intersecta o condutor de AT e a bolha de ar tangente a este.  
 A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

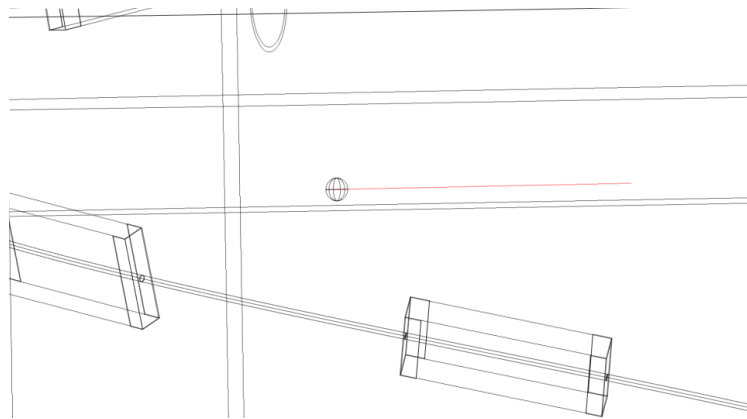
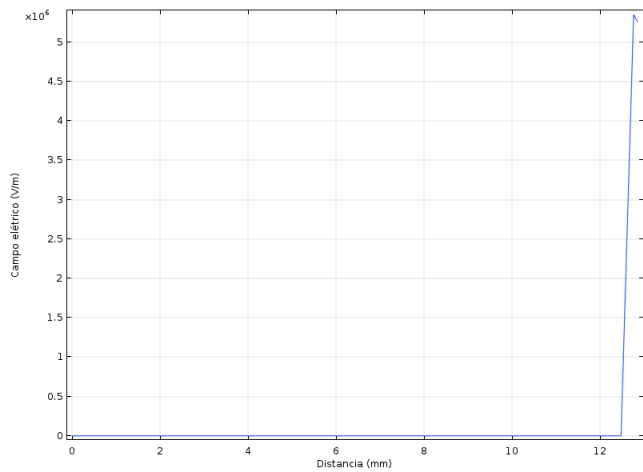
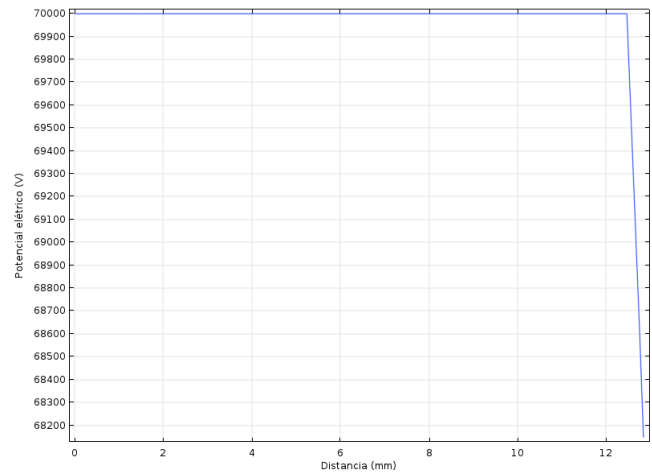


Figura 4.190-Linha de estudo entre o centro do isolador e o condutor de AT com anomalia.

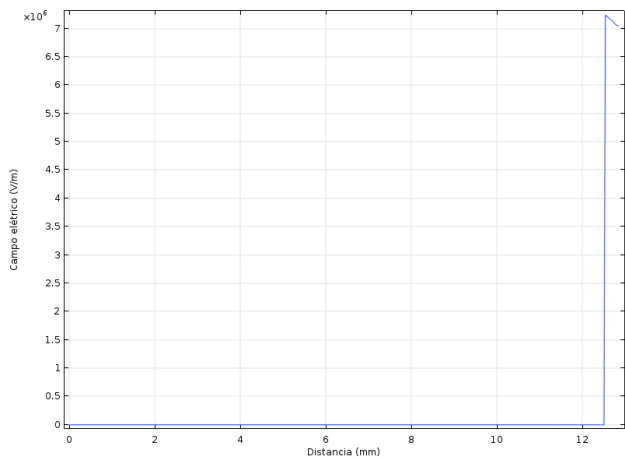


A

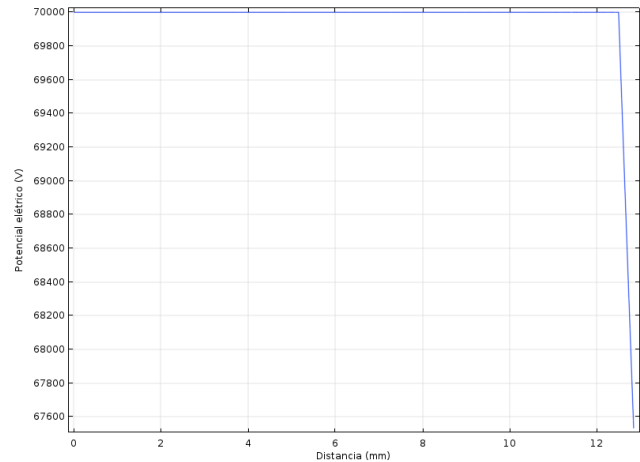


B

Figura 4.191-Estudo no percurso entre o centro do isolador e condutor de AT, antes da introdução de anomalia no condutor de AT. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.



A



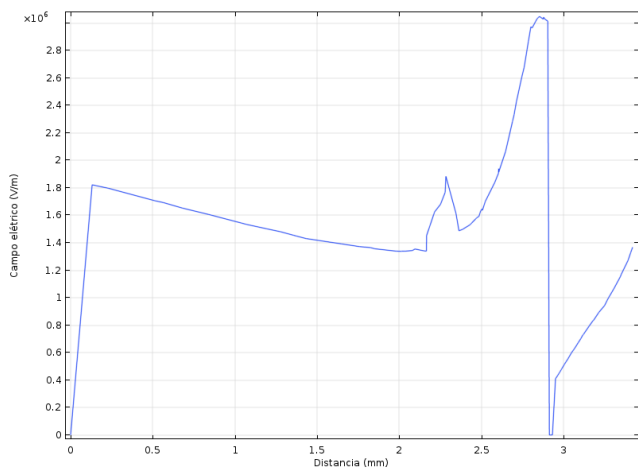
B

Figura 4.192-Estudo no percurso entre o centro do isolador e condutor de AT, com anomalia no condutor de AT. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

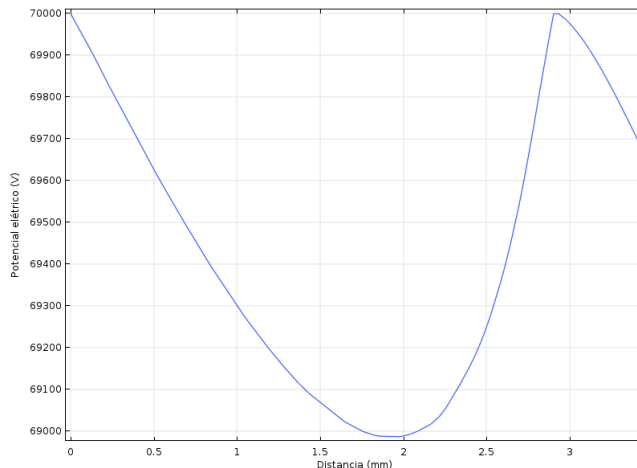
#### 4.8.2.2 Estudo das resistências

##### ○ Resistência $R_1$

Como a bolha de ar não desencadeou na sua vizinhança disparidade ao nível do campo elétrico, os gráficos no plano 2D são omitidos. Da análise da Figura 4.193 infere-se que a bolha de ar neste percurso está sujeita a um campo elétrico de 1,88 MV/m e uma d.d.p de 926 V. Em relação à resistência é atingida por um campo elétrico de 3,01 MV/m de intensidade e uma d.d.p associada de 0 V.



A

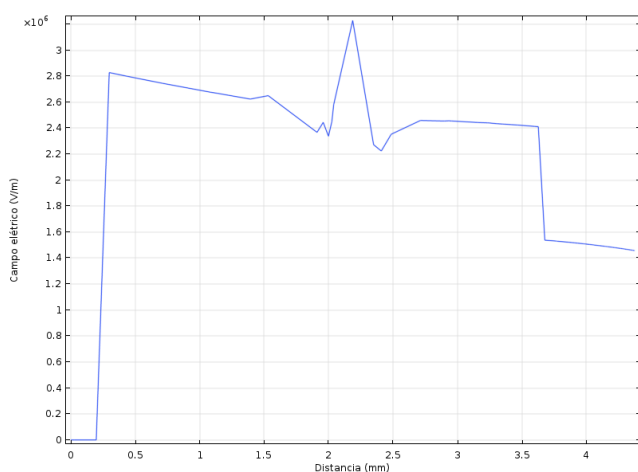


B

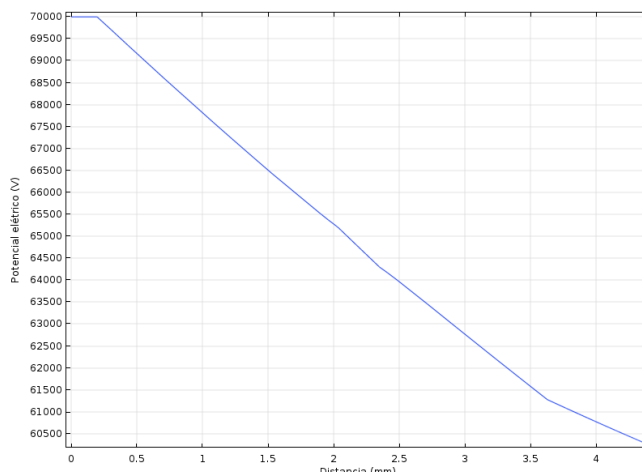
Figura 4.193-Estudo no percurso entre a fonte e R1. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_2$

No percurso entre a fonte de tensão e a segunda resistência, o campo elétrico sobre a bolha de ar aumenta para 3,23 MV/m, como consequência neste cenário ocorrerá certamente uma DP. A d.d.p nesta anomalia é de 5242 V. Na resistência incide um campo elétrico de 2,41 MV/m, com uma d.d.p de 5835 V. Estes valores visualizam-se na Figura 4.194.



A

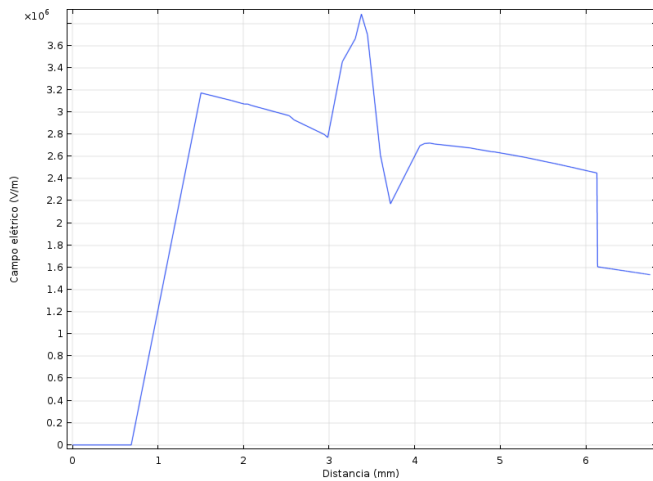


B

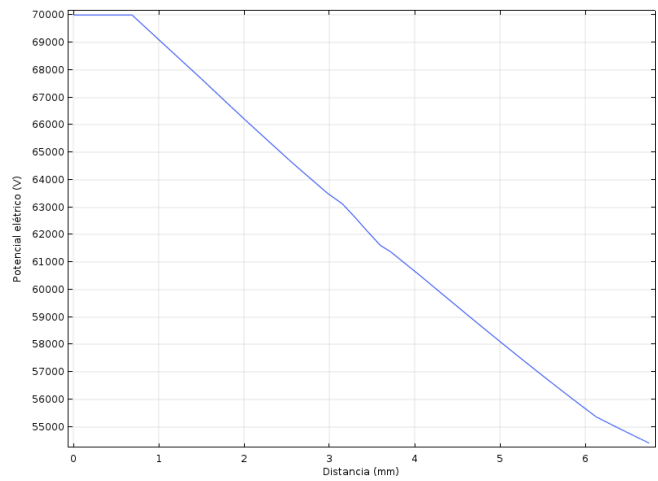
Figura 4.194-Estudo no percurso entre a fonte e R2. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ Resistência  $R_3$

A bolha de ar, presente no caminho do condutor de AT para R3, é submetida a um campo elétrico de 3,88 MV/m, com uma d.d.p de 7600 V. Da fronteira para o interior da bolha, o campo elétrico aumenta quase 1 MV/m, sendo que o seu valor máximo resulta numa DP. À superfície da resistência ocorre um campo de 2,45 MV/m, com uma diferença de potencial de 14640 V. Os dados mencionados estão presentes na Figura 4.195.



A

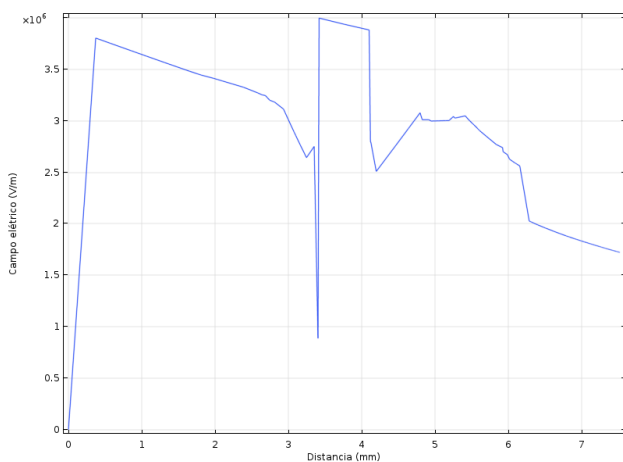


B

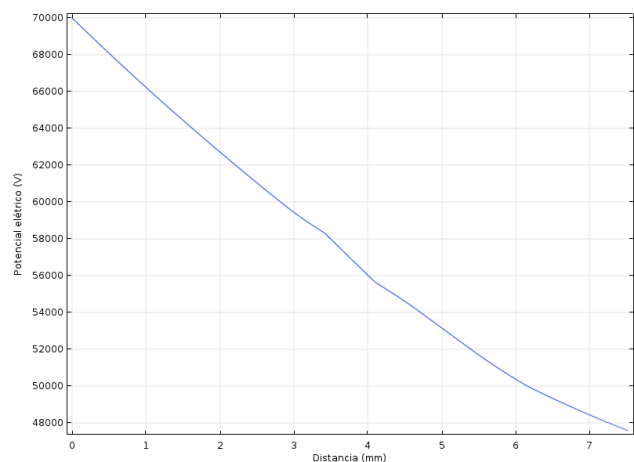
Figura 4.195-Estudo no percurso entre a fonte e R3. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência  $R_4$*

Da Figura 4.196 observa-se que o campo elétrico na bolha de ar volta a aumentar, para 4,00 MV/m, com uma d.d.p de 11680 V. Neste caso a subida de campo elétrico na vizinhança da bolha de ar é bastante significativa, subindo 3 MV/m e naturalmente ocorrerá uma DP. No que diz respeito a R4, sobre esta incide um campo elétrico de 2,56 MV/m, com uma d.d.p de 19980 V.



A

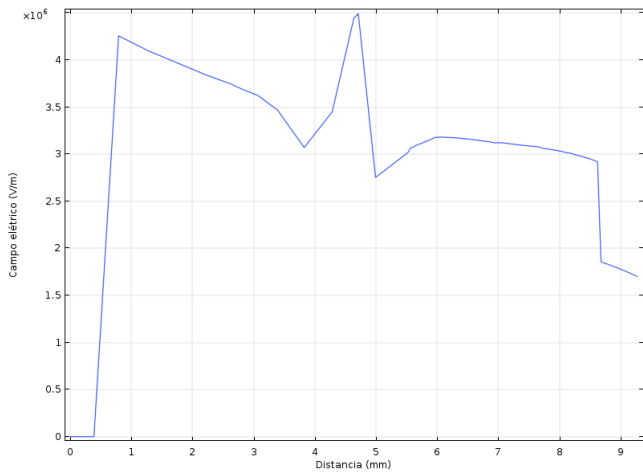


B

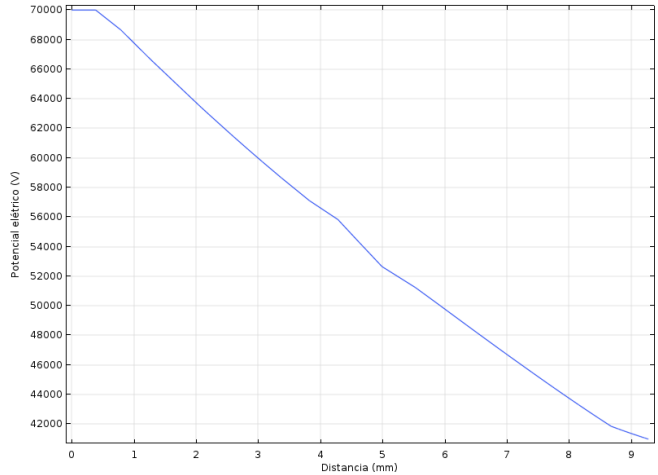
Figura 4.196-Estudo no percurso entre a fonte e R4. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência  $R_5$*

A bolha de ar presente no percurso até R5 é sujeita a um campo elétrico de 4,49 MV/m, com uma d.d.p de 16088 V. Neste caso a subida do campo elétrico no ponto fronteira da bolha é de quase 1,5 MV/m, o que naturalmente resulta numa DP. Em relação a R5 o campo elétrico nesta é de 2,92 MV/m, a que está associada uma d.d.p de 28000 V. Estes valores encontram-se na Figura 4.197.



A

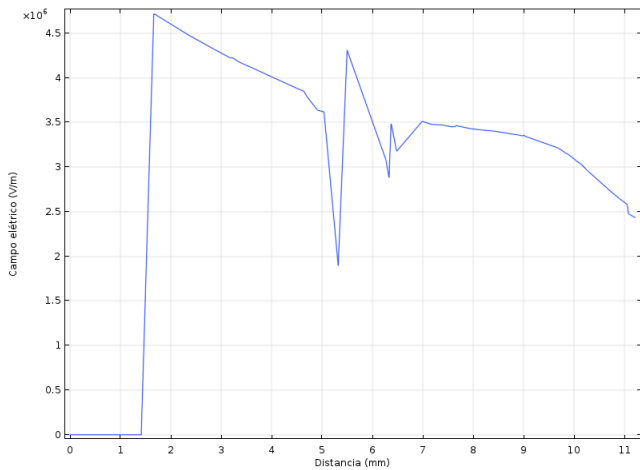


B

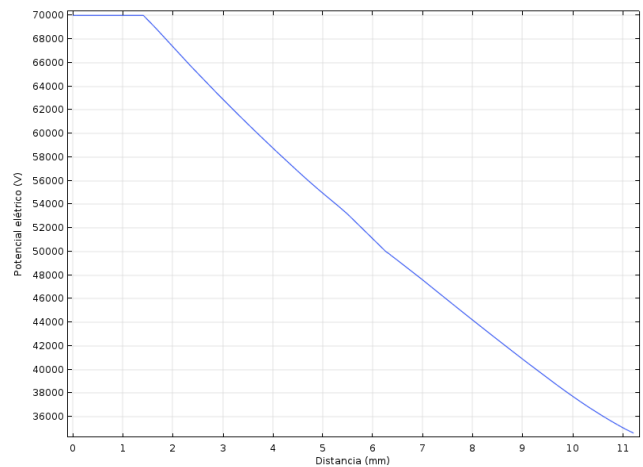
Figura 4.197-Estudo no percurso entre a fonte e R5. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>6</sub>*

Pela Figura 4.198 infere-se que a bolha de ar a meio do caminho entre o condutor de AT e R6 está sujeita a um campo elétrico de 4,31 MV/m, com uma d.d.p. de 16834 V, consecutivamente ocorrerá uma DP. Neste caso, tal como no cenário sem anomalias, o campo elétrico em relação à resistência anterior desce devido ao aumento da distância da linha de estudo. Paralelamente na resistência, o campo elétrico é menos intenso com um valor de 2,58 MV/m e uma d.d.p. associada de 35050 V.



A

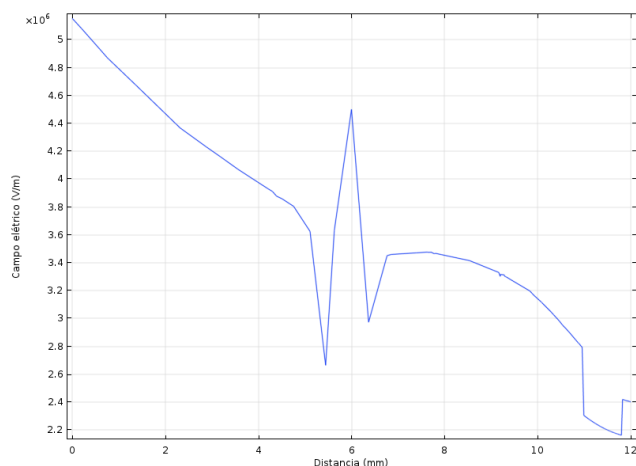


B

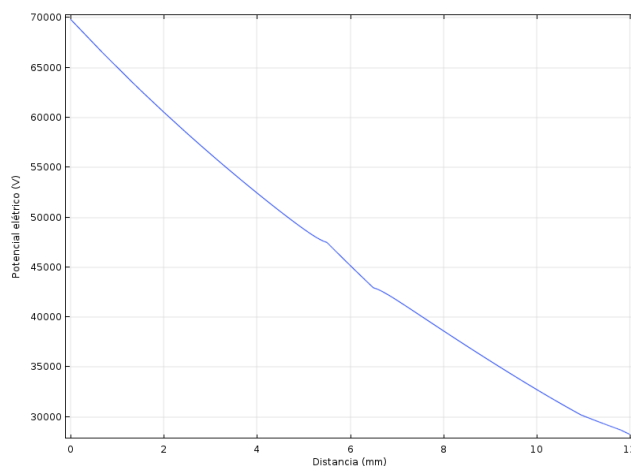
Figura 4.198-Estudo no percurso entre a fonte e R6. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>7</sub>*

Da análise à Figura 4.199 entende-se que a bolha de ar entre o condutor de AT e R7 é atingida por um campo elétrico de intensidade de 4,50 MV/m, com uma d.d.p. de 25668 V. Do exterior para o interior da bolha a intensidade de campo elétrico sobe quase 1,5 MV/m e ocorrerá disrupção nesta. Em relação a R7 observa-se que o campo elétrico na sua superfície é de 2,80 MV/m, com uma d.d.p. de 41672 V.



A

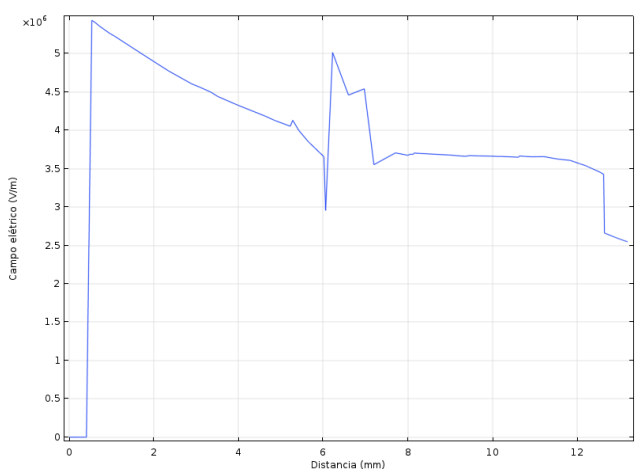


B

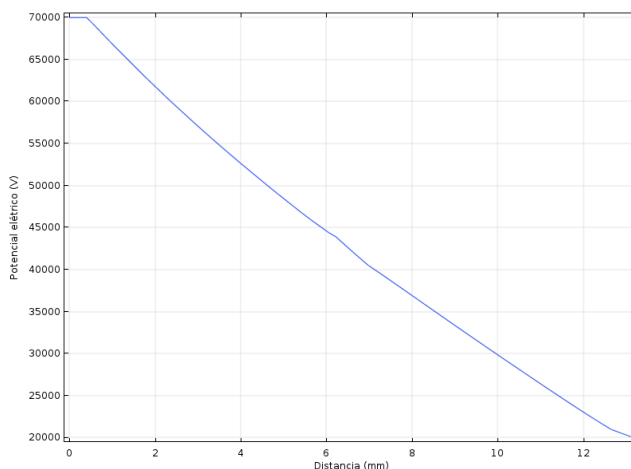
Figura 4.199-Estudo no percurso entre a fonte e R7. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>8</sub>*

A meio do percurso entre a fonte e R8, a anomalia está exposta a um campo elétrico de intensidade 5,02 MV/m e uma d.d.p de 26100 V. O campo elétrico na fronteira da bolha de ar com a resina sobe quase 2 MV/m, o que resulta numa DP. Relativamente a R8, o seu campo elétrico é de 3,43 MV/m, com uma d.d.p de 48963 V. Com esse valor, caso existam pontos de ar tangente à sua superfície derivarão uma DP nesse local. Os valores mencionados podem ser observados na Figura 4.200.



A

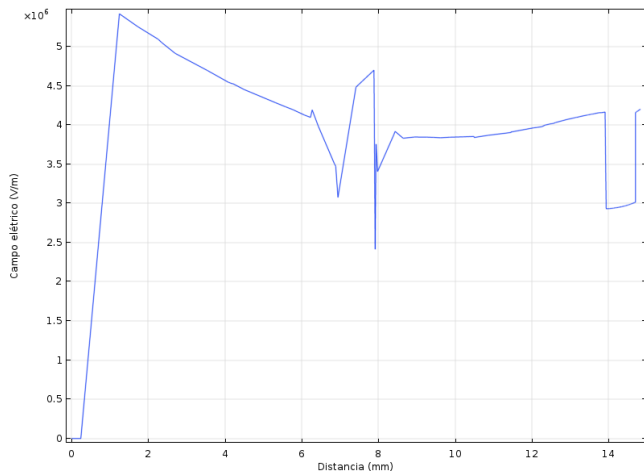


B

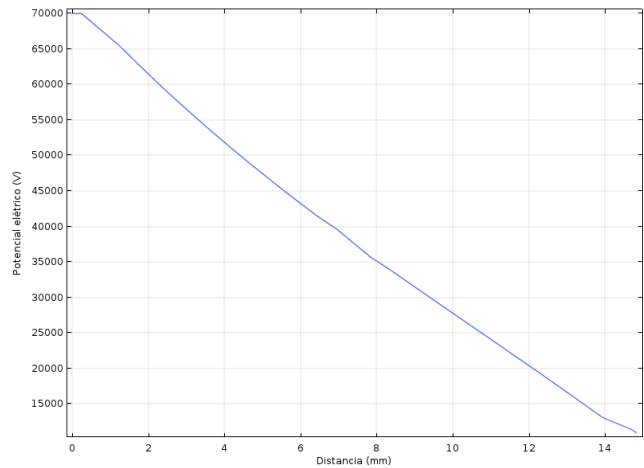
Figura 4.200-Estudo no percurso entre a fonte e R8. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>9</sub>*

Pela Figura 4.201 observa-se que a anomalia entre o condutor de AT e R9 está submetida a um campo elétrico no valor de 4,70 MV/m, com uma d.d.p de 34500 V. O campo elétrico na fronteira da bolha sobe quase 1,5 MV/m. Esse valor máximo resulta numa DP. Analogamente a penúltima resistência é sujeita a um campo elétrico de 4,17 MV/m, com uma d.d.p. de 56800 V.



A

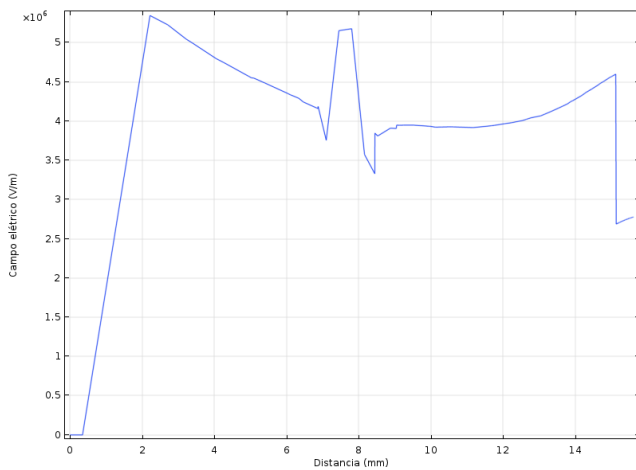


B

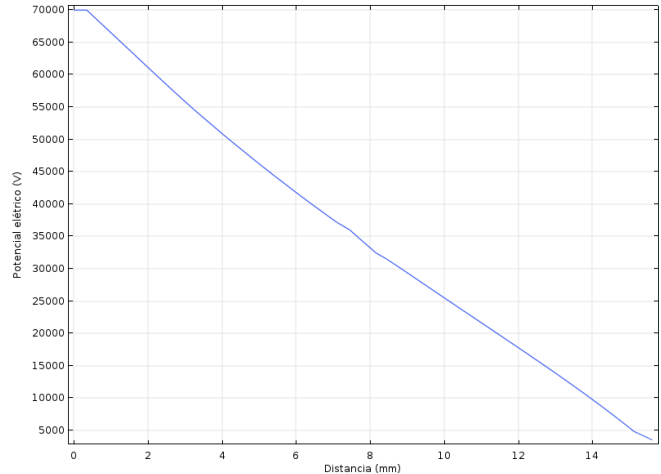
Figura 4.201-Estudo no percurso entre a fonte e R9. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

○ *Resistência R<sub>10</sub>*

A bolha de ar presente entre o condutor e a última resistência é submetida a um campo elétrico com intensidade 5,15 MV/m, que subiu na fronteira epoxy-ar quase 1,5 MV/m, com uma d.d.p. de 34013 V. Tal como em todas bolhas de ar anteriores, à exceção da primeira, também nesta ocorrerá DP pelo mesmo motivo já explicado antes. Na resistência incide um campo elétrico de 4,60 MV/m, com uma d.d.p. de 65170 V. Os valores mencionados encontram-se ilustrados na Figura 4.202.



A



B

Figura 4.202-Estudo no percurso entre a fonte e R10. A - Campo elétrico. B - Potencial elétrico.

## 4.9 Análise do modelo final

Neste ponto estão amostrados os resultados do modelo delineado, à sua tensão de sobrecarga de 70 kV, nos cenários com e sem anomalias. São frisados os pontos críticos, tal como as vantagens deste sistema.

Tabela 4.8-Resultados do modelo final em regime de sobrecarga nos cenários de presença e ausência de anomalias.

Materiais	Modelo sem anomalias		Modelo com anomalias		Relação $\frac{E_s/anomalias}{E_c/anomalias}$ (%)
	Campo elétrico  (MV/m)	d.d.p. (V)	Campo elétrico  (MV/m)	d.d.p. (V)	
Bolha de ar no condutor (antes/depois)	5,35	1382	7,08	1836	75,76
R1	3,01	0	3,02	0	99,91
Bolha de ar associada a R1	-	-	1,88	926	-
R2	2,41	8720	2,41	5835	100,04
Bolha de ar associada a R2	-	-	3,23	5242	-
R3	2,45	14637	2,45	14640	100,00
Bolha de ar associada a R3	-	-	3,88	7600	-
R4	2,57	19975	2,56	19980	100,39
Bolha de ar associada a R4	-	-	4,00	11680	-
R5	2,95	27642	2,92	28000	101,10
Bolha de ar associada a R5	-	-	4,49	16088	-
R6	2,58	35045	2,58	35050	100,00
Bolha de ar associada a R6	-	-	4,31	16834	-
R7	2,80	41663	2,79	41672	100,07
Bolha de ar associada a R7	-	-	4,50	25668	-
R8	3,43	48946	3,43	48963	100,09
Bolha de ar associada a R8	-	-	5,02	26100	-
R9	4,17	56853	4,17	56800	100,05
Bolha de ar associada a R9	-	-	4,70	34500	-
R10	4,60	65168	4,60	65170	100,02
Bolha de ar associada a R10	-	-	5,15	34013	-
Média nas bolhas ( $\bar{X}_B$ )	-	-	4,39	-	-
Média $E_{resistencias}$ ( $\bar{X}_R$ )	3,10	-	3,09	-	-

Da análise à Tabela 4.8 verifica-se novamente, que as intensidades de campo elétrico incidente na superfície das resistências são idênticas nos cenários com e sem anomalias. As bolhas de ar foram colocadas entre o condutor de AT e cada uma das resistências para perceber se provocariam alterações no campo elétrico dessas componentes, verificando-se que não as influenciaram. Nesse domínio, todas as bolhas de ar inseridas derivariam em DP's.

Além dos defeitos previstos, este ensaio serve principalmente para avaliar a rigidez dielétrica da peça e observar se com esta tensão ocorrerá fratura ou não. Visto que, com o módulo electrostático do *software* de elementos finitos não se consegue avaliar esses efeitos (que na realidade dependem de algumas condições), o capítulo seguinte servirá para fazer a ponte com os resultados apresentados e analisados, entendendo se o sistema dimensionado mantém coerência com estes.

# 5 Ensaio em fábrica e análise de resultados

Neste capítulo é feita a análise dos ensaios em fábrica dos modelos de travessia propostos que, pelas razões atrás referidas, foram mais exequíveis de construir e dos quais se espera conformidade com os resultados das simulações. Foram analisadas em detalhe duas réplicas do modelo proposto e uma réplica do modelo com a primeira cadeia resistiva.

No total são feitos três ensaios de acordo com a tensão nominal do isolador, mais o ensaio de impulso na travessia que apresente melhores resultados nesses três ensaios. Nos ensaios de deteção das DP's é feita uma inspeção do modelo proposto para se perceber se passou nos requisitos e quais os defeitos da peça.

Como elo de comparação, entre as simulações e os ensaios em fábrica, foi apontado o modelo exequível que tinha campos elétricos menos intensos e, portanto, maior dificuldade na criação de DP's.

## 5.1 Pontos a conhecer na fábrica

### 5.1.1 Ambiente de teste de ensaio

Na aplicação da travessia, referida no capítulo 3, a parte superior fica introduzida dentro do transformador, sendo isolada por gás  $SF_6$  e a restante parte do corpo que fica no exterior é isolada pelo conector isolante (*Tee conector*-interface B), ao qual se liga uma das fases do condutor de AT.

Para simular o gás  $SF_6$ , presente na ligação da travessia ao transformador, nos ensaios, a peça é mergulhada numa pia feita de PVC, com um líquido dielétrico<sup>7</sup> de AT à base de carbono e flúor, como se observa na Figura 5.1. Apesar da constante dielétrica do gás  $SF_6$  ser diferente da camada interior do conector isolante (usualmente silicone), destinada a isolar a parte inferior da travessia, nos ensaios assume-se que esses meios têm um valor igual, visto que este líquido banha toda a superfície da mesma. Isto serve para obter uma distribuição uniforme do campo elétrico no exterior da peça. A camada externa condutora do conector isolante é aproximada por um copo de alumínio, que está dentro desta pia e onde a travessia está contida.

---

<sup>7</sup> Este líquido dielétrico é um composto fluorado, só com átomos de carbono e flúor. A sua fórmula química depende da aplicação, apenas se sabe que tem entre 5 a 18 átomos de carbono. Tem a denominação comercial de "PF-5052", cuja ficha técnica da 3M, que está no anexo IV.

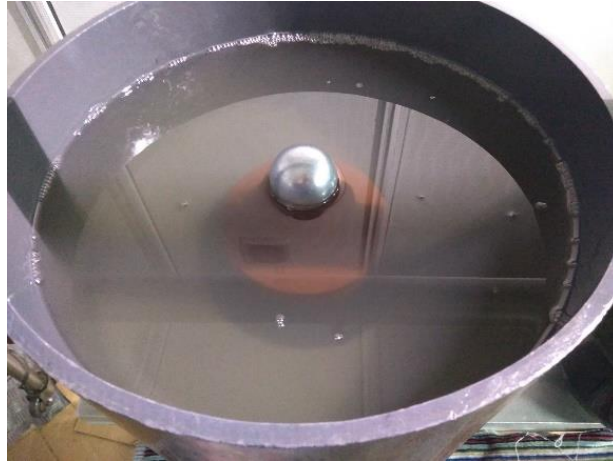


Figura 5.1-Montagem que simula a aplicação na realidade.

Não existindo cenários perfeitos é possível que este líquido se infiltre entre o orifício da travessia, de encaixe do condutor de AT e o próprio. Estas camadas, proporcionadas pela montagem utilizada para os ensaios, criam duas capacidades que estão representadas na Figura 5.2 pelo seu circuito elétrico equivalente. Na representação da vista de cima, a camada representada a verde corresponde ao fluido dielétrico, que simula o gás  $SF_6$ . As três camadas (preta, verde e vermelha), representadas na Figura 5.2, criam duas capacidades em série: condutor- $SF_6$  e  $SF_6$ -Epoxy. A série de capacidades reduz a capacidade equivalente, todavia como a distância entre camadas é ínfima o valor da capacidade tende para infinito (equação 5.1) e conseqüentemente a sua capacidade equivalente continua a ser elevada.

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad (5.1)$$

Pela equação 5.2 confirma-se que a capacidade de um condensador é inversamente proporcional à tensão.

$$C = \frac{Q}{U} \quad (5.2)$$

Comprovando-se a capacidade equivalente ser bastante elevada, é possível afirmar que a oscilação do valor da tensão (consequência da capacidade equivalente) a que travessia está sujeita é bastante reduzida, de acordo com o meio de montagem dos ensaios.

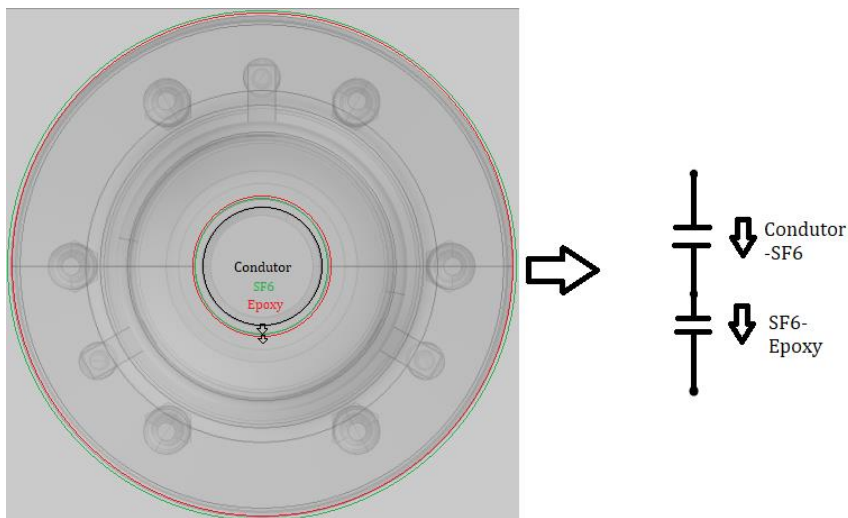


Figura 5.2-Circuito elétrico equivalente do sistema em montagem.

### 5.1.2 Local de ensaios

Para evitar ruídos externos, os ensaios das DP's são feitos dentro de uma gaiola de Faraday, como se observa na Figura 5.3 e posteriormente os resultados desses amostrados em *software* de fábrica. Os resultados dos ensaios são obtidos pela detecção de DP's com base no método de resolução em ângulo de fase.



Figura 5.3-Local de ensaios elétricos dos isoladores da Indisol.

Na Figura 5.4 está representado o circuito utilizado em fábrica para se fazer uma detecção rigorosa das DP's. A impedância de medida faz a leitura do valor de carga elétrica aparente, que corresponde à alteração da capacidade relativa entre a travessia e o condensador de acoplamento, resultante de uma DP. Para se obter valores fidedignos, este circuito antes dos ensaios passa por um processo de calibração. No circuito utilizado para o ensaio de detecção de DP é requisito principal que a capacidade da carga de prova (*DUT*) tem de ser menor que o condensador de acoplamento.

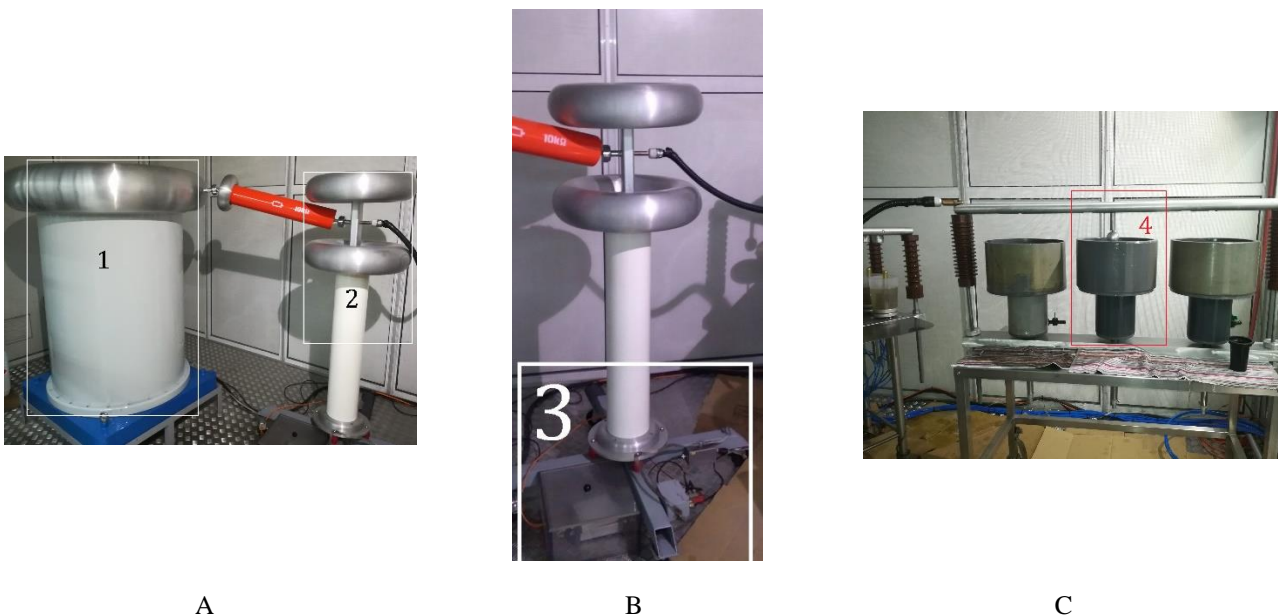


Figura 5.4-Circuito de detecção de DP's. A-Fonte de tensão C.A. (1) ligada ao filtro (2). B-Filtro (3) ligado à impedância de medida. C-Pia central (4) que alberga a travessia a testar.

## 5.2 Ensaios às DP's e rigidez dielétrica na frequência industrial

O circuito A de ensaios às DP's e rigidez dielétrica, descrito no capítulo 2, aplica-se à travessia de estudo. A travessia tem uma capacidade de 20 pF, menor que a capacidade do condensador de acoplamento, no valor de 1 nF, tal como requerido.

Nestes ensaios recolhem-se os valores das DP's e é feita uma pequena análise de qual a razão que pode ter desencadeado a ocorrência da DP.

De entre os três modelos a testar é feita uma comparação final com base nos ensaios da fábrica, que não construiu as cadeias resistivas de acordo com a projeção geométrica delineada pelo *software* de desenho, mas de uma forma aproximada manualmente.

### 5.2.1 Isolador 1 com 3ª cadeia resistiva

O procedimento aplicado à primeira réplica da travessia com a terceira cadeia resistiva é igual para os restantes modelos a ensaiar.

- *Ensaio à rigidez dielétrica a 70 kV*

A travessia é submetida inicialmente à tensão máxima de 70 kV durante um minuto e registam-se DP's na ordem dos 24 pC, como se observa pela Figura 5.5. Neste ensaio que avalia a rigidez dielétrica, a travessia é aprovada pois não se observa nenhum defeito físico, ao nível de ruturas na sua superfície. Para haver confirmação da rigidez dielétrica analisa-se o interior da peça por uma máquina RX, em fábrica, após os ensaios *standard* a que este modelo será submetido.

Pela representação da Figura 5.5, ao aplicar quatro divisões na escala temporal para se “obter” os quatro quadrantes, verifica-se que as DP's têm maior amplitude e densidade temporal no final do 3º quadrante e no início do 4º, o que segundo estudos do capítulo 2 indica que os problemas neste caso estão provavelmente associados a cavidades gasosas no interior da travessia. Esta hipótese surge da análise feita às simulações no *software* de elementos finitos nesta tensão (capítulo anterior), pois aí confirmou-se que se houvesse defeitos (cavidades gasosas) no interior da travessia resultariam em DP's. No entanto é de salientar que para um patamar de tensão tão elevado as intensidades das DP's são baixas.

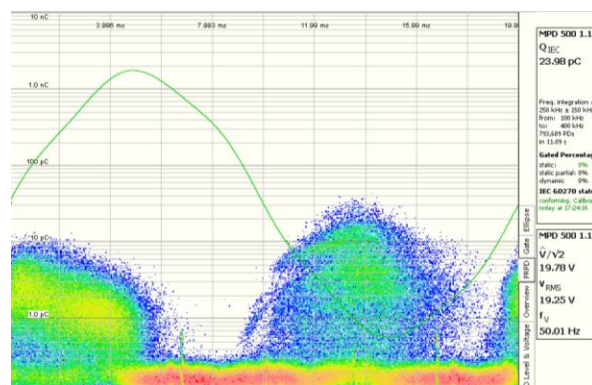


Figura 5.5-Deteção de DP's no isolador 1 com base na resolução em ângulo de fase segundo um sinal C.A. aplicado a 70 kV.

Após o primeiro ensaio diminui-se a tensão para o segundo estágio de 43,2 kV, onde segundo a norma do anexo III o valor máximo de DP's aceitável é de 10 pC de carga elétrica. Da análise da Figura 5.6 verifica-se que esta travessia teve DP's aceitáveis atingindo 2,24 pC, menos de 25 % do limiar máximo que pode atingir. Da representação das DP's (Figura 5.6) com base na resolução em ângulo de

fase, verifica-se que nesta tensão as mesmas não têm ocorrência com valores significativos e possuem máximos esporádicos no começo do quarto quadrante. Portanto, não é possível fazer uma avaliação coerente das causas de DP's tão pouco intensas e ocasionais. Desta forma comprova-se que para esta tensão a peça não tem problemas ao nível de DP's.

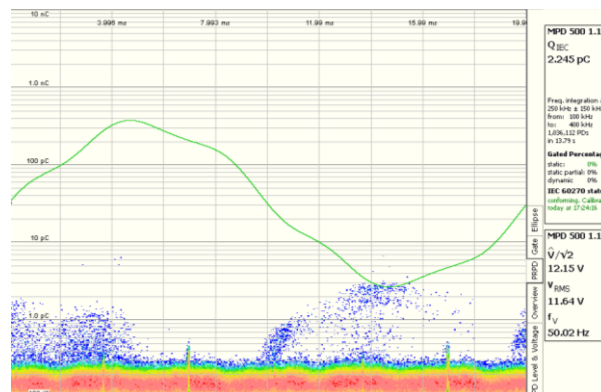


Figura 5.6-Deteção de DP's no isolador 1 com base na resolução em ângulo de fase segundo um sinal C.A. aplicado a 43,2 kV.

○ *Ensaio às DP's à tensão de 24,9 kV*

Neste ensaio não se regista a tensão de extinção, que corresponde à tensão quando a amplitude das DP's é menor que 1 pC, pois essa sucedeu-se aos 28 kV. Os requisitos para este ensaio é que amplitude máxima das DP's não ultrapasse 5 pC. Segundo a Figura 5.7 observa-se que o valor máximo de DP's foi de 314,6 fC, que é menos de 10 % do valor limite, logo, conclui-se que nesta tensão a travessia apresenta um comportamento ideal.

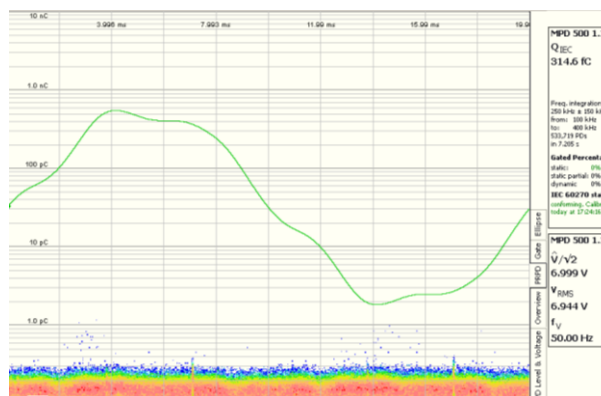


Figura 5.7-Deteção de DP's no isolador 1 com base na resolução em ângulo de fase segundo um sinal C.A. aplicado a 24,9 kV.

○ *Análise por RX*

Após os três ensaios, o modelo de travessia coloca-se numa máquina de RX para analisar as alterações à sua estrutura interna e dos seus componentes, no seguimento dos ensaios. Com o auxílio de um apoio observa-se a peça em perfis frontais e superiores. Do que se observa nas Figura 5.8 e Figura 5.9 não há pontos de quebra na resina epoxy, nem nas resistências. Estas apresentam-se íntegras e sem defeitos formando aproximadamente uma hélice, que começa na parte superior da malha junto ao aro superior e rodeia o condutor de AT como delineado. Na Figura 5.9 é possível observar-se as sombras dos três braços que amarram a malha aos insertos centrais e do fio que está junto à malha e, liga a última

resistência ao PCB. Ao analisar estas figuras conclui-se que internamente não há alterações na travessia, pelo que apresenta condições para avançar para o ensaio do impulso atmosférico.

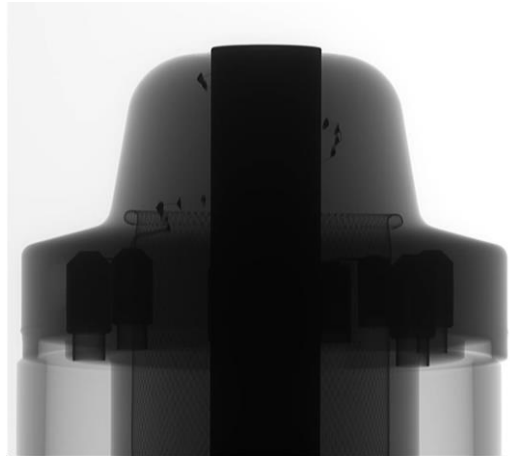


Figura 5.8-Vista em planta do perfil frontal do isolador 1 em RX.

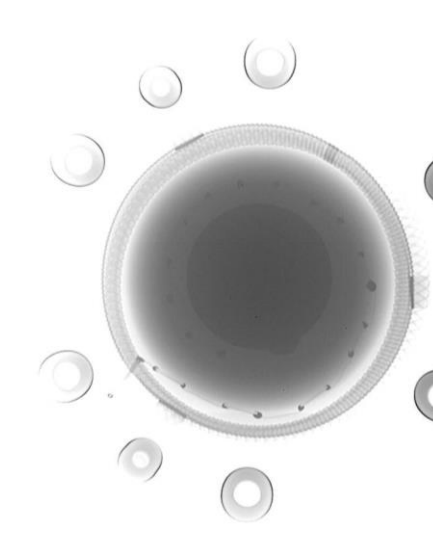


Figura 5.9-Vista em planta do perfil superior do isolador 1 em RX.

### 5.2.2 Isolador 2 com 3ª cadeia resistiva

- *Ensaio à rigidez dielétrica a 70 kV*

A segunda réplica cumpre os requisitos deste ensaio, pois não houve alterações físicas visíveis em relação à sua superfície. Tal como na primeira réplica também é feita uma análise pelo RX, de modo a certificar a peça após os ensaios a que é sujeita.

À tensão de ensaio são assinaladas DP's de 26 pC, como está ilustrado na Figura 5.10. Nessa figura as DP's têm um comportamento bastante mais linear, de acordo com a fase do sinal original (sinusoide a verde), do que na primeira réplica para a mesma tensão. Nesta deteção as DP's apresentam amplitudes bastante semelhantes no 1º e 3º quadrantes, o que significa que se repetem meio ciclo depois. Estes atributos indicam que a causa para a ocorrência de DP's pode surgir devido a bolhas de ar no interior da peça, involuntariamente na resina ou junto aos dois elétrodos (condutor de AT e malha), aquando da sua construção. Deste ensaio resulta a aprovação da travessia, relativamente aos parâmetros

de rigidez dielétrica, por não terem ocorrido fraturas visíveis, ainda que seja necessário fazer uma leitura da peça em RX. Ressalva-se que neste patamar de tensão a intensidade das DP's é baixa.

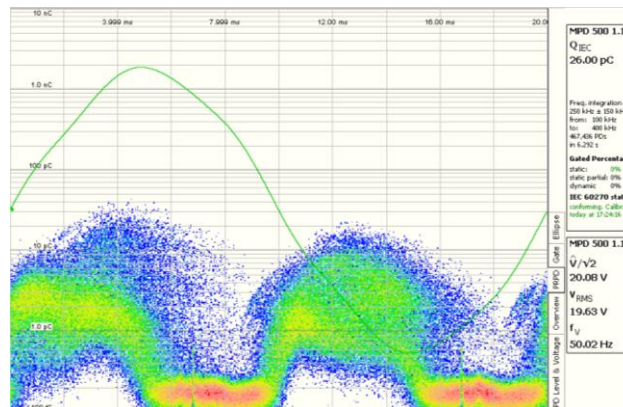


Figura 5.10-Deteção de DP's no isolador 2 com base na resolução em ângulo de fase segundo um sinal C.A. aplicado a 70 kV.

○ *Ensaio às DP's à tensão de 43,2 kV*

Neste ensaio às DP's, verifica-se uma descida da sua intensidade proporcional com a tensão, registrando um valor máximo de 4,56 pC, como se pode observar pela Figura 5.11. As DP's têm novamente maior distribuição no 1º e 3º quadrante do sinal original, mantendo-se a resposta do sistema. Essa resposta subentende que as pequenas falhas estão associadas a cavidades. Apesar destes dados o valor de DP's está dentro dos parâmetros, sendo inferior em 50 % ao valor máximo (10 pC) e, portanto, ao aplicar esta tensão não se revelam problemas relativos a DP's.

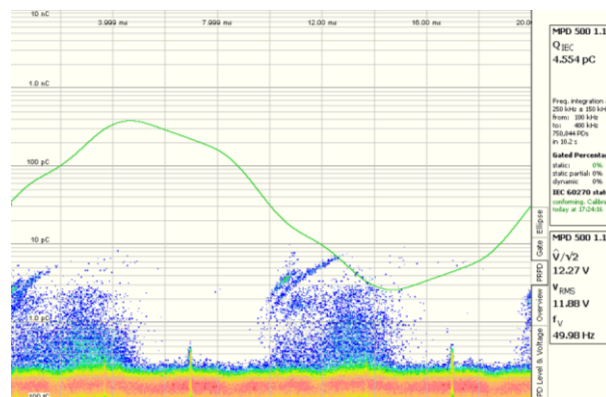


Figura 5.11-Deteção de DP's no isolador 2 com base na resolução em ângulo de fase segundo um sinal C.A. aplicado a 43,2 kV.

○ *Ensaio às DP's à tensão de 24,9 kV*

No último ensaio de DP's desta travessia regista-se descargas de 2,74 pC, como se pode observar na Figura 5.12. A densidade de descargas com amplitude significativa é praticamente nula. A amplitude máxima da DP está sensivelmente a 50 % abaixo do valor máximo permitido nesta tensão (5 pC) e, por isso, infere-se que para este fenómeno a travessia corresponde de forma positiva. A tensão de extinção acontece depois da tensão deste ensaio descer para 20 kV.

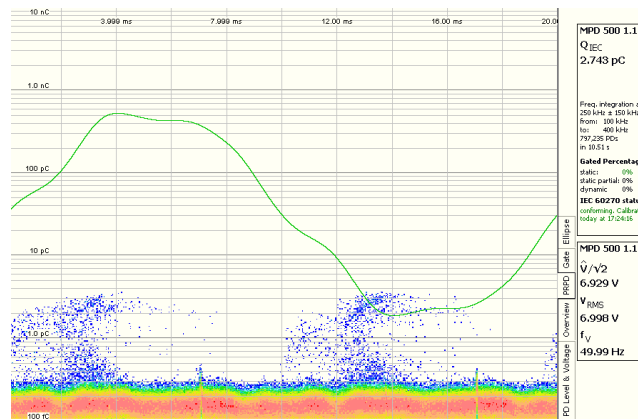


Figura 5.12-Deteção de DP's no isolador 2 com base na resolução em ângulo de fase segundo um sinal C.A. aplicado a 24,9 kV.

○ *Análise por RX*

Segundo o perfil frontal em RX, representado na Figura 5.13, não se deteta presença de cavidades, sendo que o único ponto diferenciador é na parte superior do condutor de AT, uma marca da soldadura que liga o fio condutor da resistência ao condutor de AT. Relativamente à Figura 5.14, a travessia não está numa vista totalmente superior, mas conclui-se que geometricamente a cadeia resistiva não se distribui tão bem como no “isolador 1”. Isto leva à alteração da distribuição do campo elétrico e consequentemente as amplitudes das DP's são maiores que as do “isolador 1”. Segundo o RX e tal como na primeira réplica, nesta vista não é possível observar pontos associados a cavidades gasosas.

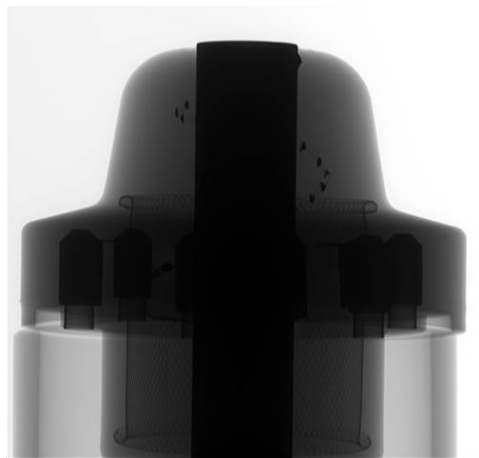


Figura 5.13-Vista em planta do perfil frontal do isolador 2 em RX.



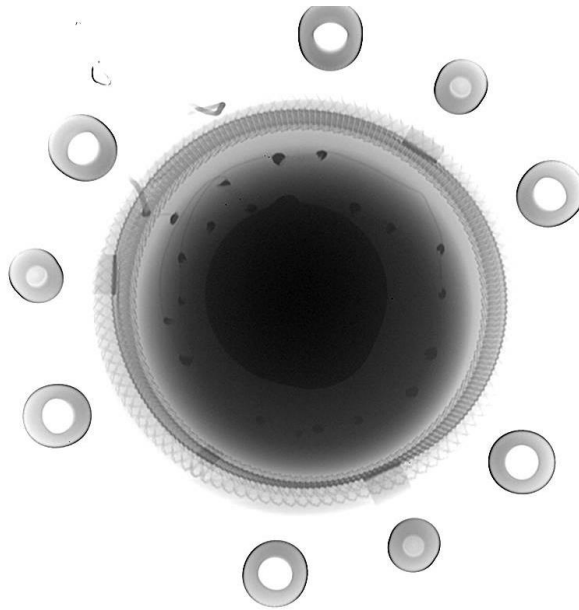


Figura 5.16-Vista 1 em planta do perfil superior do isolador 3 em RX.



Figura 5.17-Vista 2 em planta do perfil superior do isolador 3 em RX.

### 5.3 Escolha do melhor modelo

Para haver uma detecção exata do sinal, analisa-se primeiro a integridade da cadeia resistiva por duas medições, em corrente contínua e alternada (C.A. e C.C.), do valor da resistência equivalente. Estas medições foram aplicadas aos modelos que contêm a terceira cadeia resistiva (isoladores 1 e 2).

As medições dos dois isoladores em C.C. foram feitas com um multímetro que registou a resistência, entre o condutor de AT (local onde liga a primeira resistência) e o fio da última resistência do conjunto de dez que sai pelo furo.

Já em C.A. , a travessia é colocada dentro de uma gaiola de Faraday, como se observa na Figura 5.18, em que o condutor de AT é ligado a um dado potencial. Na travessia é aparafusado um disco de metal (que simula a chapa do transformador), para estabelecer a malha e os insertos de latão ao potencial da terra. Após isso liga-se o multímetro de bancada de alta precisão (o aparelho tem a denominação de *fluke 8845 A*) ao BNC, que por sua vez está ligado ao fio da extremidade de  $R_L$ . Pelo sinal conseguido, fica-se a saber a tensão que foi dividida e comparada com a tensão imposta no condutor, obtendo-se o fator de divisão para finalmente alcançar o valor da resistência equivalente.

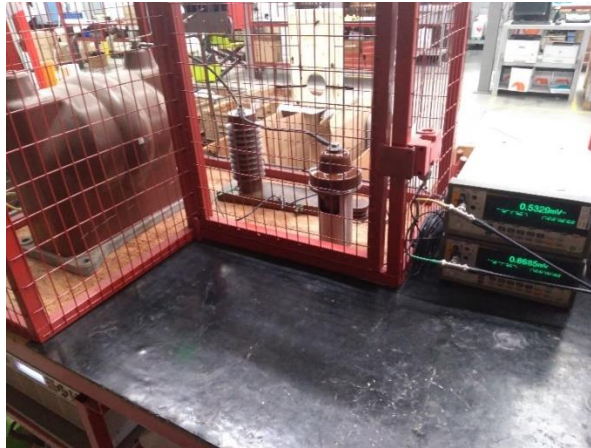


Figura 5.18-Medida da resistência equivalente C.A.

As medições da resistência equivalente nos dois isoladores deveriam dar 200 M $\Omega$ , porém observando os dados na Tabela 5.1 tal previsão não acontece.

Tabela 5.1-Medições em C.C. e C.A. da resistência equivalente da travessia.

Modelo	C.C.	C.A.	
	Resistência Equivalente (M $\Omega$ )	Resistência Equivalente (M $\Omega$ )	Desfasagem ( $^{\circ}$ )
Isolador 1	189	182	3,3
Isolador 2	185,8	179	5,1

Daqui retira-se que o valor nominal da cadeia alterou um pouco em C.C. e C.A, sendo que a situação mais crítica foi em C.A, onde o valor da resistência equivalente diminuiu nos dois casos sensivelmente cerca de 10 %. A explicação feita sobre a detecção de sinal no terceiro capítulo, tal como a parte relativa às capas de estanho das resistências, provocarem um efeito capacitivo no circuito elétrico presente na travessia é assim confirmada.

De salientar que os melhores resultados são obtidos com o isolador 1, pois em C.C. e C.A. é este modelo que tem um valor de resistência equivalente mais próximo do valor teórico e onde o efeito capacitivo é menor, daí ter menor desfasagem. A diferença do efeito capacitivo entre estes dois modelos reside na disposição da cadeia resistiva no interior da travessia, pois como foi disposta manualmente é óbvio que a probabilidade de ter erros geométricos face ao delineado em *software* é considerável. Porém se a montagem tivesse sido feita de um modo industrial, por projetista esse erro seria mínimo.

Para obter o melhor modelo é feito um resumo dos resultados dos ensaios na Tabela 5.2. Após a observação dessa tabela confirma-se novamente que é o isolador 1 que tem melhores resultados, pois em todos os ensaios é este que tem menor carga elétrica aparente associada a DP's. Todavia, os

resultados do isolador 2 também são bastante aceitáveis devido a ambas as travessias terem em comum a 3ª cadeia resistiva. Portanto comprova-se os resultados do capítulo anterior, em que as travessias com a introdução dessa cadeia representam um modelo mais resistente a defeitos e sobretensões que o modelo com a 1ª cadeia resistiva. Já relativamente à detecção do sinal de tensão a que a travessia está sujeita, não é possível estabelecer pontos de comparação devido aos problemas apresentados pelo isolador 3.

Tabela 5.2-Ensaio feitos nas duas réplicas do modelo 1

Tensão (kV)	70	70	43,2	24,9
Tipo de Ensaio	Ensaio Rigidez dielétrica (1 min)	Ensaio DP's (pC)	Ensaio DP's (pC)	Ensaio DP's (pC)
Isolador 1	Aprovado	24	2,24	0,30
Isolador 2	Aprovado	26	4,50	2,70

#### 5.4 Ensaio do impulso atmosférico

A fim de concluir se o modelo escolhido está projetado para cenários de sobretensões atmosféricas e ser lançado para o mercado, é feito o ensaio do impulso atmosférico sobre o isolador que obteve melhores resultados nos ensaios anteriores, correspondente ao isolador 1, representado na Figura 5.19.



Figura 5.19-Modelo do isolador de travessia 1.

O ensaio é feito no laboratório de AT da Indisol. Neste são gerados impulsos de tensão C.C. pelo gerador de *Marx* até um dado valor de tensão, sobre o objeto de teste, para avaliar a eficácia do seu isolamento num cenário que simula as descargas atmosféricas. Antes de realizar os ensaios houve uma calibração ao nível das resistências de cada andar e, consoante a tensão de impulso em estudo, calibrou-se a tensão de disparo exercida nas esferas para obter a melhor forma de onda. Neste ensaio é imposta a tensão do gerador nos n andares de condensadores em paralelo e entre cada andar existem disruptores de esferas. Quando os condensadores estiverem todos com a tensão designada pelo utilizador, os disruptores disparam para colocar todos os condensadores em série e assim a tensão aos terminais da peça de análise passa a ser n vezes a tensão contínua do gerador.

Ora o laboratório da Indisol tem três andares em paralelo com um condensador em cada um, como se pode observar na Figura 5.20. Cada um destes andares tem uma tensão máxima de carga de 100 kV.

Para realizar este ensaio procedeu-se à montagem do circuito, ao qual foi conectado modelo do isolador 1, representada na Figura 5.21.



Figura 5.20-Ensaio do impulso, andares com condensador.



A



B

Figura 5.21-Circuito do ensaio do impulso atmosférico. A-Montagem do circuito. B-Ligação de AT que submete a travessia ao impulso.

Os ensaios foram feitos segundo as condições atmosféricas representadas na Tabela 5.3, que estão em conformidade com o estipulado na norma IEC 60060-1 [19].

Tabela 5.3-Condições atmosféricas do ensaio de impulso atmosférico.

	Temperatura (°C)	Humidade (%)	Pressão (hPa)
Ensaio impulso atmosférico	18,5	60	1018

Pela experiência de outros ensaios de impulso, estes iniciam-se a uma tensão mais baixa, correspondente a uma travessia de tensão nominal de 24 kV, ou seja, a 125 kV, como se pode confirmar pelos valores da norma do Anexo III. Adotou-se este procedimento, pois se ocorrer fratura na peça sabe-se qual a sua tensão limite.

Os resultados à tensão de 125 kV foram aprovados, pois as ondas obtidas apresentaram o comportamento de acordo com os requisitos enunciados no segundo capítulo. Apesar de nos gráficos

dos impulsos as suas ondas estarem visivelmente bastante próximas, estes foram realizados com intervalos de 30 segundos e estão representados no Anexo V.

Gradualmente, aumentou-se os valores dos impulsos aplicados à travessia, sendo que os resultados foram satisfatórios até 165 kV. Entre essa tensão e os 170 kV houve fratura (audível e visível) na peça, cujos efeitos podem ser observados na Figura 5.22 pois no ensaio a 170 kV em  $1 \mu s$  é atingida a tensão de pico e em  $5,16 \mu s$ , que é o tempo de corte, a tensão diminui instantaneamente para valores quase nulos.

Este comportamento, representado na Figura 5.24, é diferente do previsto, pelo que se conclui que a esta tensão o ensaio teve resultados negativos.



Figura 5.22-Aspetto exterior da travessia, após o ensaio do impulso.

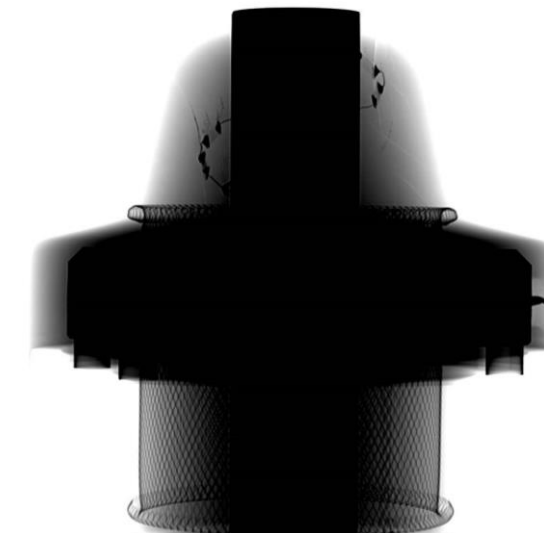


Figura 5.23-Resultado físico da travessia após o ensaio do impulso (interior).

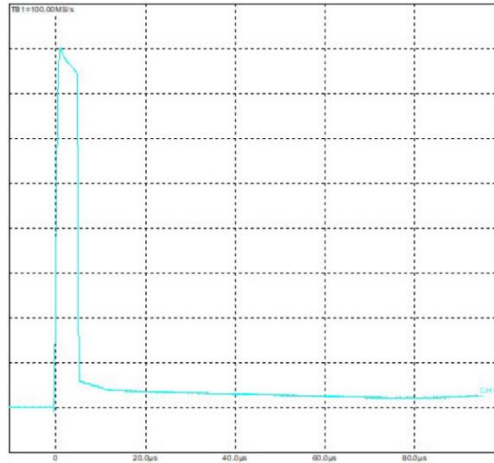


Figura 5.24-Ensaio de impulso atmosférico a 170 kV.

Após este ensaio, conclui-se pela Figura 5.23, que a parte superior da travessia ficou bastante danificada, registrando fissuras que se propagam no seu interior. Após o ensaio a resistência equivalente da travessia é medida e os valores referidos atrás mantiveram-se, pelo que a aplicação desta cadeia não está posta em causa. Um dos motivos que pode originar a falha da cadeia resistiva é a reduzida distância entre as resistências mais próximas do condutor de AT e o próprio. Além disso verifica-se uma sombra junto à resistência que passa à esquerda por detrás do condutor de AT, indicando a criação de cavidades gasosas na vizinhança dessa componente.

Os gráficos produzidos via *software*, em fábrica, para os patamares de tensão de 125, 135, 145 e 165 kV encontram-se no Anexo V. Na maioria destes gráficos o tempo de subida ocorreu em  $0,99 \mu\text{s}$ , o que de acordo com *Schon* [21] não é um problema, pois este valor encontra-se dentro da tolerância de  $\pm 30 \%$  para este tempo.

## 5.5 Resumo final

Ao avaliar os ensaios em fábrica é possível recolher informação de modo a fazer uma analogia com as simulações em *software*. Nesse *software* a única previsão possível das DP's foi feita pela análise do campo elétrico, nesta apenas houve problemas no ensaio da rigidez dielétrica (70 kV) na presença de bolhas de ar na travessia. Pelo estudo dos ensaios (descargas parciais e rigidez dielétrica) das duas peças com a 3ª cadeia resistiva integrada, o qual está representado na Tabela 5.2, infere-se que a produção e integração das cadeias resistivas na travessia foi um pormenor diferenciador relativamente ao valor das DP's.

Neste projeto houve algumas discordâncias, nomeadamente o impedimento da construção do modelo delineado (exatamente de acordo com o *software* de desenho), por não refletir fisicamente o modelo proposto. Além disso a restrição deste ensaio apenas a uma tipologia (pelo erro de ligação do circuito elétrico no “isolador 3”) tornou os seus resultados um pouco redutores. No futuro a construção fiel da tipologia à forma dimensionada permitirá enriquecer a informação útil para alcançar o objetivo delineado.

Seria vantajoso aumentar a rigidez dielétrica do meio isolante para ficar mais robusto a sobretensões, mas isso exigiria substituir o material por outro, o que possivelmente não será praticável. Relativamente às resistências, o problema será resolvido com o aumento do número dessas componentes e com a escolha de outro modelo que possua uma potência dissipada mais elevada. Sugere-se uma melhoria no seu desempenho caso se verifique uma estabilidade das distâncias da cadeia resistiva ao condutor de AT e ao limite superficial da travessia, para o seu valor ótimo. Com o dimensionamento e

introdução de condensadores no circuito de BT será possível anular o efeito capacitivo produzido pelas capas de estanho no circuito de AT e, conseqüentemente a defasagem obtida na medida C.A. da cadeia resistiva.

De frisar que a Indisol tem vindo a fazer um estudo intensivo para alcançar o limite que cumpra as expectativas da travessia, para a tensão nominal de 36 kV. No entanto, apesar da travessia não cumprir o ensaio do impulso atmosférico para a tensão respetiva de 170 kV, conclui-se pela Tabela 5.4 que o resultado desejado está plenamente ao alcance, podendo os aspetos acabados de referir surtir o efeito desejado num futuro próximo.

Tabela 5.4-Resultados ao ensaio do impulso atmosférico.

Ensaio de Impulso	Resultado da travessia
2 conjuntos de 15 impulsos a 125 kV	Aprovada
135 kV	Aprovada
145 kV	Aprovada
165 kV	Aprovada
170 kV	Reprovada

## 6 Conclusões

O presente capítulo faz uma síntese do que foi documentado neste projeto, relativamente aos principais passos da modelação do isolador de travessia, resultados de simulação e dos ensaios em fábrica, de modo a conciliar a melhoria de um projeto de mestrado com as necessidades da empresa Indisol face à aplicação dos isoladores de AT.

O isolador de travessia foi a peça de estudo. Como já referido no segundo capítulo, os materiais isolantes quando sujeitos a AT por vezes originam alguns problemas como descargas parciais e disrupção de materiais. Estes problemas ocorrem em função das alterações das propriedades elétricas dos componentes presentes no sistema, que muitas vezes acontecem devido a campos elétricos intensos.

De forma a estabelecer a melhor relação com a realidade foi construído um modelo tridimensional, com base no desenho técnico de produção do modelo de travessia “*Pasatapas*”, presente no Anexo I e utilizado pela empresa.

O principal objetivo da dissertação foi a implementação de uma deteção do sinal da tensão da travessia, através de uma cadeia resistiva. Para essa cadeia resistiva foram utilizados modelos com que a empresa outrora teve contacto. O dimensionamento foi realizado tendo em conta o ensaio da rigidez dielétrica (70 kV) e atribuiu um conjunto de dez resistências, cada uma no valor de 20 M $\Omega$ . Desse modo, elaboraram-se algumas tipologias de cadeias resistivas no *software* de desenho, para introduzir na travessia e analisar o seu comportamento em regimes de funcionamento normal e de anomalias. Pelo desconhecimento de desenho técnico, a construção dos seus modelos foi feita numa ótica de tentativa e erro. Esta foi uma parte do projeto que envolveu muito contacto com o *software* de desenho, de modo a estreitar a relação do modelo delineado com a realidade. Estas tipologias foram desenhadas com base numa hélice, colocada em redor do condutor de AT.

Através de um *software* de elementos finitos realizaram-se simulações elétricas sobre os vários modelos propostos, nas quais se estudou a norma do campo elétrico e a diferença de potencial entre o condutor de AT e os diversos componentes no interior da travessia. A análise contemplou dois cenários: o primeiro, com a alteração da geometria da malha que faz a ligação à terra (potencial nulo) e o segundo, com a introdução de ocos (bolhas de ar) nas três tipologias de cadeias resistivas. O estudo fez-se para cadeias de oito resistências, pois se resultasse para a menor quantidade de resistências, também seria possível replicar a analogia para uma cadeia de dez resistências, que foi a estipulada.

Nas cadeias propostas, o local de estudo das resistências foi na maioria das vezes na sua superfície em cerâmico, apesar da primeira resistência das duas primeiras cadeias o local ter sido diferente, o que proporcionou valores de campo elétrico abaixo da média. Os resultados obtidos demonstram que as resistências da 2ª e 3ª cadeia estiveram sujeitas a campos elétricos parecidos e intensos, o que é obvio visto que as cadeias foram restringidas apenas a um modelo de resistência. Tal facto é apoiado pela geometria plana dessa componente que, devido às suas arestas possui raios de curvatura teoricamente nulos e como tal aumenta consideravelmente o campo elétrico nessas zonas. Portanto, as únicas formas de reproduzir pequenas diferenças nas simulações elétricas foram: alterar o raio de curvatura dos aros da malha e a disposição do circuito elétrico.

Os resultados mais satisfatórios foram alcançados quando o ângulo de curvatura do aro da malha foi maior com a segunda cadeia resistiva. Este dado está diretamente relacionado com os elevados

campos elétricos associados a reduzidos raios de curvatura. Os valores usados, para comparação das tipologias no capítulo quatro, encontram-se representados na Tabela 6.1. Da observação da tabela, para conjuntos de oito resistências (situação mais crítica) o caso com melhores resultados corresponde à 2ª cadeia resistiva. No entanto, a solução utilizada neste projeto foi a terceira cadeia resistiva, porque apesar da segunda cadeia ter a menor média de campo elétrico e o desvio padrão da d.d.p face ao valor teórico ser baixo, não foi possível estabelecer a sua montagem no interior da travessia. Por conseguinte a escolha dos resultados das simulações elétricas foi filtrada para a cadeia exequível nos processos de produção de fábrica. Em suma, na tipologia escolhida a integridade elétrica dos componentes da travessia foi assegurada e fez-se uma deteção do sinal da tensão com valores perto do expectável. De referir que, em simulação, as bolhas de ar perto da superfície das resistências não influenciaram o valor da norma de campo elétrico nesses componentes.

Tabela 6.1- Comparação das três cadeias resistivas segundo o campo elétrico para oito e dez resistências.

	Conjunto de oito resistências			Conjunto de dez resistências
	Campo elétrico médio 1ª cadeia resistiva ( $\overline{E_{1a}}$ ) (MV/m)	Campo elétrico médio 2ª cadeia resistiva ( $\overline{E_{2a}}$ ) (MV/m)	Campo elétrico médio 3ª cadeia resistiva ( $\overline{E_{3a}}$ ) (MV/m)	Campo elétrico médio 3ª cadeia resistiva ( $\overline{E_{3a}}$ ) (MV/m)
Cenário sem anomalias	1,46	0,78	0,93	0,77
Cenário com anomalias	1,53	1,13	1,20	-

Com o modelo delineado foi executada uma simulação final, à tensão de 70 kV que verifica a rigidez dielétrica da peça. Neste ensaio analisa-se a probabilidade de disrupção do isolador quando submetido à sua tensão máxima, durante um minuto. Os resultados das grandezas de estudo nas simulações dos cenários, normal e de disrupção, aumentaram na mesma proporção que a subida de tensão nos mesmos (de 17,32 kV para 70 kV). Visto que foi utilizado um regime estacionário, não há elo de comparação por ser impossível observar níveis de fratura no domínio temporal via *software*. Nesta simulação concluiu-se que caso existam ocos dentro do isolador a ocorrência de descargas parciais é certa.

Em fábrica foram realizados três tipos de ensaios: às descargas parciais, rigidez dielétrica e impulso atmosférico. Foram testadas duas réplicas do modelo com a 3ª cadeia e uma réplica do modelo com a 1ª cadeia. Não foi possível estabelecer uma comparação entre modelos, porque a travessia com a 1ª cadeia teve um erro ao nível do seu circuito elétrico, que resultou na sua inutilidade. As duas réplicas com a 3ª cadeia passaram nos ensaios das descargas parciais e sucessivamente ao ensaio da rigidez dielétrica. Para o ensaio do impulso foi selecionada a réplica que registou valores de descargas parciais menores e com a resistência equivalente mais próxima do valor teórico. No ensaio do impulso a 170 kV, a travessia reprovou devido ao campo elétrico deveras intenso que ocorreu na parte superior da peça e provocou fissuras no material. Como nessa localização esteve presente a cadeia resistiva, desencadeou-se a disrupção na resina.

Apesar do trabalho realizado em *software* para aproximar o isolador da realidade e das várias técnicas utilizadas em fábrica, para obter estabilidade na travessia os objetivos pretendidos não foram alcançados. A fratura aconteceu numa tolerância de 5 kV antes da tensão de ensaio. Contudo para a solução pretendida, a tensão do ensaio do impulso está a 5 kV de ser alcançada.

Para colmatar este defeito algumas soluções são apresentadas para aumentar o desempenho:

Mudar para um meio isolante com rigidez dielétrica superior ao atual (apesar de não ser viável econômica e produtivamente), o que aumentaria o campo de disrupção;

Aumentar o número e o tipo de resistências da cadeia resistiva, para modelos com potências dissipadas superiores.

## 6.1 Trabalhos futuros

Neste ponto apresenta-se as temáticas que são pertinentes ser exploradas como continuação desta dissertação, além das últimas soluções propostas para a travessia ser aprovada no ensaio do impulso a 170 kV.

Construção, fiel aos desenhos técnicos, da cadeia que em *software* revelou melhores resultados ao nível do campo elétrico (2ª cadeia resistiva), com posteriores ensaios à frequência industrial.

Como a precisão do valor nominal das resistências varia de forma distinta num ambiente a ar ou dentro da resina, um estudo do efeito térmico das resistências contribuiria para avaliar se este é o melhor modelo a utilizar na detecção de sinal da travessia e desse modo elevar a exatidão do sinal obtido.

Através da análise dos resultados ficou demonstrado que a mudança da disposição do circuito, induz alterações de resultados nas grandezas de estudo. Desta forma é sugerido fazer um estudo que concilie menores resultados de campo elétrico sobre as resistências e diferenças de potencial perto dos valores teóricos, pelo desenvolvimento de um algoritmo genético que aponte a melhor disposição da cadeia resistiva dentro do isolador.

Com a intenção de obter um “sensor” de tensão, a partir desta travessia foi feita uma amostragem da AT, pela divisão de tensão obtida por meio da cadeia resistiva. Para atingir essa meta é necessário filtrar o sinal de tensão corretamente. Do relato da empresa, caso existam corpos com tensão na vizinhança da travessia (exemplo: outros condutores de AT) o sinal detetado nesta é influenciado por esses corpos exteriores, em amplitude e fase. Isto corresponde ao acoplamento capacitivo que esses corpos reproduzem na travessia e o objetivo é redimensionar a peça. Sugere-se como mudança na peça a introdução de condensadores no circuito de BT, para equilibrar o efeito capacitivo sentido no lado de AT e dessa forma ser insensível a tensões parasitas. Após esse redimensionamento terá de se fazer ensaios em fábrica até se verificar o comportamento esperado.

Por último e fazendo ponte com o ponto anterior, a empresa pretende modelizar o comportamento da travessia independentemente da frequência, ou seja, que a travessia tenha o mesmo rácio de divisão da tensão, quer em C.C., quer em C.A. Como as resistências da cadeia acrescentam efeito capacitivo no interior da peça pelas capas de estanho, a manutenção desse rácio exige que em todas as resistências seja igual a constante de tempo RC, relativa ao produto do valor de cada resistência pela sua capacidade associada. Uma sugestão para obter isto seria dimensionar condensadores a colocar em paralelo com as resistências, de menor capacidade, de forma a igualar todos os valores de RC. Isto deveria ser feito, quer no circuito de alta, quer no de baixa tensão. Esta abordagem teria de ser estudada teoricamente e aplicada na prática em fábrica, para permitir que a divisão de tensão fosse independente da frequência, tornando o divisor utilizável em redes que incluam dispositivos de eletrónica de potência.



## 7 Revisão Bibliográfica

- [1] H.I. Septyani, I. Arifianto e A.P. Purnomoadi, “High Voltage Transformer Bushing Problems”, Apresentada em ICEEI, Bandung. [Em linha]. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6021566/>
- [2] S. Ray, *An Introduction to High Voltage Engineering*, New Delhi, India: P.Learning 2011.
- [3] R. Arora e W. Mosch, *High Voltage Insulation Engineering*. New Jersey, EUA: New Age International Ltd Publishers, 1995.
- [4] M.Ventim Neves, “Campos electrostáticos” - Edição interna para apoio a unidades curriculares de Energia, Departamento de Engenharia Electrotécnica, Faculdade de Ciência e Tecnologia, 2014, Almada, Portugal.
- [5] J.P. Holtzhausen e W.L. Vosloo, *High Voltage Engineering Practice and Theory*, U. of Stellenbosch, 2008
- [7] C.L. Wadhwa, *High Voltage Engineering*. New Delhi, India: New Age Science, 2010.
- [7] P.M.S. Dias, “Isolador de Travessia para Alta Tensão: Melhoria do Seu Projecto Usando um Programa de Elementos Finitos”, Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Electrotécnica, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Almada, Portugal, 2012.
- [8] W. Cuenca, “Caracterização dos Sinais de Descargas Parciais em Equipamentos de Alta Tensão a Partir de Modelos Experimentais”, Tese de doutoramento, Departamento de Engenharia Electrotécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- [9] “High-voltage test techniques-Partial discharge measurements”, IEC 60270, 2000.
- [10] E. Gulski, “Digital Analysis of Partial Discharges”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 2, no 5, pp 822-837, Out. 1995. [Em linha]. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/469977/>. Consult. 26 Jan. 2018.
- [11] E. Gulski, F.H. Kreuger e A. Krivda, “Classification of partial discharges”, IEEE transactions on electrical insulation, vol. 28, no 6, pp. 917-931, Dez. 1993. [Em linha]. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/249365/>. Consult. 27 Jan. 2018.
- [12] D.A. Natrass, “Partial Discharge Measurement and Interpretation”, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 4, no 3, pp. 10–23, Mai/Jun. 1988. [Em linha]. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/830/>. Consult. 27 Jan. 2018
- [13] G.C. da Silva, “Descargas Parciais Estimuladas por Raios-X Contínuo e Pulsado em Materiais Dielétricos: Similaridades e Diferenças”, Tese de doutoramento, Departamento de Engenharia Electrotécnica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2005.
- [14] I.J. Kemp, “Partial Discharge Plant-Monitoring Technology: Present and Future Developments” IEE Proc. – Science, Measurement and Technology, vol. 142, no 1, pp. 4-10, Jan. 1995. [Em linha]. Disponível em: [https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-smt\\_19951438/](https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-smt_19951438/). Consult. 29 Jan. 2018
- [15] H.M. Ryan, *High-Voltage Engineering and Testing High-Voltage Engineering and Testing*, Londres, Reino Unido: CPI Group, 2013.
- [16] J. Rennie. [Consult.]: 20-Set-2018. “What is meant by Creep Distance in Insulator Design?” [Em linha]. Disponível em: <https://peakdemand.com/what-is-meant-by-creep-distance-in-insulator-design/>.

- [17] Euromold, “Catalogue - Medium voltage symmetrical separable connectors Nexans Network Solutions.” 2011.
- [18] M. Akbari, M. Allahbakhshi e R. Mahmoodian, “Heat Analysis of the Power Transformer Bushings in the Transient and Steady States Considering the Load Variations” *Applied Thermal Engineering*, 2017.
- [19] “High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements”, IEC 60060-1, 2010.
- [20] “Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V”, IEC 60137, 2017.
- [21] K. Schon, *High Impulse Voltage and Current Measurement Techniques*, Braunschweig: Springer, 2013.
- [22] R. Marx, “New Concept of PTBs Standard Divider for Direct Voltages of up to 100 kV”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol 50, N°2, Abr, 2001.
- [23] S. Passon, I. Gitin e J. Meisner, “Investigating the properties of precision resistors for the application in high voltage DC dividers”, Apresentado em IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Braunschweig, Germany, Set. 28-30, 2016.
- [24] J. Bourolleau, “Small-sized precision high-voltage resistor in thick-film technology”, U.S. Patent 4 630 025, Dez 16,1985.
- [25] Fisica.net/Constantes, [Consult.] 19-Set-2018. “Condutividade térmica” [Em linha]. Disponível em: [http://www.fisica.net/constantas/conductividade-termica-\(k\).php](http://www.fisica.net/constantas/conductividade-termica-(k).php).
- [26] T. Dalglish, “Instrument Transformers”, IEC 61869, vol. 136, 2007.
- [27] D.L. Sengupta e V.V. Liepa, *Applied Electromagnetics and Electromagnetic Compatibility*, John Wiley & Sons, Inc, 2006.
- [28] M. Pereira, “Desenvolvimento e Caracterização do Cristal Cintilador de CsI (Ti) Utilizado como Detector de Radiação”, Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1997.
- [29] Eurocircuits, [Consult.]: 23-Fev-2018. “What is a Surface-Mount Device (SMD)? - Definition from Techopedia.” [Em linha]. Disponível em: <https://www.eurocircuits.com/smd-surface-mount-device/>.

# 8 Anexos

## 8.1 Anexo I

Nesta secção estão apresentados os desenhos técnicos do molde da peça e da malha que faz ligação à terra juntamente com os inserts *M4* e *M6*.

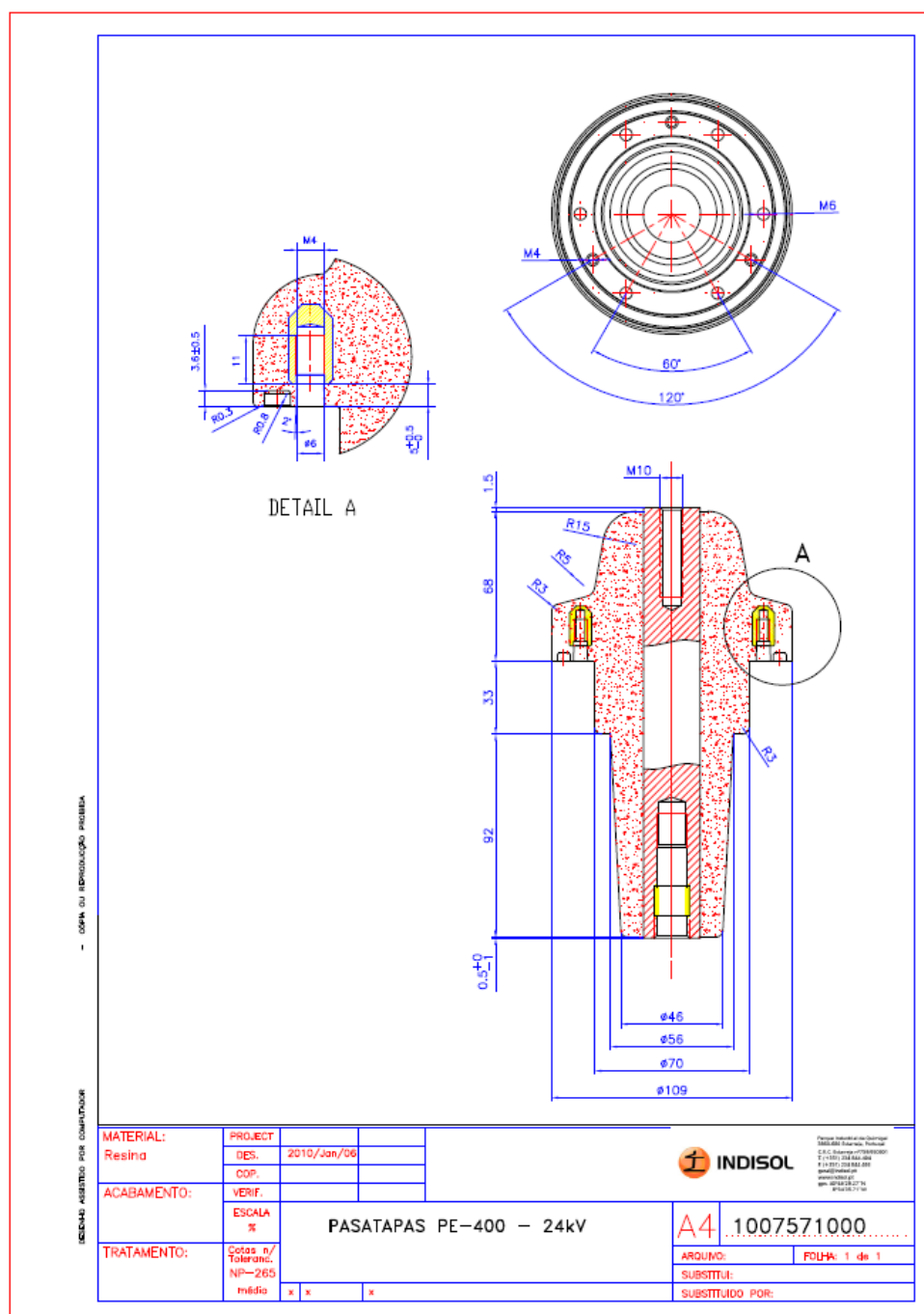


Figura 8.1-Desenho técnico molde do isolador de travessia.

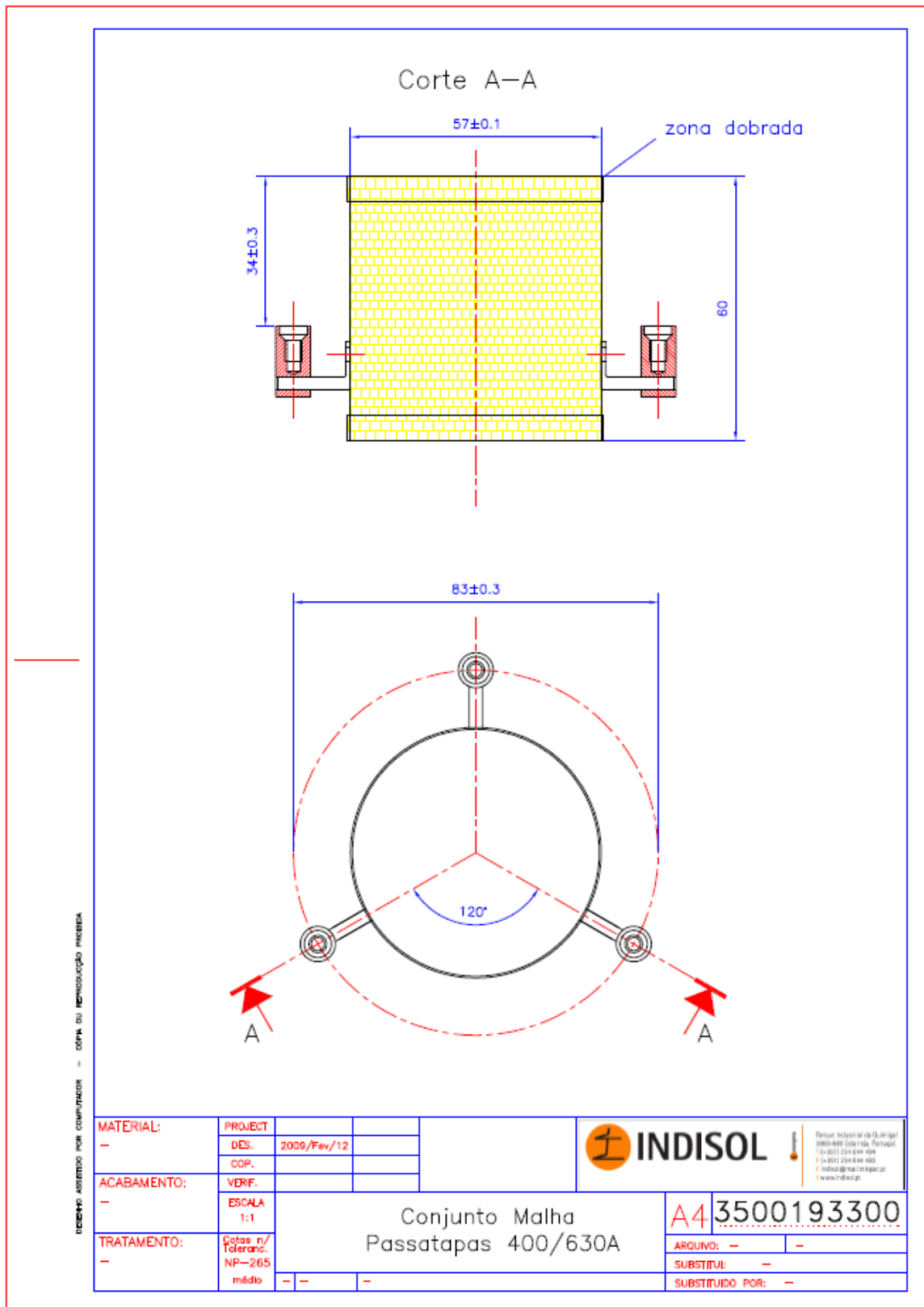


Figura 8.2-Desenho técnico conjunto malha e braços, que ligam ao potencial nulo.

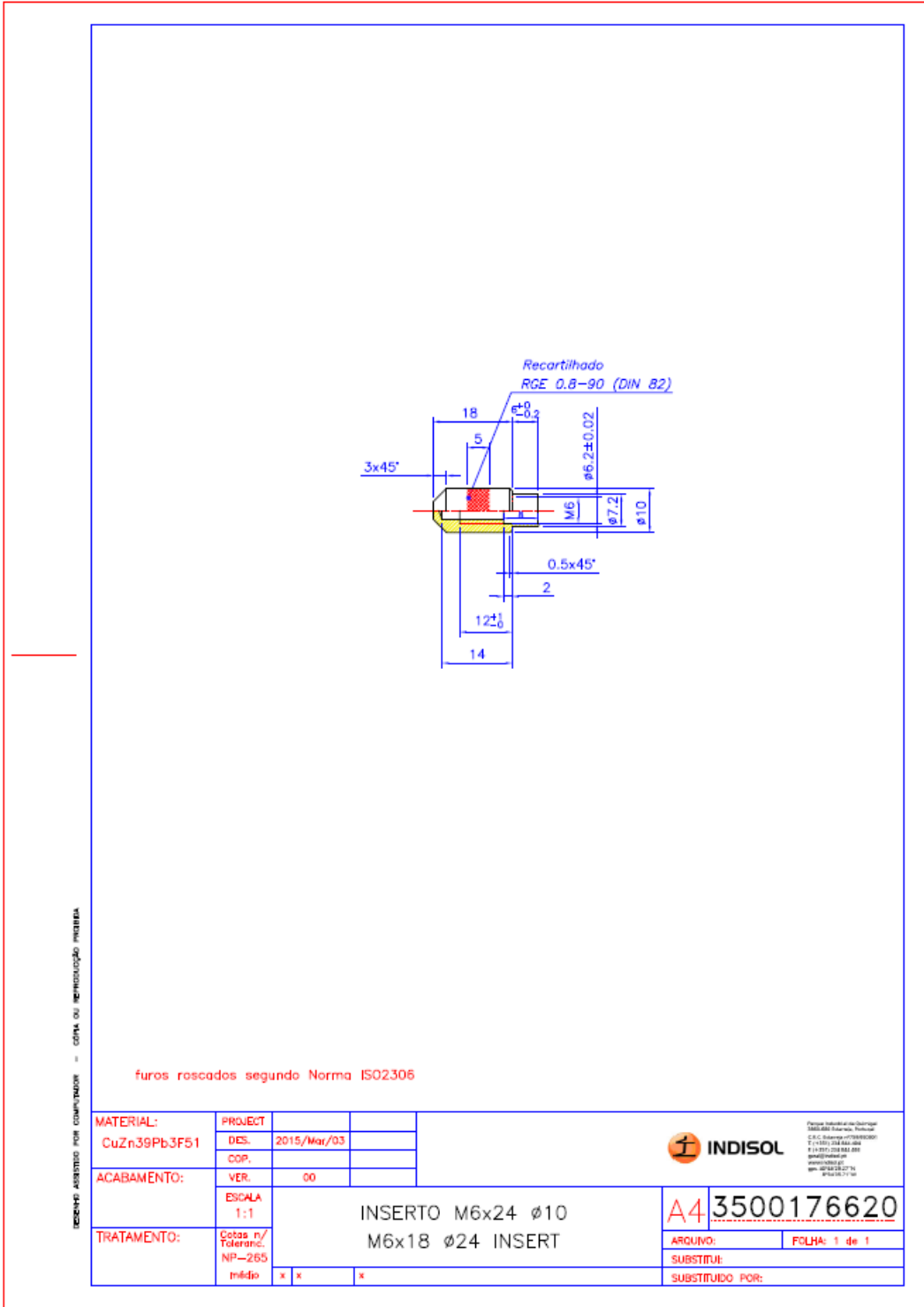


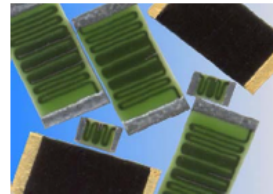
Figura 8.3-Desenho técnico inserto M6.

## 8.2 Anexo II

Nesta secção está exposto o catálogo das resistências utilizadas na empresa.



- Features:
- Ohmic values to 50G
  - Available with wire bondable terminations
  - Tight tolerances to 0.1%
  - Utilizes fine film resistor deposition technology
  - Superior pulse handling capabilities
  - Low TCR to 25 ppm/°C
  - Low VCR to 1 ppm/volt
  - Very low noise
  - Ultra high stability
  - Custom sizes available
  - Higher or lower resistance values may be available (contact factory)
  - Standard HVC parts are unmarked
  - RoHS compliant and halogen free



Electrical Specifications											
Type / Code	Power Rating (Watts) @ 70°C	Maximum Working Voltage <sup>(1)</sup>	Resistive Temperature Coefficient	Ohmic Range (Ω) and Tolerance							
				0.1%	0.25%	0.5%	1%	2%	5%	10%	20%
HVC0603	0.06W	400V	± 50 ppm/°C	-	10K - 10M	10K - 100M	10K - 500M				
			± 100 ppm/°C			10K - 500M	10K - 1G	10K - 1G			
			± 200 ppm/°C					10K - 10G	10K - 50G		
HVC0805	0.2W	600V	± 50 ppm/°C	-	10K - 10M	10K - 500M					
			± 100 ppm/°C			10K - 1G	10K - 1G				
			± 200 ppm/°C					10K - 10G	10K - 50G		
HVC1206	0.33	1500V	± 25 ppm/°C	1M - 100M	1M - 100M						
			± 50 ppm/°C	100K - 100M	100K - 500M						
			± 100 ppm/°C	10K - 100M	10K - 100M	10K - 500M	10K - 1G	10K - 1G			
HVC2010	1W	2000V	± 200 ppm/°C	1M - 100M	1M - 100M						
			± 25 ppm/°C	100K - 100M	100K - 100M	100K - 500M					
			± 50 ppm/°C	10K - 100M	10K - 100M	10K - 500M	10K - 1G	10K - 1G			
HVC2512	2W	3000V	± 100 ppm/°C	1M - 100M	1M - 500M						
			± 25 ppm/°C	100K - 100M	100K - 500M	100K - 1G					
			± 50 ppm/°C	10K - 100M	10K - 500M	10K - 1G	10K - 10G			100K - 10G	
HVC3512	3W	3500V	± 200 ppm/°C	1M - 100M	1M - 500M						
			± 25 ppm/°C	100K - 100M	100K - 500M	100K - 1G					
			± 50 ppm/°C	10K - 100M	10K - 500M	10K - 1G	10K - 10G			100K - 10G	
			± 100 ppm/°C	10K - 100M	10K - 500M	10K - 1G	10K - 10G				
			± 25 ppm/°C						100K - 10G		
			± 50 ppm/°C						100K - 50G		

Proper terminal isolation is required to achieve the voltage ratings for each given size.

(1) The continuous maximum voltage applied cannot exceed the maximum power rating and is ohmic value dependent.

Note: Other case sizes and tolerances are available.

Rev Date: 01/12/2018

1

This specification may be changed at any time without prior notice.  
Please confirm technical specifications before you order and/or use.

[www.seielect.com](http://www.seielect.com)  
[marketing@seielect.com](mailto:marketing@seielect.com)

Figura 8.4-Excerto do catálogo de resistências página 1.

Mechanical Specifications						
Type / Code	L Body Length	W Body Width	H Body Height (Max.)	a Top Termination	b Bottom Termination	Unit
HVC0603	0.063 ± 0.01 1.60 ± 0.25	0.031 ± 0.005 0.79 ± 0.13	0.020 0.51	0.010 ± 0.005 0.25 ± 0.13	0.012 ± 0.008 0.30 ± 0.20	inches mm
HVC0805	0.079 ± 0.01 2.01 ± 0.25	0.050 ± 0.005 1.27 ± 0.13	0.025 0.64	0.010 ± 0.005 0.25 ± 0.13	0.013 ± 0.008 0.33 ± 0.20	inches mm
HVC1206	0.126 ± 0.01 3.20 ± 0.25	0.063 ± 0.005 1.60 ± 0.13	0.030 0.76	0.010 ± 0.005 0.25 ± 0.13	0.020 ± 0.010 0.51 ± 0.25	inches mm
HVC2010	0.200 ± 0.01 5.08 ± 0.25	0.100 ± 0.005 2.54 ± 0.13	0.030 0.76	0.018 ± 0.010 0.46 ± 0.25	0.020 ± 0.010 0.51 ± 0.25	inches mm
HVC2512	0.250 ± 0.01 6.35 ± 0.25	0.125 ± 0.005 3.18 ± 0.13	0.030 0.76	0.020 ± 0.010 0.51 ± 0.25	0.024 ± 0.010 0.61 ± 0.25	inches mm
HVC3512	0.350 ± 0.01 8.89 ± 0.25	0.125 ± 0.005 3.18 ± 0.13	0.030 0.76	0.020 ± 0.010 0.51 ± 0.25	0.024 ± 0.010 0.61 ± 0.25	inches mm

Performance Characteristics	
Test	Typical Performance
Short Time Overload	0.1%
Load Life	0.1%
Temperature Cycle	0.1%
Moisture Resistance	0.1%
Shock	0.05%
Vibration	0.05%
Dielectric Withstanding Voltage	0.05%
Resistance to Soldering Heat	0.05%

Parameter	Typical
Operating Temperature	-55 °C to 150 °C
TCR	measured from 25 °C to 75 °C
Pulse Capability	10X rated wattage Consult factory for custom pulse applications
Resistance Value	Measured at 100V Consult factory for custom test voltages

Figura 8.5-Excerto do catálogo de resistências página 2.

### 8.3 Anexo III

Neste ponto estão representados os valores dos ensaios a que a travessia terá de ser sujeita segundo a norma IEC 61869 [26].

61869-1 © IEC:2007

– 19 –

**Table 2 – Rated primary terminal insulation levels for instrument transformers**

Highest voltage for equipment $U_m$ (r.m.s.) kV	Rated power-frequency withstand voltage (r.m.s.) kV	Rated lightning impulse withstand voltage (peak) kV	Rated switching withstand voltage (peak) kV
0,72	3	---	
1,2	6	---	
3,6	10	20 40	
7,2	20	40 60	
12	28	60 75	
17,5	38	75 95	
24	50	95 125	
36	70	145 170	
52	95	250	
72,5	140	325	
100	185	450	
123	185 230	450 550	
145	230 275	550 650	
170	275 325	650 750	
245	395 460	950 1 050	
300	395 460	950 1 050	750 850
362	460 510	1 050 1 175	850 950
420	570 630	1 300 1 425	950 1 050
550	630 680	1 425 1 550	1 050 1 175
800	880 975	1 950 2 100	1 425 1 550

NOTE 1 For exposed installations it is recommended to choose the highest insulation level.  
NOTE 2 In the case of instrument transformers intended to be installed in GIS, the rated power frequency withstand voltage levels according to IEC 62271-203 may be different,  
NOTE 3 For alternative levels, see IEC 60071-1.

LICENSED TO MECONL limited - RANCI/BANGAL ORE  
FOR INTERNAL USE AT THIS LOCATION ONLY, SUPPLIED BY BOOK SUPPLY BUREAU.

Figura 8.6-Ensaio de rigidez dielétrica e impulso atmosférico de acordo com a tensão nominal da travessia.

**5.3 Rated insulation levels**

**5.3.1 General**

For most of the values of highest voltage for equipment ( $U_m$ ), several rated insulation levels exist to allow application of different performance criteria or overvoltage patterns. The choice should be made considering the degree of exposure to fast-front and slow-front overvoltage, the type of neutral earthing of the system and the type of overvoltage limiting devices.

**5.3.2 Rated primary terminal insulation level**

The rated primary terminal insulation level of an instrument transformer shall be based on its highest voltage for equipment  $U_m$  according to Table 2.

Primary terminal intended to be earthed in service has  $U_m$  equal to 0,72 kV

For instrument transformers mounted on gas-insulated substations, the rated insulation levels, testing procedures and acceptance criteria, are according to IEC 62271-203. The applicable rated insulation levels are according to IEC 62271-203, Table 102 and 103, phase-to-earth insulation.

**5.3.3 Other requirements for primary terminals insulation**

**5.3.3.1 Partial discharges**

Partial discharge requirements are applicable to instrument transformers having  $U_m$  greater than or equal to 7,2 kV.

The partial discharge level shall not exceed the limits specified in Table 3. The test procedure is given in 7.3.2.2.

**Table 3 – Partial discharge test voltages and permissible levels**

Type of earthing of the neutral system	Instrument transformer type	PD test voltage (r,m,s) kV	Maximum permissible PD level pC	
			Type of insulation	
			immersed in liquid or gas	solid
Earthed neutral system (earth fault factor ≤ 1,4)	CT and earthed VT	$U_m$ $1,2 U_m / \sqrt{3}$	10 5	50 20
	Unearthed VT	$1,2 U_m$	5	20
Isolated or non effectively earthed neutral system (earth fault factor > 1,4)	CT and earthed VT	$1,2 U_m$ $1,2 U_m / \sqrt{3}$	10 5	50 20
	Unearthed VT	$1,2 U_m$	5	20

NOTE 1 If the neutral system is not defined, the values given for isolated or non-effectively earthed neutral systems are valid.  
 NOTE 2 The maximum permissible PD level is also valid for frequencies different from rated frequency.  
 NOTE 3 CT for current transformer and VT for voltage transformer.

**5.3.3.2 Chopped lightning impulse**

If additionally specified, instrument transformers other than GIS devices shall be capable to withstand a chopped lightning impulse voltage applied to its primary terminals having a peak value of 115 % of the rated lightning impulse withstand voltage.

Figura 8.7-Ensaio das descargas parciais de acordo com a tensão nominal da travessia.

LICENSED TO MECOM Limited - RANGHIRANGALORE FOR INTERNAL USE AT THIS LOCATION ONLY. SUPPLIED BY BOOK SUPPLY BUREAU

## 8.4 Anexo IV

Nesta secção está representada a ficha técnica do fluido dielétrico que se utiliza nos ensaios em fábrica para simular o meio de gás  $SF_6$ , presente no interior do transformador e a parte interior do conector isolante.

# Performance Fluid

## PF-5052

**Product  
Information**

### Introduction

3M<sup>®</sup> Performance Fluid PF-5052 is a clear, colorless, fully-fluorinated liquid ideal for use in medium temperature range heat transfer applications. Like other 3M Performance Fluids, PF-5052 fluid is chemically and thermally stable, practically non-toxic, and nonflammable.

The unique solvent properties of PF-5052 fluid also make this an ideal solvent for depositing or removing fluorinated oils and lubricants.

### Typical Physical Properties

Not for specification purposes

All values determined at 25°C unless otherwise specified

Properties	PF-5052
Appearance	Clear, colorless
Average Molecular Weight	299
Boiling Point (1 atm)	50 °C
Pour Point	-80 °C
Estimated Critical Temperature	454 K
Estimated Critical Pressure	1.97 x 10 <sup>6</sup> Pa
Vapor Pressure	36.4 x 10 <sup>3</sup> Pa
Latent Heat of Vaporization (at normal boiling point)	105 J/g
Liquid Density	1.70 g/ml
Kinematic Viscosity	0.40 centistokes
Absolute Viscosity	0.68 centipoise
Liquid Specific Heat	1.05 J g <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>
Liquid Thermal Conductivity	0.062 W m <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>
Coefficient of Expansion	0.0016 °C <sup>-1</sup>
Surface Tension	13 dynes/cm
Refractive Index	1.266
Water Solubility	14 ppmw
Solubility in Water	<5 ppmw

Figura 8.8-Fluido dielétrico PF-5052 segundo a 3M.

## 8.5 Anexo V

Na presente secção apresenta-se as características relativas aos tempos, tensão de pico e as formas de ondas dos dois conjuntos dos ensaios de impulsos à tensão de 125 kV, para a qual a peça ficou aprovada. Além disso registam-se as mesmas informações dos ensaios de impulsos na ordem dos 135, 145 e 165 kV, que também apresentaram resultados satisfatórios.

Na tensão de 125 kV o conjunto de ensaios de impulso com polaridade positiva está representado na Figura 8.10, Figura 8.11 e Figura 8.12. Em relação ao conjunto com polaridade negativa os seus resultados estão espelhados nas Figura 8.13, Figura 8.14 e Figura 8.15

LI lightning-impulse						
no.	Up [kV]	T1[ $\mu$ s]	T2[ $\mu$ s]	Tc[ $\mu$ s]	remark	
1	125	0.99	49.6		No.1	
2	125.1	0.99	49.6		No.2	
3	125.1	0.99	49.7		No.3	
4	125.1	0.98	49.6		No.4	
5	125.2	0.99	49.7		No.5	
6	125.1	0.98	49.7		No.6	
7	125.2	0.99	49.7		No.7	
8	125.3	0.98	49.7		No.8	
9	125.1	0.98	49.7		No.9	
10	125.2	0.98	49.8		No.10	
11	125.1	0.98	49.8		No.11	
12	125.2	0.99	49.8		No.12	
13	125.1	0.98	49.8		No.13	
14	125.1	0.98	49.8		No.14	
15	124.6	0.98	49.9		No.15	
16	-124.5	0.97	49.8		No.1	
17	-124.5	0.98	49.9		No.2	
18	-124.5	0.97	49.8		No.3	
19	-124.5	0.98	49.9		No.4	
20	-124.7	0.98	49.8		No.5	
21	-124.7	0.98	49.9		No.6	
22	-124.7	0.97	49.9		No.7	
23	-124.5	0.98	49.9		No.8	
24	-124.5	0.98	50		No.9	
25	-124.5	0.98	49.9		No.10	
26	-124.7	0.98	50		No.11	
27	-124.5	0.98	50		No.12	
28	-124.5	0.98	50		No.13	
29	-124.5	0.97	50		No.14	
30	-124.1	0.98	50		No.15	

Figura 8.9-Características dos dois conjuntos de 15 impulsos à tensão de pico 125 kV.

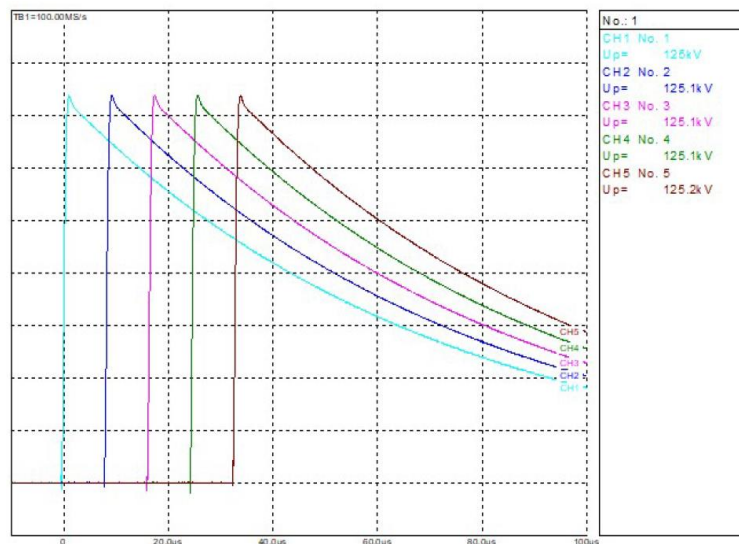


Figura 8.10-Série com os primeiros cinco impulsos de polaridade positiva à tensão de pico 125 kV.

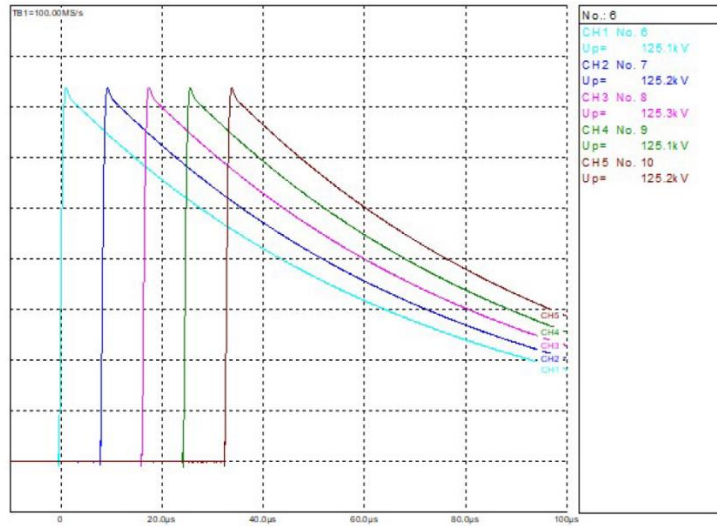


Figura 8.11-Série com os segundos cinco impulsos de polaridade positiva à tensão de pico 125 kV.

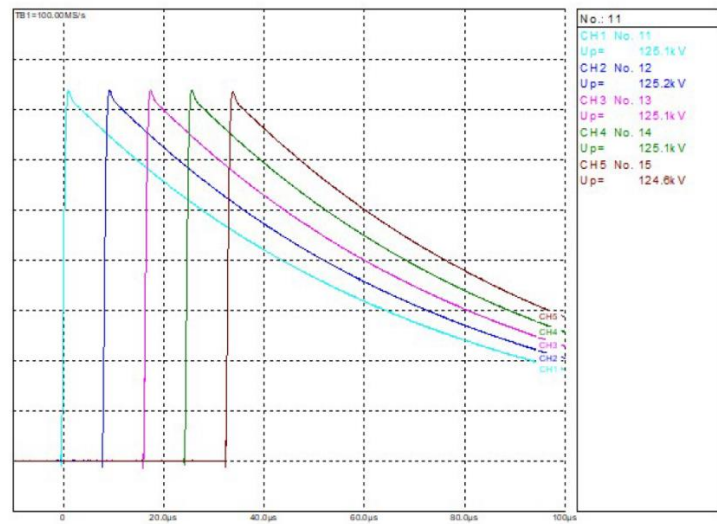


Figura 8.12-Série com os terceiros cinco impulsos de polaridade positiva a 125 kV.

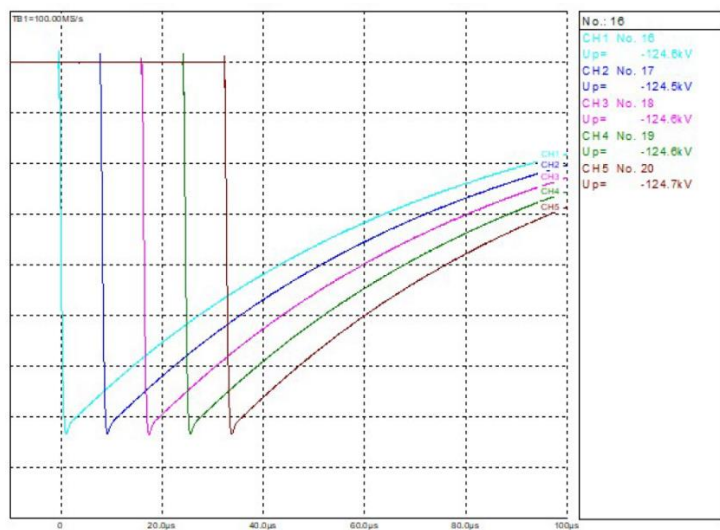


Figura 8.13-Série com os primeiros cinco impulsos de polaridade negativa à tensão de pico 125 kV.

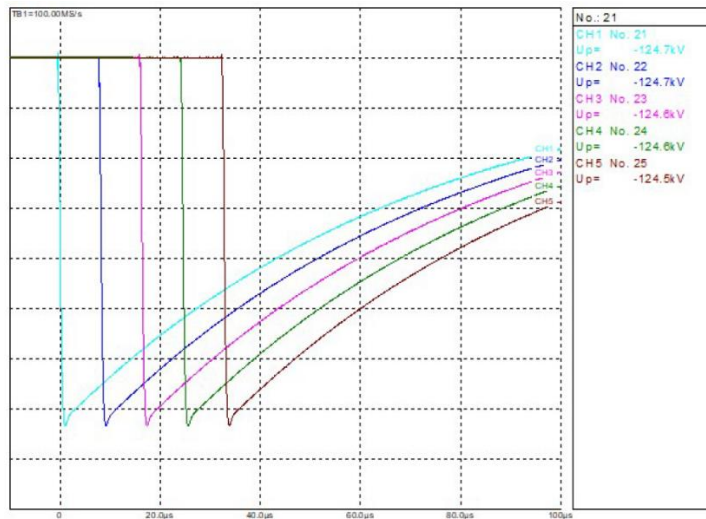


Figura 8.14-Série com os segundos cinco impulsos de polaridade negativa à tensão de pico 125 kV.

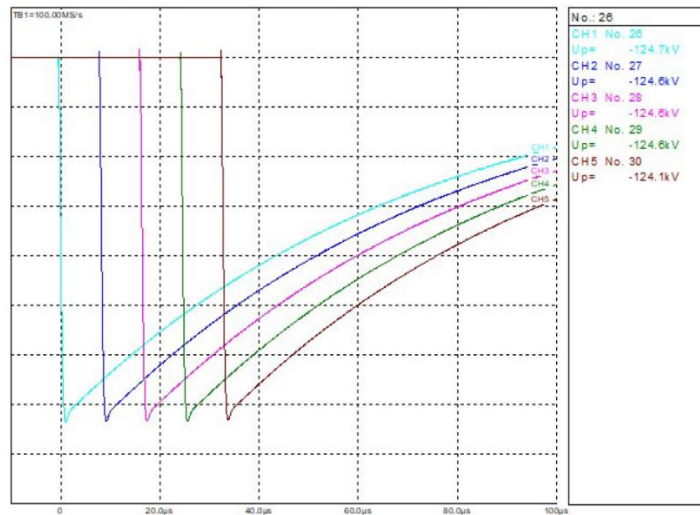


Figura 8.15-Série com os terceiros cinco impulsos de polaridade negativa à tensão de pico 125 kV.

Na Figura 8.16, Figura 8.17 e Figura 8.18 estão representadas as formas de onda dos impulsos a 135, 145 e 165 kV juntamente com as características das suas formas de onda respetivamente.

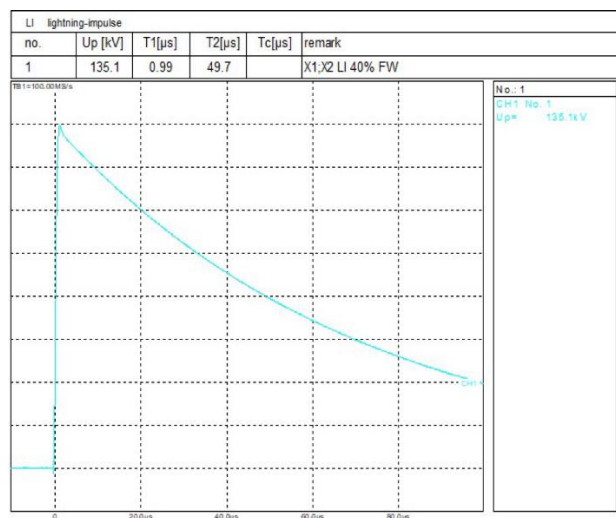


Figura 8.16-Ensaio de impulso com tensão de pico 135 kV.

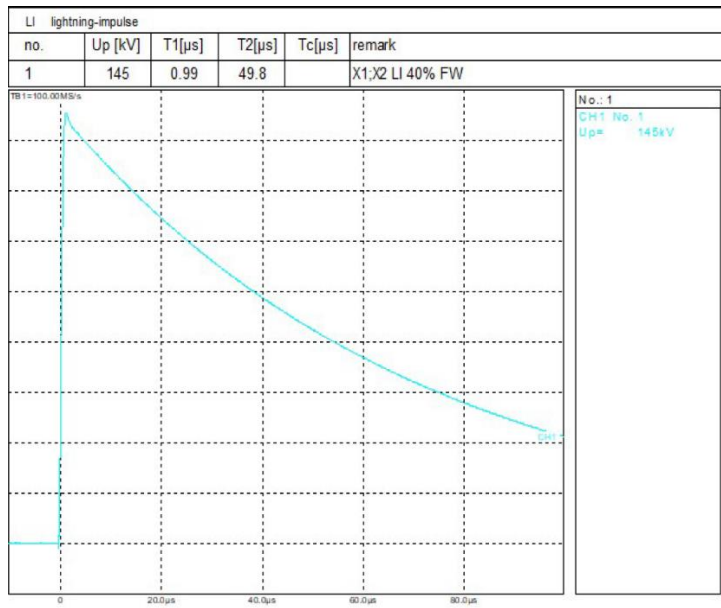


Figura 8.17-Ensaio de impulso com tensão de pico 145 kV.

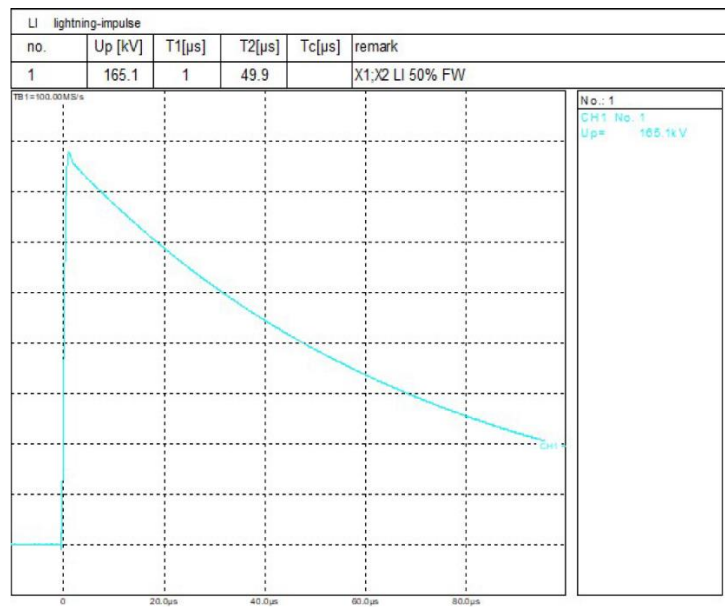


Figura 8.18-Ensaio de impulso com tensão de pico 165 kV.