



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica Energia e Automação**



## **Caracterização e Análise de Anomalias Detetadas em Inspeção de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica em Muito Alta Tensão, em Portugal Continental**

**CARLOS MIGUEL DA COSTA MATEUS**  
Licenciado em Engenharia Eletrotécnica

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Eletrotécnica – Ramo Energia

Orientadores:

Professor Filipe André de Sousa Figueira Barata  
Engenheiro José Manuel Sequeira e Silva Ferreira

Júri:

Presidente: Professor Luís Manuel dos Santos Redondo  
Vogais:

Professor Pedro José Franco Marques  
Professor Filipe André de Sousa Figueira Barata

**Outubro de 2019**



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica Energia e Automação**



**Caracterização e Análise de Anomalias Detetadas em  
Inspeção de Linhas de Transmissão de Energia Elétrica  
em Muito Alta Tensão, em Portugal Continental**

**CARLOS MIGUEL DA COSTA MATEUS**  
Licenciado em Engenharia Eletrotécnica

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Eletrotécnica – Ramo Energia

Orientadores:

Professor Filipe André de Sousa Figueira Barata  
Engenheiro José Manuel Sequeira e Silva Ferreira

Júri:

Presidente: Professor Luís Manuel dos Santos Redondo

Vogais:

Professor Pedro José Franco Marques  
Professor Filipe André de Sousa Figueira Barata

**Outubro de 2019**



*Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende*

Leonardo da Vinci (1452 – 1519)

PÁGINA INTENCIONALMENTE DEIXADA EM BRANCO

# Agradecimentos

Este trabalho, que se constituiu com um desafio e sendo a etapa final deste objetivo a que me propus, não teria sido possível sem o magnífico suporte de familiares, amigos, camaradas e colegas, os quais se destacam:

Ao Professor Filipe Barata pela sua constante presença e interesse neste projeto, e pela oportunidade que me deu no âmbito da Inspeção de Linhas Aéreas;

Ao Engenheiro José Ferreira pelo apoio e *inputs* que permitiram que este trabalho se tornasse mais próximo da realidade da manutenção;

Ao Doutor Ricardo Luís pela (enorme) paciência e constante disponibilidade no apoio à operacionalização do Método de Elementos Finitos e software FEMM ©;

À equipa da Ambisig, liderada pelo Engenheiro Vasco Ferreira, o meu muito obrigado na oportunidade que me foi concedida no âmbito da Inspeção a Linhas Aéreas, por via aérea; pois tem sido, sem dúvida, uma experiência profissional relevante e única;

Ao Engenheiro Rui Martins da Labeltec pela amabilidade com que nos abriu as portas do Laboratório de Alta Tensão e se disponibilizou para realizar os ensaios que pretendíamos;

À Major Sónia Guerra, pelo excelente apoio na revisão do texto, em especial por ter conseguido disponibilizar um pouco do seu escasso tempo, mesmo no seu período de descanso, e, claro, pela paciência na descodificação entre a mensagem plasmada no texto e a mensagem que eu pretendia transmitir;

Aos meus camaradas e amigos do Centro de Manutenção do Sistema de Comando e Controlo Aéreo de Portugal por todo o suporte e franca camaradagem demonstrada durante a frequência deste Mestrado;

Às mulheres da minha vida, Sónia, Carolina e Edina, todas as vitórias carregam uma abdicação associada, e este objetivo concretizado é também um espelho do vosso apoio, do nosso precioso tempo que não consegui estar totalmente com vocês. Sónia, se me encontro neste patamar, é a ti inteiramente devido, ao longo de 15 anos tens realçado o melhor de mim, e como tal dedico-te este documento.

PÁGINA INTENCIONALMENTE DEIXADA EM BRANCO

## Resumo

A sustentação da Rede Nacional de Transporte de Energia Elétrica passa invariavelmente por inspeções sistemáticas ao estado da rede e consequentemente pelo planeamento atempado e priorizado das ações de manutenção corretiva conducentes à reparação das anomalias encontradas.

Dado que a Rede de Transporte se desenvolve em todo o território Nacional continental a inspeção das linhas aéreas é realizada por via aérea, em aeronaves de asa rotativa por contratação do operador da rede a uma entidade externa. Essa inspeção visa detetar, entre outras, todas as anomalias visíveis nos componentes que constituem as linhas aéreas.

Um desses componentes, responsáveis pelo isolamento da tensão da linha ao apoio é a cadeia de isoladores, em que uma das anomalias encontradas no decorrer dessa inspeção é o defeito isolador partido.

Considerando que a cadeia de isoladores, está exposta a condições atmosféricas e ambientais adversas importa não só conhecer o efeito que o defeito de isolador partido, mas também a influência que a contaminação por poluição poderá ter na distribuição de tensão de uma cadeia.

Com recurso ao método de elementos finitos pretende-se realizar diversas simulações de forma a entender o efeito destas anomalias no comportamento elétrico de uma cadeia de isoladores.

Palavras-Chave: Rede Nacional de Transporte de Energia Elétrica, Inspeção a Linhas Aéreas, por via Aérea, Isoladores, Isolamento, Método de Elementos Finitos.

## **Abstract**

The National electricity transport grid support passes invariably through systematic inspections and consequently by the timely and prioritized planning of corrective maintenance actions conducive to the repair of the anomalies found.

Since the transport grid develops throughout the continental National territory the line inspection is carried out airborne, in a rotating wing aircraft, in which the grid operator hires that service to an external entity. This inspection aims among other things to detect, any visible anomalies in the components that constitute the lines.

One of these components, responsible for isolating the electrical tension from the line to the support is the string of insulators, in which one of the anomalies detected during this inspection is the broken isolator defect.

Considering that the insulator string is exposed to adverse atmospheric and environmental conditions, it is important to know the effect that the pollution contamination causes in an insulator string and also the effect of broken insulators in the string.

Using the finite element method, it is intended to perform several simulations in order to understand the effect of these anomalies on the electrical behavior of an insulators string.

Key words: National grid of Electric Energy, Inspection of Electrical lines, Insulators, Isolation, Finite Element Method.

# Índice

Agradecimentos.....	v
Resumo .....	vii
Abstract.....	viii
Índice .....	ix
Índice de Figuras .....	xiii
Índice de Tabelas .....	xix
Lista de Siglas e Acrónimos .....	xxi
Lista de Símbolos e Variáveis .....	xxiii
Glossário.....	xxv
1. Introdução .....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Motivação .....	1
1.3. Objetivos e Metodologia.....	2
1.4. Contributos .....	2
1.5. Organização da Dissertação.....	2
2. Linhas Aéreas de Muito Alta Tensão .....	5
2.1. Rede de transporte .....	5
2.2. Elementos constituintes das linhas de MAT .....	9
2.2.1. Configuração de linhas aéreas.....	9
2.2.2. Cabos condutores .....	10
2.2.3. Cabos de guarda .....	12
2.2.4. Apoios.....	13
2.2.4.1. Apoios reticulados .....	14
2.2.4.2. Apoios tubulares .....	15
2.2.4.3. Famílias de apoios.....	15
2.2.4.4. Tipos de apoios .....	16
2.2.4.5. Fundações .....	18
2.2.5. Isoladores .....	18
2.2.5.1. Disposição de cadeias de isoladores - suspensão.....	20
2.2.5.2. Disposição de cadeias de isoladores - amarração.....	21
2.2.6. Acessórios .....	21
2.2.6.1. Acessórios de cabos.....	21
2.2.6.2. Acessórios OPGW .....	23
2.2.6.3. Acessórios de cadeias de isoladores .....	24
2.2.6.4. Amortecedores de vibração.....	26
2.2.6.5. Separadores de feixe.....	28
2.2.6.6. Conjuntos sinaléticos.....	29
2.2.6.7. Sinalização de linhas e apoios .....	29

2.2.6.8. Acessórios para Proteção das Cegonhas .....	30
2.3. Conclusões do Capítulo .....	32
3. Inspeção a linhas aéreas .....	33
3.1. Generalidades .....	33
3.2. Sistemas instalados .....	33
3.3. Inspeção visual .....	34
3.3.1. Tipos de defeitos encontrados .....	34
3.3.1.1. Equipamentos dos apoios .....	34
3.3.1.2. Equipamentos dos cabos condutores e cabo de guarda .....	35
3.3.1.3. Equipamentos Cadeias de isoladores .....	36
3.4. Inspeção medição de distâncias .....	38
3.5. Inspeção termográfica.....	40
3.6. Inspeção de ninhos de cegonha, recenseamento e localização .....	42
3.7. Registo de uniões .....	42
3.8. Conclusões do capítulo.....	42
4. Isolamento e isoladores .....	43
4.1. Generalidades.....	43
4.2. Caracterização do isolamento .....	43
4.2.1. Nível de isolamento.....	43
4.2.2. Linha de fuga e grau de Isolamento.....	43
4.3. Isoladores <i>Cap and Pin</i> .....	44
4.3.1. Dielétrico.....	45
4.3.2. Espigão.....	46
4.3.3. Campânula .....	46
4.3.4. Características eletromecânicas .....	46
4.4. Isoladores de compósito .....	47
4.5. Comportamento de um isolador.....	48
4.5.1. Comportamento térmico.....	48
4.5.2. Comportamento mecânico .....	48
4.5.3. Comportamento elétrico .....	49
4.6. Dimensionamento eletromecânico de cadeias de isoladores.....	50
4.6.1. Exemplo de Dimensionamento .....	51
4.7. Isolador partido .....	52
4.8. Ensaio Experimental .....	54
4.8.1. Ensaio Realizados .....	54
4.9. Conclusões do capítulo.....	57
5. Cálculo e simulação de grandezas .....	59
5.1. Método de elementos finitos e análise de elementos finitos .....	59
5.2. Caracterização dos modelos desenvolvidos.....	61
5.2.1. Formulação Matemática .....	62

5.2.2.	Condutividade e permitividade .....	64
5.2.2.1.	Isoladores e <i>stub</i> .....	64
5.2.2.2.	Poluição .....	65
5.2.3.	Geometria.....	66
5.2.3.1.	Cadeias de isoladores .....	68
5.2.4.	Condições Fronteira .....	68
5.2.5.	Malha de cálculo.....	69
5.3.	Conclusões do capítulo.....	70
6.	Resultados das simulações .....	71
6.1.	Isolador U70BS e <i>stub</i> U70BS.....	71
6.1.1.	Isolador.....	71
6.1.1.1.	Distribuição de tensão .....	71
6.1.1.2.	Campo elétrico.....	72
6.1.2.	<i>Stub</i> .....	74
6.1.2.1.	Distribuição de tensão .....	74
6.1.2.2.	Campo elétrico.....	75
6.1.3.	Isolador vs <i>stub</i> .....	76
6.2.	Isolador U160BS e <i>stub</i> U160BS.....	77
6.3.	Isolador U70BS poluído .....	77
6.3.1.	Poluição total .....	78
6.3.2.	Poluição parcial .....	79
6.3.3.	Isolador limpo vs. isolador poluído .....	80
6.4.	Isolador U160BS poluído .....	81
6.5.	Cadeias de isoladores.....	81
6.5.1.	10xU70BS (150 kV).....	82
6.5.1.1.	Cadeia limpa e perfeita.....	82
6.5.1.2.	Cadeia limpa com <i>stubs</i> .....	83
6.5.1.3.	Cadeia perfeita com poluição .....	86
6.5.1.4.	Cadeia com poluição e <i>stubs</i> .....	88
6.5.2.	14xU160BS (220kV).....	90
6.5.3.	23xU160BS (400kV).....	90
6.6.	Conclusões do capítulo.....	90
7.	Conclusões e trabalhos futuros.....	91
7.1.	Conclusões .....	91
7.2.	Recomendações e trabalhos futuros .....	94
Anexos.....		A-1
Bibliografia .....		BIB1

PÁGINA INTENCIONALMENTE DEIXADA EM BRANCO

# Índice de Figuras

Figura 2.1 - RNT no final de 1951 (Moreira, 2005) .....	5
Figura 2.2 - RNT no final de 2017 (REN - Redes Energéticas Nacionais, SGPS, S.A., 2018) .....	6
Figura 2.3 – Mapa de interligações e Energia importada/exportada - 2017 [GWh] (REN - Rede Energéticas Nacionais, SGPS, S.A., 2018).....	8
Figura 2.4 - Comprimento das linhas (km) por nível de tensão .....	8
Figura 2.5 - Linha dupla em esteira vertical .....	9
Figura 2.6 - Cabo AAAC de 61 fios .....	10
Figura 2.7 – Tipos de Cabos AAAC .....	10
Figura 2.8 - Cabo ACSR de 30/7 fios.....	10
Figura 2.9 - Tipos de Cabos ACSR.....	11
Figura 2.10 - Cabo condutor em feixe simples .....	11
Figura 2.11 - Cabo condutor em feixe duplo .....	11
Figura 2.13 - Cabo condutor em feixe quádruplo.....	12
Figura 2.12 - Cabo condutor em feixe triplo .....	12
Figura 2.14 - Cabo OPGW .....	13
Figura 2.15 - Tipos de Cabos OPGW .....	13
Figura 2.16 - Apoio reticulado .....	14
Figura 2.17 - Composição de um apoio reticulado (Moreira, 2005).....	15
Figura 2.18 – Linha dupla de 220kV com apoios tubulares .....	15
Figura 2.19 - Funções dos apoios: (a) – Apoio de alinhamento; (b) – Apoio de ângulo; (c) – Apoio de reforço de alinhamento; (d) – Apoio de fim de linha; (e) – Apoio de derivação em alinhamento; (f) – Apoio de derivação em ângulo (Rocha, 2014).....	17
Figura 2.20 - Fundação de apoio reticulado (Moreira, 2005).....	18
Figura 2.21 - Isolador rígido numa linha aérea de 220kV .....	19
Figura 2.22 - Isolador de vidro <i>cap and pin</i> .....	19
Figura 2.23 – Cadeia de suspensão .....	20
Figura 2.24 - Apoio em suspensão com ligeira mudança de direção .....	20
Figura 2.25 - Apoio em amarração.....	21
Figura 2.26 - Pinça de amarração numa linha de 400 kV .....	22
Figura 2.27 - Pinça de suspensão em linha de 400kV.....	22
Figura 2.28 - Fixação de cabo OPGW a um apoio .....	23
Figura 2.29 - União instalada num cabo .....	23

Figura 2.30 - Instalação de caixa OPGW.....	24
Figura 2.31 - Cadeia de isoladores em amarração e acessórios (Moreira, 2005).....	25
Figura 2.32 - Cadeia de isoladores em suspensão e acessórios (Moreira, 2005).....	25
Figura 2.33 - Amortecedor <i>Stockbridge</i> (Amorim, 2003) .....	27
Figura 2.34 - Amortecedores <i>Stockbridge</i> instalados em cabos.....	27
Figura 2.35 – Separadores duplos, triplos e quádruplos .....	28
Figura 2.36 - Separador duplo instalado em fiador em amarração .....	28
Figura 2.37 - Balizagem diurna de apoio e linha.....	29
Figura 2.38 - Balisor .....	30
Figura 2.39 - Luminárias de obstrução com painel solar em apoio reticulado.....	30
Figura 2.40 - BFD's Instalados em linha com dois cabos de guarda.....	30
Figura 2.41 - Ninhos de cegonha em locais de risco .....	31
Figura 2.42 - Inibidor de poiso.....	32
Figura 2.43 -Plataforma.....	32
Figura 3.1 - <i>Gimbal</i> estabilizada.....	33
Figura 3.2 - Pod LiDAR instalado num helicóptero .....	33
Figura 3.3 - Corrosão em cantoneiras de um apoio.....	34
Figura 3.4 - Base de apoio queimada .....	34
Figura 3.5 - Inibidor de poiso partido.....	34
Figura 3.6 - Fiador cabo de guarda solto .....	35
Figura 3.7 - Amortecedor <i>Stockbridge</i> partido .....	35
Figura 3.8 - Balisor partido .....	35
Figura 3.9 - Esferas de sinalização derretidas .....	35
Figura 3.10 - BFD's derretidos .....	35
Figura 3.11 - Cabo de guarda com corrosão e desfiado.....	36
Figura 3.12 - Separador partido .....	36
Figura 3.13 - Isolador partido em linha de 220 kV .....	36
Figura 3.14 - Dois isoladores partidos na mesma cadeia em linha de 220kV – Alternados (Esq <sup>a</sup> ) e Consecutivos (Dt <sup>a</sup> ).....	37
Figura 3.15 - Anéis de guarda com corrosão .....	37
Figura 3.16 - Anéis de guarda soltos .....	37
Figura 3.17 - Fiador solto .....	38
Figura 3.18 - Imagem LiDAR processada (Vista de topo) .....	39

Figura 3.19 - Imagem LiDAR processada (Vista lateral).....	39
Figura 3.20 - Imagem LiDAR processada (Vista longitudinal) .....	40
Figura 3.21 - Ponto quente em união.....	41
Figura 3.22 - Ponto quente em pinça de amarração.....	41
Figura 4.1 - Linha de fuga num isolador.....	43
Figura 4.2 - Elementos que compõem um isolador (Adaptado de (Queirós, 2013)) .....	45
Figura 4.3 - Isolador do tipo "calota e haste" (International Electrotechnical Commission, 1995) .....	47
Figura 4.4 - Circuito equivalente de um isolador perfeito (George et al, 2013) .....	49
Figura 4.5 - Variação de Tensão ao longo de um isolador (Távora).....	49
Figura 4.6 – Isolador U160BS Partido.....	52
Figura 4.7 - Circuito equivalente de um <i>stub</i> (George et al, 2013) .....	52
Figura 4.8 - Tensões limite numa cadeia com <i>stubs</i> (George et al, 2013) .....	53
Figura 4.9 - Configurações numa cadeia de isoladores com <i>stubs</i> (Leite & Yanaguizawa, 2008).....	53
Figura 4.10 - Comparação de tensões limite em cadeias de isoladores com <i>stubs</i> , com diferentes configurações (Leite & Yanaguizawa, 2008).....	54
Figura 4.13 – Ensaio nº1: Resultados .....	55
Figura 4.12 - Ensaio nº1: Curva de distribuição .....	55
Figura 4.11 - Ensaio nº1: Cadeia com 12 Isoladores.....	55
Figura 4.15 - Ensaio nº2: Curva de distribuição .....	56
Figura 4.14 – Ensaio nº2: Cadeia de 11 Isoladores e um <i>stub</i> .....	56
Figura 4.16 – Ensaio nº2: Resultados .....	56
Figura 5.1 - Diferenças entre métodos de cálculo (Luís, 2018) .....	59
Figura 5.2 - Discretização espacial (Luís, 2018) .....	60
Figura 5.3 - Passos na análise de elementos finitos (Luís, 2018) .....	61
Figura 5.4 - Tipos de materiais num Isolador (Adaptado de (EDP Distribuição - Energia S.A., 2008))	65
Figura 5.5 - Desenho CAD de um isolador U70BS.....	66
Figura 5.6 - Desenho CAD de um isolador U160BS.....	66
Figura 5.7 - Desenho CAD de um <i>stub</i> (U70BS) .....	67
Figura 5.8 - Desenho CAD de um <i>stub</i> (U160BS) .....	67
Figura 5.9 - Stress aplicado a um isolador.....	68
Figura 6.1 - <i>Mesh</i> aplicada ao modelo do isolador U70BS.....	71
Figura 6.2 - U70BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga .....	71
Figura 6.3 - U70BS: Distribuição de tensão no modelo .....	72

Figura 6.4 - U70BS: Campo elétrico ao longo da linha de fuga.....	72
Figura 6.5 - U70BS: Campo elétrico no modelo .....	73
Figura 6.6 – U70BS: tensão vs campo elétrico ao longo da linha de fuga .....	73
Figura 6.7 - <i>Mesh</i> aplicada ao modelo do <i>stub</i> U70BS.....	74
Figura 6.8 - <i>Stub</i> U70BS: distribuição de tensão ao longo da linha de fuga .....	74
Figura 6.9 - <i>Stub</i> U70BS: Distribuição de tensão no modelo.....	75
Figura 6.10 - <i>Stub</i> U70BS: Campo elétrico ao longo da linha de fuga .....	75
Figura 6.11 - <i>Stub</i> U70BS: Campo elétrico no modelo .....	76
Figura 6.12 - U70BS vs. <i>stub</i> U70BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga .....	76
Figura 6.13 - U70BS vs. <i>stub</i> U70BS: Campo elétrico .....	77
Figura 6.14 - U70BS: <i>Mesh</i> de cálculo para Poluição Total .....	78
Figura 6.15 - U70BS: <i>Mesh</i> de cálculo para Poluição Parcial .....	78
Figura 6.16 - U70BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga - poluição total.....	78
Figura 6.17 - U70BS: Distribuição de tensão no modelo - poluição total .....	79
Figura 6.18 - U70BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga - poluição parcial.....	79
Figura 6.19 - U70BS: Distribuição de tensão no modelo - Poluição parcial .....	80
Figura 6.20 - U70BS: Comparação da distribuição de tensão entre tipos de poluição .....	81
Figura 6.21 - <i>Mesh</i> de cálculo para cadeia 10xU70BS.....	82
Figura 6.22 – 10xU70BS: Distribuição de tensão no modelo (Cadeia perfeita) .....	82
Figura 6.23 - 10xU70BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga (Cadeia perfeita) .....	83
Figura 6.24 - 10xU70BS: <i>Mesh</i> de cálculo para a) 1 <i>stub</i> , b) 2 <i>stubs</i> e c) 3 <i>stubs</i> .....	83
Figura 6.25 – 10xU70BS: Distribuição de tensão no modelo em cadeia com a) 1 <i>stub</i> , b) 2 <i>stub</i> e c) 3 <i>stub</i> .....	84
Figura 6.26 – 10xU70BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga em cadeias com <i>stubs</i> ... 84	
Figura 6.27 - 10xU70BS: Distribuição de tensão com diferentes posições de dois <i>stubs</i> consecutivos .....	85
Figura 6.28 - 10xU70BS: <i>Mesh</i> de cálculo a) Poluição parcial e b) Poluição total.....	86
Figura 6.29 - 10xU70BS: Distribuição de tensão no modelo com a) Limpa, b) Poluição parcial e c) Poluição total .....	87
Figura 6.30 - 10xU70BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga .....	87
Figura 6.31 - 10xU70BS: <i>Mesh</i> de cálculo para cadeia com 2 <i>stubs</i> : a) Poluição Parcial e b) Poluição Total.....	88
Figura 6.32 - 10xU70BS: Distribuição de Tensão no modelo: a) Limpa, b) Limpa com dois <i>stubs</i> b) Poluição parcial com dois <i>stubs</i> e c) Poluição total com dois <i>stubs</i> .....	89
Figura 6.33 - 10xU70BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga .....	89

Figura A-1 – U160BS: Tensão vs campo elétrico ao longo da linha de fuga .....	A-1
Figura A-2 - U160BS: Distribuição de tensão no modelo .....	A-1
Figura A-3 – <i>Stub</i> U160BS: Tensão vs campo elétrico ao longo da linha de fuga .....	A-2
Figura A-4 - <i>Stub</i> U160BS: Distribuição de tensão no modelo .....	A-2
Figura A-5 – U160BS vs. <i>stub</i> U160BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga.....	A-3
Figura A-6 – U160BS vs. <i>stub</i> U160BS: Campo elétrico .....	A-3
Figura A-7 – U160BS: Distribuição de tensão no modelo - Poluição parcial.....	A-4
Figura A-8 - U160BS: Distribuição de tensão no modelo – Poluição total.....	A-4
Figura B-1 - 14xU160BS: Distribuição de tensão no modelo (Cadeia perfeita).....	B-1
Figura B-2 - 14xU160BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga (Cadeia perfeita).....	B-2
Figura B-3 - 14xU160BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga: a) Cadeia perfeita, b) Cadeia com um <i>stub</i> , c) Cadeia com dois <i>stubs</i> e d) Cadeia com três <i>stubs</i> .....	B-2
Figura B-4 - 14xU160BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga em cadeias com <i>stubs</i> .B-3	B-3
Figura B-5 - 14xU160BS: Distribuição de Tensão no modelo com a) Limpa, b) Poluição parcial e c) Poluição total .....	B-3
Figura B-6 - 14xU160BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga.....	B-4
Figura B-7 - 14xU160BS: Distribuição de Tensão no modelo com a) Limpa, b) Limpa com dois <i>stubs</i> , c) Poluição parcial com dois <i>stubs</i> e d) Poluição total com dois <i>stubs</i> .....	B-4
Figura B-8 - 14xU160BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga.....	B-5
Figura C-1 - 23xU160BS: Distribuição de tensão no modelo (Cadeia perfeita) .....	C-1
Figura C-2 - 23xU160BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga (Cadeia perfeita).....	C-2
Figura C-3 - 23xU160BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga: a) Cadeia perfeita, b) Cadeia com um <i>stub</i> , c) Cadeia com dois <i>stubs</i> e d) Cadeia com três <i>stubs</i> .....	C-3
Figura C-4 - 23xU160BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga em cadeias com <i>stubs</i> .C-4	C-4
Figura C-5 - 23xU160BS: Distribuição de tensão no modelo com a) Limpa, b) Poluição parcial e c) Poluição total .....	C-5
Figura C-6 - 23xU160BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga.....	C-6
Figura C-7 - 23xU160BS: Distribuição de tensão no modelo com a) Limpa, b) Limpa com dois <i>stubs</i> , c) Poluição parcial com dois <i>stubs</i> e d) Poluição total com dois <i>stubs</i> .....	C-7
Figura C-8 - 23xU160BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga.....	C-8

PÁGINA INTENCIONALMENTE DEIXADA EM BRANCO

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Gama de distâncias entre dispositivos de guarda (Adaptado de (Almeida, 2013)).....	26
Tabela 2.2 – Valores Máximos de EDS (Adaptado de (Távora)).....	28
Tabela 3.1 - Distâncias mínimas a obstáculos a observar em linhas aéreas de alta tensão (DECRETO-REGULAMENTAR n°1/92) .....	38
Tabela 4.1 - Níveis de tensões de ensaio. (Adaptado de (Rosário, 2011)) .....	43
Tabela 4.2 - Valores mínimos de grau de isolamento recomendados (Adaptado de (Rosário, 2011). ..	44
Tabela 4.3 - Quadro comparativo de diferentes tipos de isoladores - Adaptado de (Sousa, 2006) .....	48
Tabela 5.1 - Permittividade e condutividade dos materiais de um isolador (Adaptado de (Ilhan et al, 2012a)) .....	65
Tabela 5.2 - Características dimensionais dos isoladores e <i>stubs</i> considerados (Sediver, 2007) .....	67
Tabela 5.3 - Características espaciais das cadeias de isolador consideradas.....	68
Tabela 5.4 - Stress aplicado às cadeias de isoladores .....	69
Tabela 5.5 - Tamanho dos elementos da <i>mesh</i> .....	69



## Lista de Siglas e Acrónimos

<b>AAAC</b>	<i>All Aluminium Alloy Conductor</i>
<b>ACSR</b>	<i>Aluminium Conductor Steel Reinforced</i>
<b>AGS</b>	<i>Armour Grip Suspension</i>
<b>BFD</b>	<i>Bird Fly Diverter</i>
<b>CAD</b>	<i>Computer Assisted Drawing</i>
<b>EDS</b>	<i>Every Day Stress</i>
<b>EDP</b>	Energias de Portugal, S.A.
<b>ERSE</b>	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
<b>FEM</b>	<i>Finite Element Method</i>
<b>FEA</b>	<i>Finite Element Analysis</i>
<b>GIS</b>	<i>Geographic Information Systems</i>
<b>IMD</b>	Inspeção Medição de Distâncias
<b>ITA</b>	Inspeção Termográfica
<b>IVA</b>	Inspeção Visual
<b>IV</b>	Infravermelho
<b>LiDAR</b>	<i>Light Detection and Ranging</i>
<b>LNC</b>	Recenseamento e localização de Ninhos de cegonha
<b>MAT</b>	Muito Alta Tensão
<b>NC</b>	Registo de apoios, por segmento, com ninhos de cegonha
<b>OPGW</b>	<i>Optical Guard Wire</i>
<b>ORT</b>	Operador da Rede de Transporte
<b>REN</b>	Redes Energéticas Nacionais, SGPS S.A.
<b>RSLEAT</b>	Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão
<b>RNT</b>	Rede Nacional de Transporte
<b>UN</b>	Identificação e localização de uniões

PÁGINA INTENCIONALMENTE DEIXADA EM BRANCO

## Lista de Símbolos e Variáveis

$\alpha$  - Ângulo formado entre cabos condutores [°]

$\varepsilon$  - Permitividade elétrica de um material [F/m]

$\varepsilon_0$  - Permitividade elétrica no vácuo -  $8,8541878 \times 10^{-12}$  F/m

$\varepsilon_a$  - Permitividade elétrica relativa do meio envolvente (Ar)

$\varepsilon_c$  - Permitividade elétrica relativa do cimento envolvente

$\varepsilon_d$  - Permitividade elétrica relativa do Dielétrico (Vidro Temperado)

$\varepsilon_m$  - Permitividade elétrica relativa dos elementos metálicos (Espigão e Campânula)

$\varepsilon_r$  - Permitividade elétrica relativa de um material

$\varepsilon_p$  - Permitividade elétrica relativa da camada de poluição

$j$  - Componente imaginária de um número complexo

$\vec{\nabla}$  - Gradiente

$\rho$  - Densidade de carga elétrica [C/m]

$\sigma$  - Condutividade elétrica [S/m]

$\sigma_a$  - Condutividade elétrica do meio envolvente (Ar) [S/m]

$\sigma_c$  - Condutividade do cimento envolvente [S/m]

$\sigma_d$  - Condutividade elétrica do Dielétrico (Vidro Temperado) [S/m]

$\sigma_m$  - Condutividade elétrica dos elementos metálicos (Espigão e Campânula) [S/m]

$\sigma_p$  - Condutividade elétrica da camada de poluição [S/m]

$\omega$  - Velocidade angular [rad/s]

$\vec{B}$  - Densidade de Fluxo magnético [Wb/m<sup>2</sup>]

$C_0$  - Capacidade elétrica de um isolador perfeito e limpo [F]

$C_s$  - Capacidade elétrica do vidro partido dentro da campânula do isolador [F]

$\vec{D}$  - Campo de deslocamento elétrico [C/m<sup>2</sup>]

$\vec{E}$  - Campo elétrico [V/m]

$\vec{H}$  - Campo magnético [A/m]

$\vec{J}$  - Densidade de corrente elétrica [A/m<sup>2</sup>]

$LF_{min}$  - Linha de fuga mínima [mm]

$LF_e$  - Linha de fuga específica mínima [mm/kV]

$LF_{el}$  - Linha de fuga de cada elemento [mm]

$LF_{tot}$  - Linha de fuga total da cadeia [mm]

$N$  - Número de elementos

$P$  - Potência aparente da linha no momento da inspeção [MVA]

$P_{nom}$  - Potência aparente nominal da linha [MVA]

$R_0$  - Resistência elétrica de um isolador perfeito e limpo [ $\Omega$ ]

$R_s$  - Resistência elétrica do vidro partido dentro da câmpanula do isolador [ $\Omega$ ]

$T_c$  - Temperatura corrigida para avaliação de criticidade [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$tPQ$  - Temperatura do ponto quente [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$tRef$  - Temperatura do ponto de referência [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$U_o$  - Tensão de referência (0 V) [V]

$U_1$  - Tensão aplicada no 1º Ensaio Experimental [kV]

$U_2$  - Tensão aplicada no 2º Ensaio Experimental [kV]

$U_c$  - Tensão composta [kV]

$U_{ch}$  - Tensão de Ensaio de 1 minuto sob chuva [kV]

$U_{imp}$  - Tensão de ensaio ao choque [kV]

$U_m$  - Tensão máxima [kV]

$U_s$  - Tensão simples [kV]

$V$  - Velocidade do vento durante a medição [ms<sup>-1</sup>]

$\vec{V}$  - Vetor Tensão elétrica [V]

## Glossário

**Apoio de Alinhamento:** Apoio situado num troço retilíneo da linha (DECRETO-REGULAMENTAR nº1/92)

**Apoio de Ângulo:** Apoio situado num ângulo da linha (DECRETO-REGULAMENTAR nº1/92)

**Apoio de Derivação:** Apoio onde se estabelece uma ou mais derivações da linha (DECRETO-REGULAMENTAR nº1/92)

**Apoio de Fim de Linha:** Apoio capaz de suportar a totalidade dos esforços transmitidos pelos condutores, cabos de guarda e restantes acessórios de um só lado da linha (DECRETO-REGULAMENTAR nº1/92)

**Apoio de Reforço (Alinhamento ou em Ângulo):** Apoio que suporta esforços ao ponto de ser capaz de reduzir as consequências negativas em caso de rutura de um cabo ou condutor (DECRETO-REGULAMENTAR nº1/92)

**Apoio de Travessia ou Cruzamento:** Apoio que limita um vão ou cruzamento. Utilizados para fazer cruzamentos de linhas (DECRETO-REGULAMENTAR nº1/92)

**Contornamento:** Descarga disruptiva que ocorre na superfície de um dielétrico através de um meio gasoso ou líquido (Queirós, 2013)

**Escorvamento:** Descarga disruptiva que ocorre num meio gasoso ou líquido (Queirós, 2013)

**Linha de fuga:** Menor comprimento entre o condutor ativo e a massa, traçado pela superfície do isolador e encontra-se nas características eletromecânicas do isolador

**Linha de fuga total:** Produto da linha de fuga de cada isolador pelo número de isoladores que compõem a cadeia

**Perfuração:** Quando ocorre uma descarga disruptiva através de um dielétrico sólido (Queirós, 2013)

**Separador:** dispositivo destinado a manter o afastamento entre os condutores elementares de um condutor múltiplo. (DECRETO-REGULAMENTAR nº1/92)

PÁGINA INTENCIONALMENTE DEIXADA EM BRANCO

# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento

A manutenção da Rede Nacional de Transporte (RNT) de Energia Elétrica exige, após a sua conceção e instalação, uma constante supervisão do seu estado por forma a garantir os elevados tempos de disponibilidade exigidos por lei. Seja por requisitos de qualidade de Energia ou por resistência da rede na continuação da operação, mesmo em regimes de contingência, a RNT deve manter o seu funcionamento, com o mínimo de limitações. Por outro lado, tendo a RNT índices de disponibilidade elevados, mais Energia produzida é transmitida, seja para consumo Nacional ou para consumo Internacional.

De acordo com o Relatório de Qualidade de Serviço de 2018, a RNT realizou o transporte de 47,2 TWh com uma ponta de 9,24 GW (REN – Rede Eléctrica Nacional, S.A., 2019). O ano de 2018 foi um ano particularmente prejudicial pois além de incêndios florestais, a RNT suportou também os efeitos da passagem do furacão *Leslie* que provocou na zona de Figueira da Foz / Lavos a queda de 13 apoios com linhas duplas a 400 kV.

Mesmo com a ocorrência destes incidentes a taxa de disponibilidade em 2018 foi de 98,53%, face a um valor de referência de 97,5% indicado pela Entidade Reguladora de Serviços Energéticos (ERSE). Estes valores não só demonstram que a RNT se encontra resistente a fatores ambientais e atmosféricos, mas também que a sua sustentação é garantida com planos adequados de manutenção e exploração.

Para manter um *situational awareness* de toda a rede, o operador da rede de transporte (ORT), a REN, SGPS, SA promove a inspeção das suas linhas aéreas, sendo que o *feedback* dessa inspeção permite a coordenação e o planeamento de manutenções programadas a fim de solucionar eventuais defeitos detetados.

Esta inspeção realizada por via aérea, composta por diversas vertentes, nomeadamente inspeção visual, termográfica, medição de distâncias, entre outras, é realizada a partir de uma aeronave de asa rotativa contratada por firma externa à REN, SGPS, SA para esse efeito.

Um dos defeitos que comumente surge nessa inspeção é o “isolador partido”, em cadeias de isoladores. Não obstante o dimensionamento realizado (que permite margens de funcionamento consideráveis), é importante analisar o funcionamento de uma cadeia que contém isoladores partidos para se perceber quais os constrangimentos que este tipo de anomalia provoca na RNT.

## 1.2. Motivação

A função desempenhada pelas cadeias de isoladores nas linhas aéreas é, essencialmente, o isolamento das partes em tensão das partes normalmente sem tensão assim como o correto afastamento das linhas ao apoio. No entanto, este componente de uma Linha Aérea está sujeito aos

elementos atmosféricos, industriais, entre outros, que podem degradar o seu comportamento espectral.

Por outro lado, os defeitos em isoladores são detetados em inspeções sistemáticas às linhas, em que se entende que é necessário o devido enquadramento nesta temática, por forma a perceber o tipo de defeitos encontrados neste âmbito.

Tendo em consideração a pouca informação, a nível Nacional, nestas temáticas é importante adquirir uma base de partida para o estudo dos isoladores, para compreender o comportamento elétrico aquando da existência de isoladores partidos e/ou contaminação por poluição.

### **1.3. Objetivos e Metodologia**

Este trabalho possui duas vertentes distintas, mas que se conjugam, as inspeções de linhas aéreas por via aérea e, resultante dos defeitos encontrados nessas inspeções, o estudo do comportamento elétrico de um isolador e de uma cadeia de isoladores em regime permanente, com e sem isoladores partidos e com e sem presença de poluição.

Deste modo, os objetivos principais deste trabalho são:

- Caracterização das linhas aéreas de transmissão de Energia Elétrica e seus componentes;
- Caracterização da inspeção de linhas aéreas, por via aérea e dos equipamentos utilizados para a realização da inspeção;
- Caracterização das anomalias encontradas;
- Criação de diversos cenários, nas tensões em uso na RNT ( $U_c=150, 220$  ou  $400$  kV), conducentes à análise do comportamento elétrico de isoladores e cadeias de isoladores face à presença de isoladores partidos e/ou contaminação por poluição, com recurso a cálculo numérico pelo método de Elementos Finitos

### **1.4. Contributos**

Foi realizada uma extensa pesquisa pelo autor nesta temática, não se tendo encontrado documentos que, a nível Nacional, possuíssem informação semelhante nesta temática. Por outro lado, os documentos consultados e tidos como base para este trabalho estudavam a distribuição da tensão em cadeias com a presença de isoladores partidos, mas não referiam a contaminação por poluição, e vice-versa. A análise efetuada neste documento através do Método de Elementos Finitos é pioneira a nível Nacional e conjuga a presença de isoladores partidos e a contaminação por poluição.

### **1.5. Organização da Dissertação**

O trabalho encontra-se estruturado em sete capítulos.

No presente capítulo é introduzido o tema a estudar e apresentada a forma como se irá desenvolver ao longo deste documento.

O segundo capítulo apresenta uma breve introdução sobre a Rede Nacional de Transporte, passando para a caracterização de uma linha aérea de Muito Alta Tensão e os seus diversos componentes. No terceiro capítulo, será caracterizada a Inspeção a Linhas Aéreas, por via aérea, apresentando as suas diversas vertentes, assim como os sistemas instalados a bordo que permitem a realização dessa inspeção. Serão ainda apresentados os tipos de defeitos encontrados no decorrer da inspeção.

No quarto capítulo é aprofundado o componente isolador, conjugando-o com a problemática do isolamento. Será caracterizado os elementos que compõem um isolador, bem como o seu comportamento. Será ainda apresentado um exemplo de dimensionamento de cadeias de isoladores, De seguida introduzir-se-á a figura de “isolador partido”, caracterizando o seu comportamento, com recurso a documentos de referência. Por fim será realizado uma síntese do ensaio experimental realizado no laboratório de alta tensão da Labelec, com vista a verificação *in loco* da distribuição de tensão numa cadeia de isoladores.

O quinto capítulo compreende a introdução do cálculo pelo método de elementos finitos, bem como a elaboração do problema, apresentando a formulação matemática para o cálculo dos cenários e definindo-se as constantes elétricas dos materiais utilizados, geometria, condições fronteira e malha de cálculo.

No sexto capítulo serão apresentados os resultados das simulações realizadas, em que se divide na análise de um isolador e *stub* unitário e em cadeia de isoladores, compreendendo a existência de *stubs*, contaminação por poluição e em conjunto, face a uma cadeia perfeita e limpa.

No sétimo capítulo será apresentada a conclusão, fazendo-se referência a possíveis trabalhos futuros que poderão ser realizados neste âmbito.

PÁGINA INTENCIONALMENTE DEIXADA EM BRANCO

## 2. Linhas Aéreas de Muito Alta Tensão

### 2.1. Rede de transporte

A RNT remonta a 1951, então chamada de “rede primária”, sob a égide da CNE - Companhia Nacional de Eletricidade, SARL., empresa concessionária das linhas e subestações de transporte.

A primeira linha edificada a operar em Muito Alta Tensão (MAT) foi uma linha que ligava a central de Castelo de Bode (Zêzere) a Lisboa à tensão nominal de 150 kV, sendo seguida por duas linhas, à mesma tensão nominal, Vila Nova - Ermesinde e Ermesinde – Zêzere, representadas na figura ao lado.

Com a necessidade de realizar os aproveitamentos hídricos do Douro Internacional, e realizar o transporte de Energia Elétrica destes para o Porto e Lisboa foi introduzido o nível de tensão de 220 kV, em 1958, com a linha Picote – Pereiros. Este passo foi o início dos aproveitamentos mais a Nordeste, bem como noutras regiões, pois entre 1958 e 1965 entraram ao serviço cerca de 1100 km de linha a 220 kV e 430 km a 150 kV.

Foi necessário esperar por 1979 para a introdução do nível de tensão de 400 kV, motivada pela necessidade de escoamento de Energia da Central de Setúbal para Palmela, Rio Maior e para Espanha. Desta forma minimizou-se o trânsito de potência entre regiões que existia. Estas linhas, que foram construídas entre 1979 e 1985 representaram os primeiros 370 km a 400 kV da RNT.

Entre 1985 e 1991 foi construída a central Elétrica de Sines, a maior de Portugal, que conta com 1,2 GW de potência instalada, utilizando a queima do carvão. Ao mesmo tempo construía-se linhas desde Riba d’Ave até Sines, com pontos de transformação nas subestações de Recarei, Rio Maior e Palmela. Desta forma Portugal passava a dispor de uma “coluna vertebral”, de Norte a Sul do País, permitindo um trânsito de potência mais equilibrado<sup>1</sup> e com capacidade de *a posteriori* estender-se para o interior Norte, Centro e Sul, como mais tarde, no final dos anos 90 e no novo milénio, se verificou.



Figura 2.1 - RNT no final de 1951 (Moreira, 2005)

---

<sup>1</sup> Esta verdadeira *auto-estrada* de eletricidade permitiu diminuir os trânsitos de potência de importação no Douro Internacional.



postos de corte, 02 (dois) de seccionamento e 01 (um) de transição, conforme mapa apresentado na Figura 2.2, permitindo uma potência de transformação de 37638 MW.

No que concerne às interligações com o mercado de Energia Elétrica a RNT possui nove interligações com Espanha, apresentadas na Figura 2.3, sendo elas:

À tensão nominal de 400 kV:

- Alto Lindoso – Cartelle 1;
- Alto Lindoso – Cartelle 2;
- Lagoaça – Aldeadávila 1;
- Falagueira – Cedillo;
- Alqueva – Brovales;
- Tavira – Puebla de Guzman.

À tensão nominal de 220 kV:

- Pocinho – Aldeadávila 1;
- Pocinho – Aldeadávila 2;
- Pocinho – Saucelle.

De realçar ainda a interligação entre Lindoso e Conchas que é explorada à tensão nominal de 130 kV, e a de Elvas – Badajoz à tensão nominal de 60 kV.

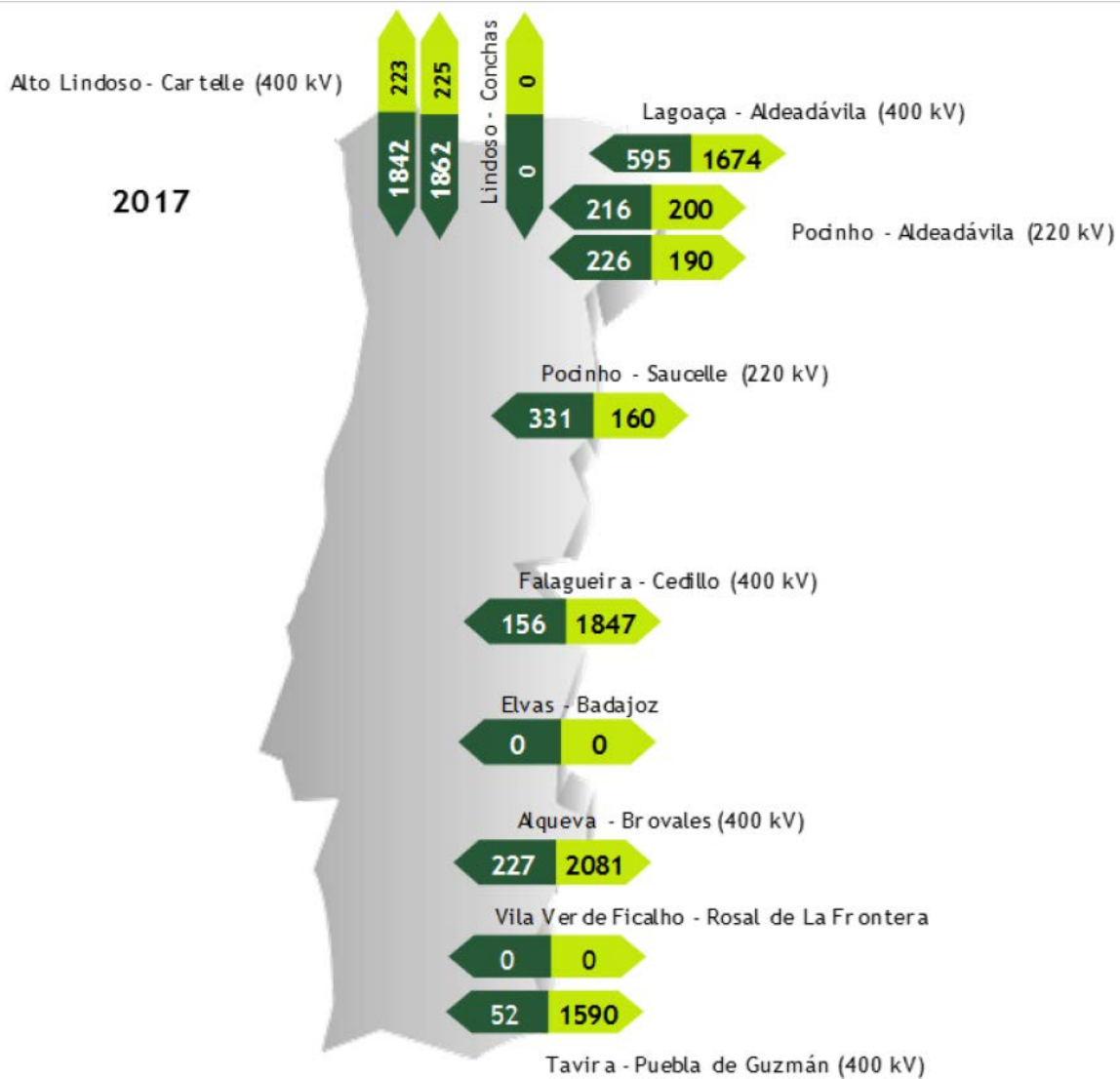


Figura 2.3 – Mapa de interligações e Energia importada/exportada - 2017 [GWh] (REN - Rede Energéticas Nacionais, SGPS, S.A., 2018)

Na Figura 2.4 está apresentado o total de linhas de MAT em exploração operacional, por nível de tensão, perfazendo, como referido anteriormente, 8907 km.

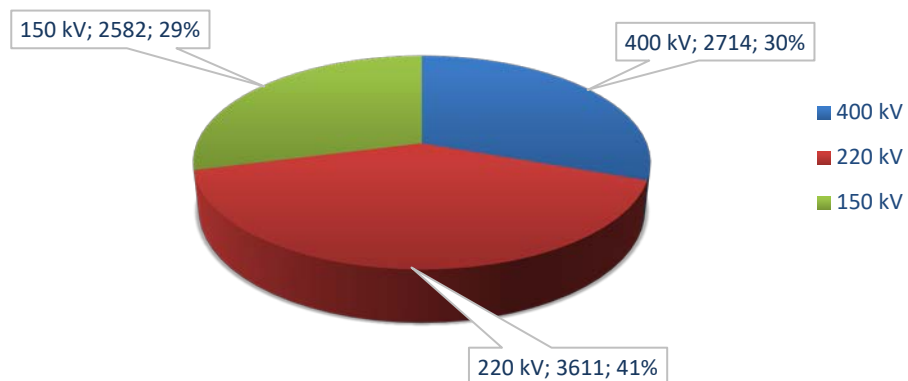


Figura 2.4 - Comprimento das linhas (km) por nível de tensão

A RNT é concessionada pela REN – Redes Energéticas Nacionais, SGPS, S.A. através de um contrato com o Estado Português até 2057. A REN é responsável pela exploração da RNT, em que o ORT deve “assegurar a exploração e manutenção da RNT em condições de segurança, fiabilidade e qualidade de serviço” (DECRETO-LEI nº29/2006).

Enquanto entidade exploradora, a REN, promove uma série de inspeções aos equipamentos que compõem a RNT, sendo algumas delas subcontratadas a terceiros.

## 2.2. Elementos constituintes das linhas de MAT

O elemento mais visível da RNT é, sem dúvida, as linhas aéreas de MAT. De acordo com o Regulamento de segurança de linhas elétricas de alta tensão (RSLEAT), uma linha elétrica constitui-se com o “conjunto de condutores, de isolantes, de acessórios, de suportes destinados ao transporte (...) de Energia Elétrica”.

Estas linhas, como já referido, desenvolvem-se em território Nacional continental ao longo de cerca de 8900 km. A maioria dessas linhas está disposta por via aérea, utilizando-se mais de 18500 apoios, na sua maioria reticulados. As linhas subterrâneas existentes encontram-se abaixo da superfície, desenvolvidas em galerias.

### 2.2.1. Configuração de linhas aéreas

Tendo em conta, não só a disposição dos condutores por apoio, mas também a sua quantidade, importa, nesta fase, definir as possíveis configurações que um apoio pode ter. A primeira grande diferença é no número de circuitos<sup>2</sup> que o apoio possui, podendo ser de um ou de dois, correspondendo a linha simples ou dupla, respetivamente.

As linhas aéreas, na RNT, podem ser classificadas, de uma forma geral:

Quanto à quantidade:

- Simples;
- Duplas.



Figura 2.5 - Linha dupla em esteira vertical

---

<sup>2</sup> Ou ternos, correspondendo cada terno a um circuito trifásico com três condutores

Quanto à disposição:

- Triângulo;
- Esteira
  - Horizontal;
  - Vertical<sup>3</sup>.

## 2.2.2. Cabos condutores

Existe uma grande variedade de tipos de cabos passíveis de serem utilizados nas linhas de transporte, no entanto, os cabos empregados nas linhas aéreas da RNT são cabos multifilares nus, podendo ser dos seguintes tipos:

- Liga de Alumínio (AAAC – *All Aluminium Alloy Conductor*)
- Alumínio - Aço (ACSR – *Aluminium Conductor Steel Reinforced*)

Os cabos do tipo AAAC, apresentados nas Figuras 2.6 e 2.7, são condutores cableados concêntricos, compostos por várias camadas de fios de liga de alumínio. Estes oferecem maior resistência mecânica face aos cabos de alumínio, e maior resistência à corrosão face aos cabos ACSR.



Figura 2.6 - Cabo AAAC de 61 fios

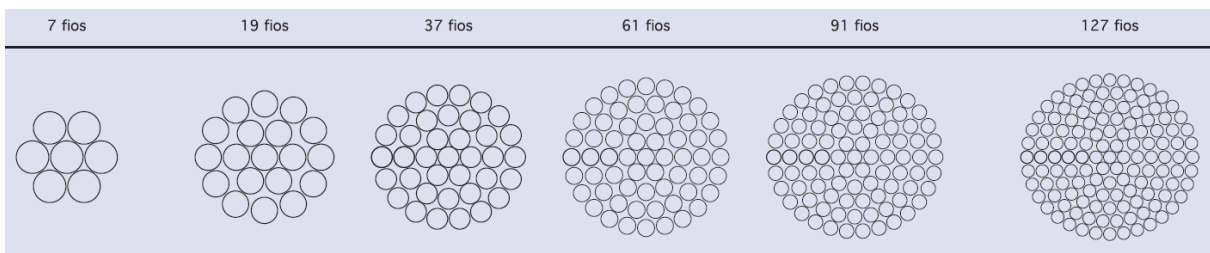


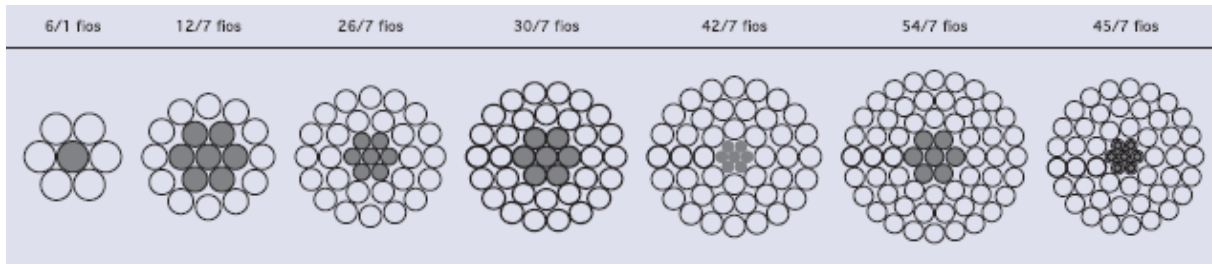
Figura 2.7 – Tipos de Cabos AAAC

Os cabos do tipo ACSR, apresentados nas Figuras 2.8 e 2.9, são condutores cableados concêntricos, compostos por várias camadas de fios de alumínio possuindo um núcleo (também designado por alma) de aço galvanizado de alta resistência, conferindo-lhe uma maior resistência mecânica. Este cabo pode apresentar diversas combinações, variando a quantidade de fios de alumínio vs. fios de aço, alterando a capacidade de transmissão de Energia em detrimento da resistência mecânica e vice-versa.



Figura 2.8 - Cabo ACSR de 30/7 fios

<sup>3</sup> Uma linha simples disposta em esteira vertical é aplicada, por exemplo, em mudanças de direção com ângulos apreciáveis ou na utilização de apoios com capacidade para linha dupla, utilizando-se, neste caso, apenas uma posição.



**Figura 2.9 - Tipos de Cabos ACSR**

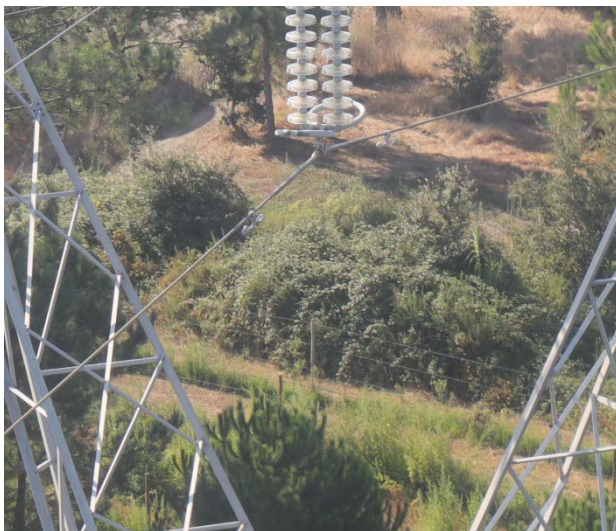
Tendo em conta a potência a transmitir na linha elétrica, bem como outros fatores, nomeadamente efeito de coroa e evolução de cargas a transmitir, cada linha transmite, em regra, três fases<sup>4</sup>, correspondendo cada uma a um cabo condutor, designado por feixe.

Com o aumento das potências a transmitir, a secção do cabo aumenta originando, conseqüentemente, dificuldades no arrefecimento da própria linha. De modo a melhorar este fenómeno, quando necessário, são utilizados para a transmissão diversos cabos por fase, designados por feixe.

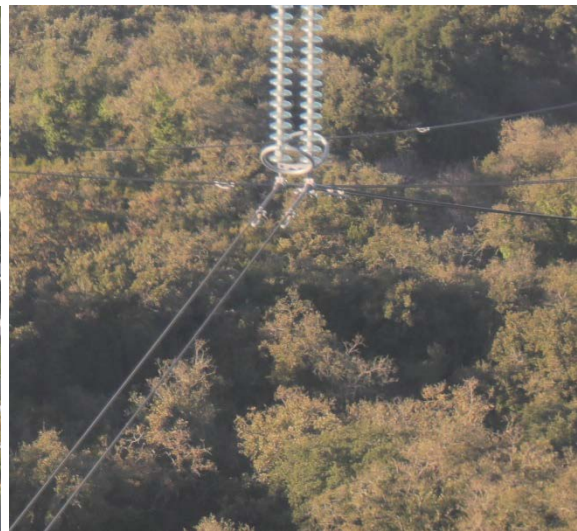
Um feixe pode ser simples, duplo, triplo ou quádruplo, correspondendo ao número de cabos em paralelo, para cada fase. Estes cabos podem estar dispostos em:

- Feixe duplo: dois cabos em esteira ( $\alpha=180^\circ$ ).

Estando representados nas Figuras 2.10 e 2.11, um feixe simples e duplo, respetivamente.



**Figura 2.10 - Cabo condutor em feixe simples**



**Figura 2.11 - Cabo condutor em feixe duplo**

- Feixe triplo: três cabos em triângulo ( $\alpha=120^\circ$ ).
- Feixe quádruplo: quatro cabos em quadrado ( $\alpha=90^\circ$ ).

<sup>4</sup> A REFER, EP é cliente em MAT, em que algumas das suas ligações à rede são estabelecidas através de uma linha aérea bifásica

Estando apresentados nas Figuras 2.12 e 2.13, respetivamente.



**Figura 2.13 - Cabo condutor em feixe triplo**



**Figura 2.12 - Cabo condutor em feixe quádruplo**

### **2.2.3. Cabos de guarda**

Nas linhas aéreas, os cabos de guarda<sup>5</sup> têm a seguinte função:

- Proteção dos condutores contra descargas atmosféricas diretas;
- Redução da indução em circuitos de telecomunicações vizinhos;
- Interligação dos circuitos de terra (diminui a resistência da terra de proteção);
- Quando aplicável, inclusos neles mesmos, o estabelecimento de linhas de comunicação (fibra ótica) para comando e controlo da RNT, ou conseqüente aluguer a terceiros.

---

<sup>5</sup> Também designados de fios de guarda, cabos de terra ou cabos protetores

À parte, existem benefícios da sua instalação, no entanto, salientam-se alguns inconvenientes:

- Em caso de rutura, existe o perigo de envolvimento do cabo de guarda em torno do(s) cabo(s) condutor(es), seja por excesso de esforço mecânico ou por descarga atmosférica, traduzindo-se num curto circuito;
- Aliado ao aumento de cabos que o apoio tem de suportar, invariavelmente, estes últimos deverão estar mais elevados e com maior resistência mecânica;
- O custo global aumenta, não só devido ao referido no ponto anterior, mas também ao custo do próprio cabo de guarda.

Os cabos de guarda são estabelecidos na extremidade superior dos apoios, e estão interligados com o circuito de proteção, constituído pelo mesmo material dos cabos condutores. A sua secção nominal é dimensionada para que a sua temperatura não ultrapasse um determinado valor, durante um período de tempo quando percorrida por uma corrente de curto-circuito, garantindo assim capacidade de escoamento da descarga para a terra.

Os cabos de guarda podem ser do tipo:

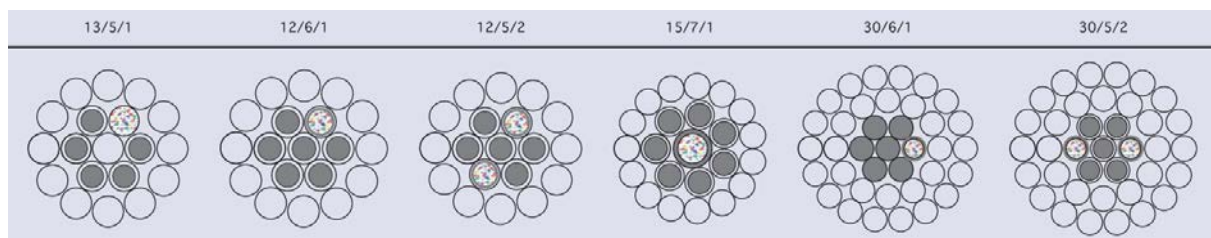
1. Convencional (Tipicamente do tipo ACSR)
2. Com fibra ótica (OPGW – *Optical Guard Wire*)

Conforme referido, os cabos de guarda convencionais são constituídos pelos mesmos materiais dos cabos condutores, embora com uma secção mais reduzida.

No caso dos cabos OPGW, apresentados nas Figuras 2.14 e 2.15, são constituídos por uma ou mais camadas de fios de liga de alumínio, com um núcleo em fios de aço galvanizado. Dentro desse núcleo as fibras óticas são acondicionadas num ou mais tubos de aço inoxidável.



**Figura 2.14 - Cabo OPGW**



**Figura 2.15 - Tipos de Cabos OPGW**

## 2.2.4. Apoios

Os apoios, enquanto elemento de uma linha aérea, têm como função suportar os cabos condutores, os cabos de guarda, os isoladores e acessórios.

O seu correto dimensionamento permite que a distância dos cabos a outros elementos (cabos condutores, elementos arquitetónicos, própria estrutura do apoio) seja a necessária para que não existam contactos entre os diversos elementos, mantendo os valores mínimos de distância a obstáculos

previstos no RSLEAT. Ao mesmo tempo esse dimensionamento deve garantir a estabilidade do apoio face a condições climáticas adversas, nomeadamente o vento.

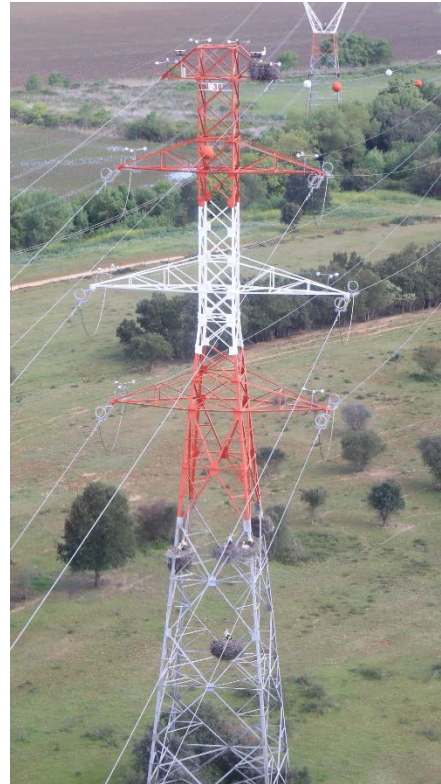
Os apoios utilizados nas linhas aéreas de transporte de Energia são de diversos tipos, diferindo de País para País, consoante a sua legislação, podendo ser de madeira, betão armado e pré-esforçado e aço. No caso Português, na RNT, apenas são utilizados apoios em aço, com construção reticulada ou tubular.

#### **2.2.4.1. Apoios reticulados**

Os apoios reticulados<sup>6</sup> são constituídos conforme apresentado na Figura 2.16 por elementos de cantoneira em aço associados, por aparafusamento, constituindo-se em painéis, de modo a facilitar a montagem final. São ainda protegidos contra a corrosão, normalmente por galvanização por imersão a quente.

Apesar de existirem diversas configurações, que serão apresentadas adiante, um apoio reticulado, conforme a Figura 2.17, é composto por:

- Bases;
- Pernas;
- Fuste;
- Cabeça.



**Figura 2.16 - Apoio reticulado**

---

<sup>6</sup> Também designados por apoios em treliça

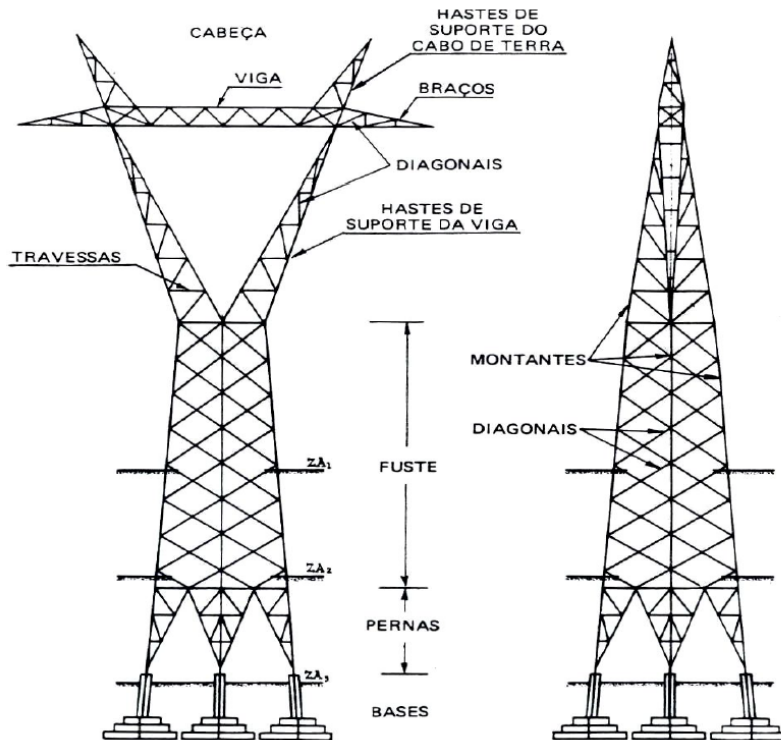


Figura 2.17 - Composição de um apoio reticulado (Moreira, 2005)

### 2.2.4.2. Apoios tubulares

Os apoios tubulares possuem secção variável, diminuindo da base para o topo, com construção modular. Podem ser utilizados, não só na diminuição do impacto visual, mas também quando a área disponível para a implantação é reduzida, (a sua área da base é, em regra, menor que nos apoios reticulados).

Este tipo de apoio é constituído por uma coluna central modular com travessas dispostas de forma a garantir não só o necessário espaçamento dos cabos condutores, mas também os cabos de guarda conforme a Figura 2.18.



Figura 2.18 – Linha dupla de 220kV com apoios tubulares

### 2.2.4.3. Famílias de apoios

Os apoios são escolhidos, tendo em conta diversos fatores entre eles:

- Esforço mecânico necessário;
- Distância da linha ao solo;
- Configuração da linha (simples, dupla, etc);

- Tensão nominal.

Os apoios são assim divididos em famílias, e a cada família corresponde um nível de tensão em uso na RNT, designadamente 150 kV, 220 kV e 400 kV.

As famílias mais usadas, tipicamente, são:

- 150 kV:
  - Tipo T (Reticulado);
  - Tipo F (Reticulado);
  - Tipo TCA (Tubular).
- 220 kV:
  - Tipo MT (Reticulado);
  - Tipo AW (Reticulado);
  - Tipo TBA (Tubular).
- 400 kV:
  - Tipo Y (Reticulado);
  - Tipo Q (Reticulado);
  - Tipo DL (Reticulado);

#### **2.2.4.4. Tipos de apoios**

Os apoios estão sujeitos a diversos esforços podendo ser longitudinais, transversais e verticais.

Os esforços verticais estão associados ao peso dos condutores e acessórios, bem como ao gelo acumulado tanto no apoio como nos condutores, quando aplicável. Os esforços transversais são imputados à força que o vento exerce nos condutores, sendo máximos quando o vento incide de forma perpendicular aos condutores, bem como a força exercida pelos condutores quando estes formam um ângulo com o apoio.

Os esforços longitudinais são devidos às tensões exercidas pelos condutores e cabo(s) de guarda quando dois vãos adjacentes não estão à mesma distância. Uma situação em que também estão presentes esforços longitudinais é numa situação de fim de linha, pois todo ou grande parte do esforço transmitido ao apoio é apenas de um lado.

Tendo em conta a topografia do terreno, os apoios podem ser mais altos, não só de forma a compensar um desnível ou um atravessamento de um leito de um rio, mas também o próprio traçado por onde a linha elétrica é desenvolvida implica alterações na direção da linha e como tal alterações nos esforços imputados aos apoios.

Ainda existem apoios específicos, ao longo de um traçado, que permitem a resistência a esforços apreciáveis de forma a que, em caso de colapso dos condutores e cabos de guarda, estes se oponham a uma queda em cascata.

De referir ainda as derivações que podem existir ao longo de um traçado, como o que acontece numa rede em estrela, correspondem a esforços importantes e que também devem de ser contabilizados no cálculo mecânico do apoio a dimensionar.

Tendo em conta os diferentes tipos de esforços imputados a um apoio, de acordo que o RSLEAT, existem diferentes tipos de apoios, quanto à sua função, representando-se as forças em jogo na Figura 2.19:

- Apoio de alinhamento;
- Apoio de ângulo;
- Apoio de derivação;
- Apoio de fim de linha;
- Apoio de reforço;
- Apoio de travessia ou cruzamento.

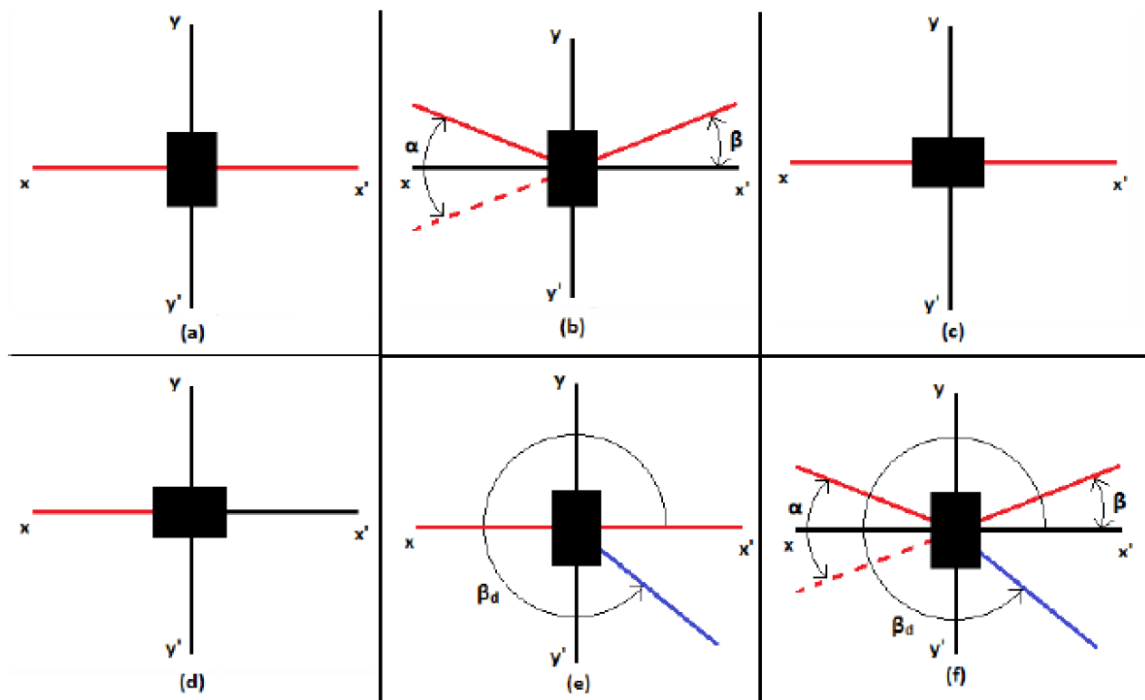


Figura 2.19 - Funções dos apoios: (a) – Apoio de alinhamento; (b) – Apoio de ângulo; (c) – Apoio de reforço de alinhamento; (d) – Apoio de fim de linha; (e) – Apoio de derivação em alinhamento; (f) – Apoio de derivação em ângulo (Rocha, 2014)

### 2.2.4.5. Fundações

Para assegurar a estabilidade correspondente às solicitações atuantes e à natureza do solo, são construídas fundações ou *maciços* em betão, de forma a consolidar o apoio.

O dimensionamento das fundações é definido no RSLEAT, que se consubstancia no método de *Sulzberger*<sup>7</sup>.

De uma forma geral, o dimensionamento das fundações deverá ter em conta as características do terreno e os esforços máximos transmitidos pela estrutura metálica, sendo que cada *maciço* deverá ainda ter um circuito de terra que se interligará com a estrutura do apoio.

Um apoio reticulado deverá ter quatro maciços separados, um para cada perna, constituídos, conforme Figura 2.20, por uma sapata em degrau e por uma cruzeta de cantoneira, que será a interligação com a estrutura metálica do apoio.



Figura 2.20 - Fundação de apoio reticulado (Moreira, 2005)

No caso particular dos apoios tubulares, apenas possuirão uma fundação, composta por um maciço, composto por uma sapata e um chumbadouro, ponto de fixação do maciço ao apoio tubular.

De salientar ainda que o circuito de terra desenvolvido em cada fundação deve ser dimensionado, devido à existência de apoios em zonas frequentadas pelo público, considerando os limites estipulados para a tensão de contacto e a tensão de passo.

### 2.2.5. Isoladores<sup>8</sup>

Os isoladores, enquanto elementos responsáveis não só pelo isolamento das partes em tensão dos restantes elementos normalmente sem tensão, mas também pelo correto afastamento dos condutores ao apoio, são submetidos a diversos esforços, já identificados em 2.2.4.4.

Relativamente a esta temática, a mesma voltará a ser mais desenvolvida mais à frente.

Os isoladores podem apresentar-se de duas formas:

---

<sup>7</sup> Também designado por método suíço

<sup>8</sup> Os isoladores que estão instalados nas linhas aéreas também são chamados de “isoladores de linha” – Ao longo deste trabalho designar-se-ão apenas por isoladores.

- Rígidos, em que num corpo monobloco este assume o isolamento completo dos condutores face ao apoio. Neste tipo os isoladores encontram-se fixados rigidamente aos apoios. Um exemplo de utilização deste tipo de isoladores na RNT são os



**Figura 2.21 - Isolador rígido numa linha aérea de 220kV**

isoladores de compósito em uso, por exemplo, para zonas muito poluídas, conforme Figura 2.21.

- Cadeias de isoladores, em que se apresenta num corpo articulado composto por elementos iguais colocados uns a seguir aos outros, sendo que no nosso País são utilizados de forma generalizada os do tipo “calota e haste” ou *cap and pin*, conforme a Figura 2.22., U70BS e U160BS.



**Figura 2.22 - Isolador de vidro *cap and pin***

A vantagem do uso deste tipo de isolador é a possibilidade da formação de cadeias que, consoante a tensão da linha, entre outros fatores, são construídas alterando o número de elementos similares. Em adição ainda possui a característica de se existir um elemento partido, este pode ser substituído sem ser necessário substituir os restantes, traduzindo-se em custos de manutenção inferiores.

Os isoladores rígidos de compósito e os isoladores que, em conjunto se constituem cadeias de isoladores, conforme as diversas funções que um apoio pode possuir, já identificadas em 2.2.4.4, ir-se-ão dispor em duas possíveis configurações: suspensão ou amarração.

### 2.2.5.1. Disposição de cadeias de isoladores<sup>9</sup> - suspensão

As cadeias de isoladores designadas por “cadeias em suspensão” são aquelas em que, os condutores e cabos de guarda estão suspensos em relação ao apoio. Neste tipo de apoio, os cabos não são cortados, utilizando-se para a devida fixação, pinças de suspensão. Devido aos cabos estarem suspensos, os isoladores estarão numa posição vertical ( $\alpha=90$ ), sendo este o efeito mais visível para a diferenciação entre as configurações, como verificado na Figura 2.23. Neste caso, os esforços imputados às cadeias de isoladores são maioritariamente verticais (Peso da cablagem e acessórios).



Figura 2.23 – Cadeia de suspensão

Em situações de desvio do traçado, correspondente a ângulos muito pequenos<sup>10</sup> é também utilizado este tipo de configuração, sendo que a cadeia de isoladores não está totalmente na vertical, conforme a Figura 2.24. De ressaltar que esta solução impõe maiores esforços ao apoio e correspondente cadeia de isoladores.



Figura 2.24 - Apoio em suspensão com ligeira mudança de direção

---

<sup>9</sup> Por uma simplicidade de escrita ao se referir a uma cadeia de isoladores compreende-se um isolador rígido de compósito ou uma cadeia de isoladores de porcelana ou vidro.

<sup>10</sup> Tipicamente 2° ou 3°

### 2.2.5.2. Disposição de cadeias de isoladores - amarração

Este tipo de apoio é utilizado aquando da necessidade de introdução de uma mudança de direção na linha e identifica-se pelo facto das cadeias de isoladores se posicionarem quase na horizontal, conforme a Figura 2.25. Apesar desta ser a sua função primordial esta disposição é ainda utilizada nas situações de fim de linha e de reforço.



Figura 2.25 - Apoio em amarração

### 2.2.6. Acessórios

Apresentados os elementos típicos da rede, falta ainda introduzir os acessórios. Estes componentes permitem que todos os elementos principais referidos anteriormente se conjuguem e funcionem em conjunto. Estes acessórios têm ainda que suportar os efeitos térmicos na eventualidade de corrente de defeito máximo<sup>11</sup>.

#### 2.2.6.1. Acessórios de cabos

Os acessórios de cabos estão divididos em Acessórios de fixação e Acessórios de ligação e reparação.

##### 2.2.6.1.1. Acessórios de fixação

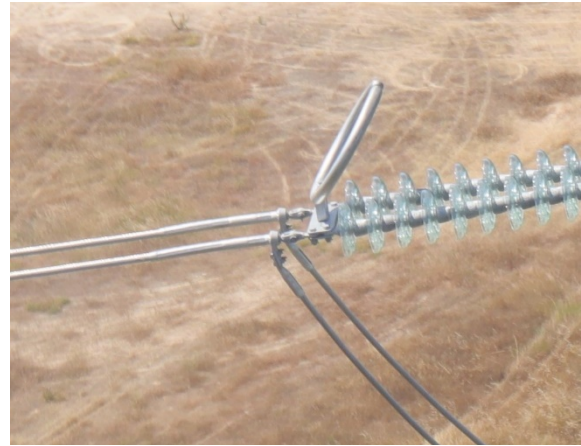
Os acessórios de fixação são os responsáveis por fixar os cabos condutores e cabos de guarda à cadeia de isoladores e ao apoio, respetivamente.

---

<sup>11</sup> Tipicamente de 31.5kA ou 40kA

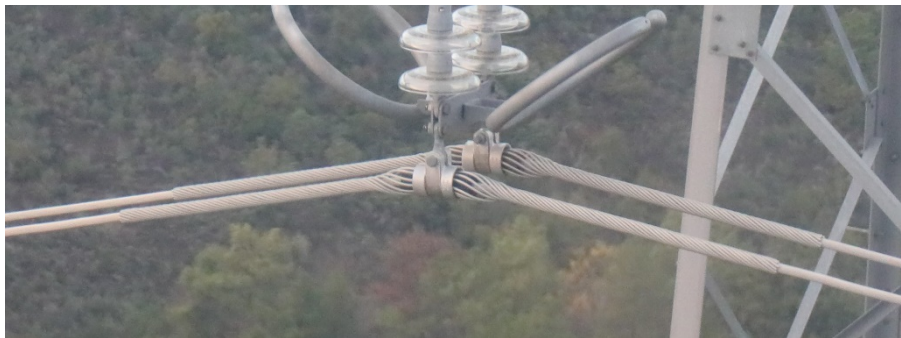
Estes podem ser pinças de amarração, para cadeias em amarração ou pinças de suspensão, para cadeias de suspensão.

Neste tipo de fixação por amarração os cabos são cortados e a continuidade da linha é garantida com recurso a um fiador, conforme a Figura 2.26. As pinças de amarração são utilizadas para juntar o condutor, o fiador e a cadeia de isoladores. As pinças de amarração são devidamente fixadas aos cabos condutores por compressão, com uma carga de rotura não inferior à dos cabos.



**Figura 2.26 - Pinça de amarração numa linha de 400 kV**

As pinças de suspensão são do tipo AGS (*Armour Grip Suspension*) e fixam o cabo através de uma manga de neopreno e varetas helicoidais, permitindo assim que não sejam imputados ao cabo danos devido a vibrações eólicas, conforme a Figura 2.27.



**Figura 2.27 - Pinça de suspensão em linha de 400kV**

Neste tipo de pinças, a principal questão deve-se, não só ao peso do próprio cabo, mas também ao deslizamento devido à tração dos cabos e ao ângulo formado entre os cabos e a pinça, que não deve exceder os 30°.

Estas pinças são ainda utilizadas na fixação dos cabos de guarda e como é visível na Figura 2.28, o cabo de guarda OPGW é devidamente fixo por uma pinça de suspensão e a ligação equipotencial ao apoio é feita por intermédio de um fiador. Os tubos de aço inoxidável que contêm as fibras transpõem o acessório no interior, não existindo corte de cabos, tanto de guarda como de fibra ótica.



**Figura 2.28 - Fixação de cabo OPGW a um apoio**

#### **2.2.6.1.2. Acessórios de ligação e reparação**

Considerando que as bobines de cabo têm um comprimento finito, são colocadas uniões por forma a obter a devida continuidade do circuito. Estas uniões são também utilizadas quando um cabo tem danos nas camadas interiores de fios, incluindo na sua alma. A necessária junção é feita por compressão, utilizando-se ferramenta específica de modo a que a união não só garanta a continuidade da linha, mas também resista aos esforços mecânicos que lhe estão acometidos. De igual forma às pinças de amarração, a carga de rotura tem de ser, no mínimo, igual à carga de rotura dos cabos. A Figura 2.29 apresenta uma união instalada num cabo.



**Figura 2.29 - União instalada num cabo**

Existem ainda mangas de reparação, que são constituídas por varetas helicoidais em aço, destinadas à reparação de um cabo quando possui danos nas camadas exteriores.

#### **2.2.6.2. Acessórios OPGW**

Agregado ao facto dos cabos de guarda OPGW possuírem duas funções são necessários acessórios para a devida integração num sistema de telecomunicações. Para esse desiderato são utilizadas caixas de junção.



**Figura 2.30 - Instalação de caixa OPGW**

As caixas de junção são instaladas de forma periódica ao longo da linha, no fuste do apoio, conforme a Figura 2.30, e têm como função a proteção atmosférica dos equipamentos (repartidores, *pig-tails*, etc.) que permitem a continuação do circuito de telecomunicações em fibra ótica.

### **2.2.6.3. Acessórios de cadeias de isoladores**

Uma cadeia de isoladores por si só não tem capacidade de se fixar a um apoio. É necessário um conjunto de acessórios, tanto de fixação como de proteção para que a cadeia cumpra a sua função.

Estes acessórios têm que, da mesma maneira que outros já referidos, garantir a resistência térmica em caso de corrente defeito e suportar os esforços mecânicos, também já referidos anteriormente.

As Figuras 2.31 e 2.32 apresentam conjuntos de cadeia de isoladores com os respetivos acessórios, em cadeias de amarração e de suspensão, respetivamente.

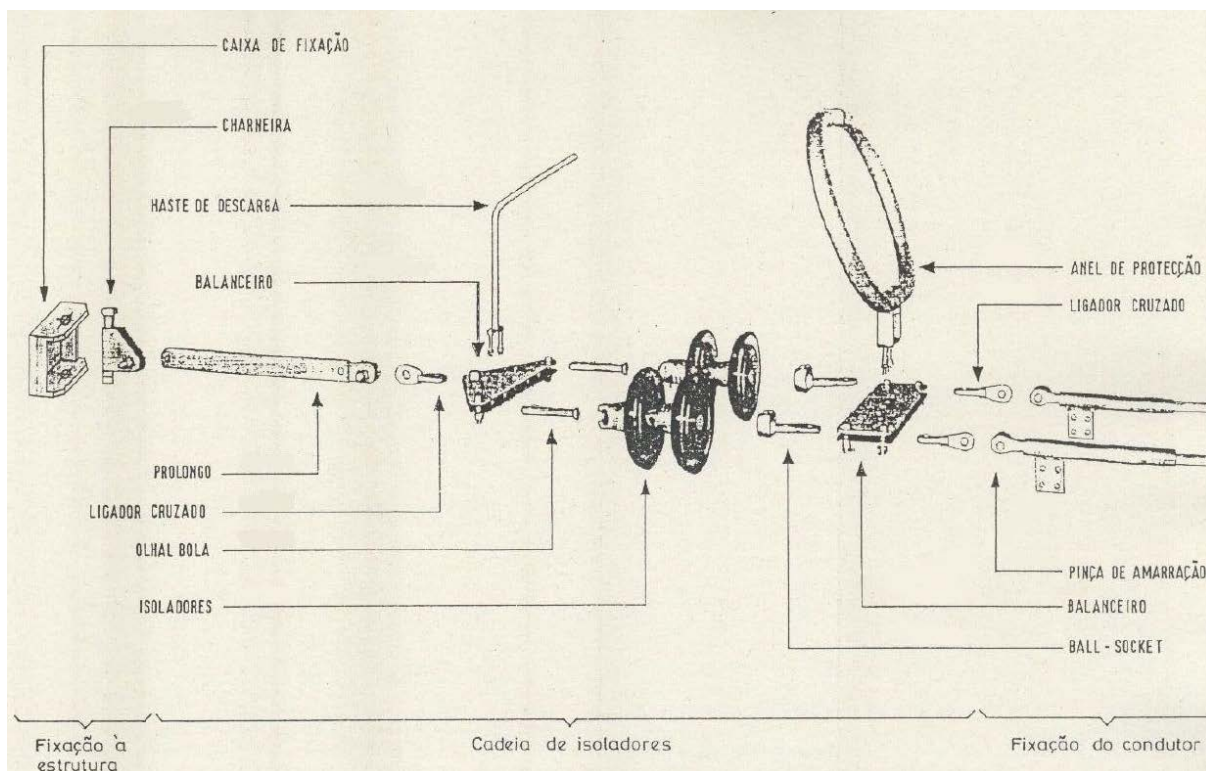


Figura 2.31 - Cadeia de isoladores em amarração e acessórios (Moreira, 2005)

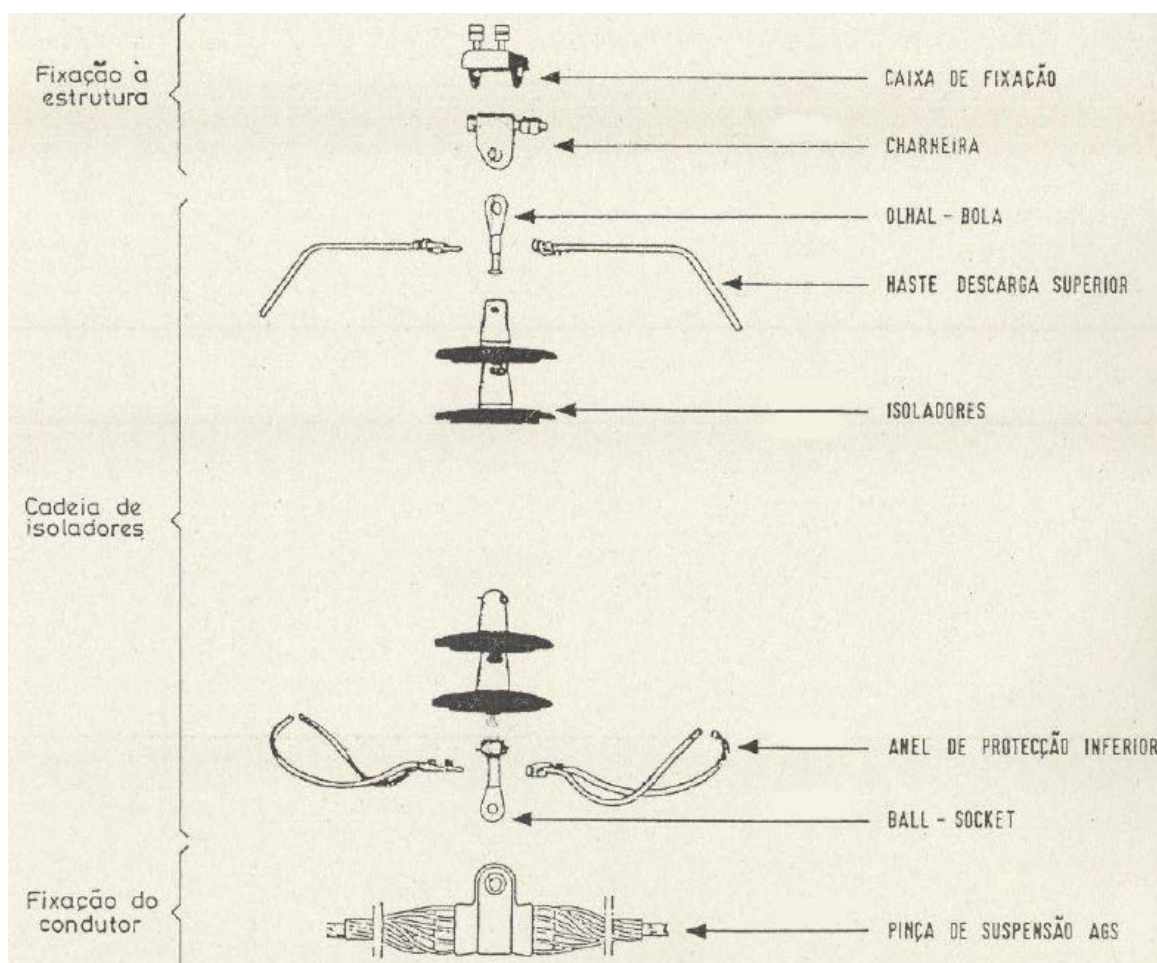


Figura 2.32 - Cadeia de isoladores em suspensão e acessórios (Moreira, 2005)

Os acessórios que garantem a fixação da cadeia às pinças (de amarração ou de suspensão) são denominados por acessórios de fixação. Existem ainda acessórios de proteção, que são os anéis de proteção<sup>12</sup> e as hastes de descarga.

Os anéis e as hastes de descarga são denominados de sistemas anti-arco e na RNT podem assumir diversas configurações, sendo constituídos por: hastes de descarga (superior e inferior), anéis de descarga (superior e inferior) e ainda mistos, como apresentado na Figura 2.32.

Os anéis e as hastes são regulados para estarem a uma distância tal que, num pico de tensão, devido à não descarga pelos isoladores e de modo a não danificar a cadeia de isoladores, favorece um arco elétrico entre os dois elementos. No caso da RNT esta distância de regulação é resumida na Tabela 2.1, para cada nível de tensão.

Esta descarga é direcionada para a terra, dado que o elemento superior se encontra ligado à estrutura metálica do apoio.

**Tabela 2.1 - Gama de distâncias entre dispositivos de guarda (Adaptado de (Almeida, 2013))**

Tensão máxima $U_m$ [kV]	Distância [m]
170	1,2 a 1,4
245	1,8 a 2,0
420	2,7 a 3,1

#### **2.2.6.4. Amortecedores de vibração**

Uma linha elétrica poderá ser vista como um sistema oscilante, em que todos os seus constituintes podem oscilar, com especial destaque para os cabos (condutores ou de guarda). Estes oscilam como uma corda vibratória (oscilações de tensão devido a estes já estarem sujeitos a binários de tensão).

Como os condutores possuem uma elasticidade longitudinal, a linha propagará as ondas longitudinal e transversalmente, com especial destaque para esta última devido à sua perigosidade, pois estas refletem-se e formam ventres em que a amplitude pode ser aumentada por interferência das ondas seguintes.

As oscilações de alta frequência e de pequena amplitude são denominadas de vibrações e frequentemente manifestam-se de forma pulsante com amplitude variável. Este fenómeno ocorre acima

---

<sup>12</sup> Também chamados de anéis de guarda

de determinadas tensões mecânicas, produzidas pela ação do vento, com o seu máximo aquando de uma direção normal do vento em relação à linha.

Este fenómeno origina turbilhões<sup>13</sup> no ar que rodeia os cabos provocando uma onda migratória que vai aumentando a sua amplitude. Esta onda é refletida, parcialmente, com o uso de pinças de suspensão AGS, já referidas em 2.2.6.1.1..

Poderá ainda dar-se o caso de existir uma igualdade entre a frequência própria do condutor e da onda, ou ressonância das vibrações, originando flexões alternadas do condutor sendo este fenómeno responsável pela rotura dos fios que o constituem, com especial incidência logo após a pinça de suspensão.

Além do uso de pinças de suspensão AGS são utilizados, frequentemente, mecanismos denominados de amortecedores, que servem para a atenuação das vibrações nos cabos, apresentando-se um amortecedor do tipo *Stockbridge* na Figura 2.33.



**Figura 2.33 - Amortecedor *Stockbridge* (Amorim, 2003)**

Estes amortecedores são, em norma, instalados imediatamente após as pinças de suspensão ou de amarração, a uma distância de sensivelmente 0,5 a 2 metros (m), conforme a Figura 2.34 (verifica-se a instalação no cabo de guarda e no cabo condutor).

Tendo em consideração que as tensões mecânicas dos cabos são diretamente proporcionais à probabilidade de ocorrer fenómenos de vibração, foram estabelecidos valores de tensões a que os cabos poderão estar sujeitos durante um dia. Esses valores são denominados de *Every Day Stress* (EDS) e decorrem de estudos que relacionam o comportamento das vibrações eólicas dos cabos das linhas aéreas.

Este facto vai restringir as tensões ou trações máximas a que o cabo condutor pode ser instalado, em



**Figura 2.34 - Amortecedores *Stockbridge* instalados em cabos**

---

<sup>13</sup> Também chamados de turbilhões de Karman

que na Tabela 2.2 se apresenta os valores limites de EDS aquando do estudo mecânico de dimensionamento de uma linha aérea.

**Tabela 2.2 – Valores Máximos de EDS (Adaptado de (Távora))**

Material do cabo condutor ou de guarda	Valor Máximo de EDS [% da tensão de rotura]		
	Linha não protegida	Linha Protegida	
		Com Pinças AGS	Com Amort. <i>Stockbridge</i>
Alumino-Aço	18	22	24
Liga de Alumínio	18	22	26

### 2.2.6.5. Separadores de feixe

Como referido em 2.2.2., os cabos condutores podem ser dispostos em feixe duplo, triplo ou quádruplo. De forma a manter uma distância constante entre eles, para efeitos de arrefecimento do cabo ou para permitir que não exista oscilações nefastas ou ainda contactos entre os cabos do mesmo feixe, são utilizados separadores, apresentados na Figura 2.35 e dispostos a uma distância de cerca de 50 m entre eles.



**Figura 2.35 – Separadores duplos, triplos e quádruplos**



**Figura 2.36 - Separador duplo instalado em fiador em amarração**

### 2.2.6.6. Conjuntos sinaléticos

De modo a ter não só os elementos importantes para a informação de uma determinada linha, mas também as informações dos potenciais perigos são colocados, em cada apoio:

- Sinal de perigo “PERIGO DE MORTE”;
- Chapa com a identificação da linha e nº de contacto;
- Em zonas urbanas ou junto a vias de comunicação uma chapa com o logotipo do ORT.

Cada linha possui ainda, tipicamente a cada 10 (dez) apoios, uma chapa com o número de ordem desse apoio.

### 2.2.6.7. Sinalização de linhas e apoios

A sinalização tem como função garantir a visibilidade da existência de um obstáculo em situações de visibilidade reduzida ou durante o período noturno.

#### 2.2.6.7.1. Sinalização para aeronaves

Tendo em conta o acima descrito uma linha aérea é um potencial perigo para as aeronaves, dado que pode ser extremamente difícil visualizar uma linha e onde a mesma está colocada. Da mesma forma o mesmo se aplica em condições noturnas. Desta forma, e no seguimento de normas internacionais, o Instituto Nacional de Aviação Civil (INAC) é responsável por emitir regulamentação no que concerne à segurança aeronáutica, nomeadamente a Circular de Informação Aeronáutica 10/3 de 06MAI03.

Para a balizagem diurna dos apoios, estes são pintados, numa percentagem do apoio, alternadamente de vermelho e branco, conforme a Figura 2.37.

Para o mesmo desiderato são colocadas esferas nos cabos de guarda, com o diâmetro mínimo de 600 mm e espaçadas de 60 m. Estas são dispostas de forma alternada e possuem uma cor vermelha ou laranja e branca.

Para a balizagem noturna são utilizados, para a sinalização das linhas, dispositivos denominados de balisores. Estes balisores são ainda utilizados na travessia de estradas denominadas por Itinerário Principal (IP) e Itinerário Complementar (IC) e ainda nas autoestradas.

Os balisores são constituídos por uma lâmpada de *néon* e por uma antena conforme apresentado na Figura 2.38. Uma extremidade da lâmpada de néon está conectada à linha, sob tensão, ao passo que a outra extremidade está

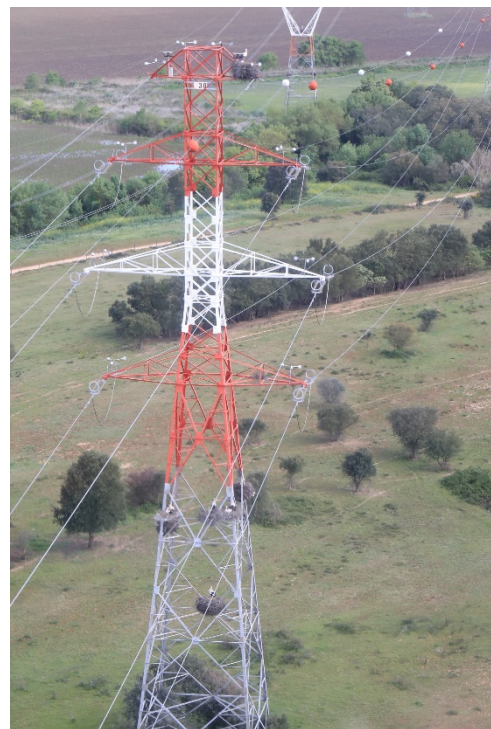


Figura 2.37 - Balizagem diurna de apoio e linha

conectada a uma antena situada paralelamente à linha que induz uma tensão devida ao campo elétrico da linha. Como existe uma diferença de potencial (a tensão induzida pelo campo elétrico é menor que a tensão da linha) a lâmpada irá acender.

Para a sinalização noturna de apoios são instalados, quando necessário, na extremidade superior dos apoios, luminárias de obstrução, que podem ser alimentadas por um painel solar, instalado no mesmo local, conforme Figura 2.39.



Figura 2.38 - Balisor



Figura 2.39 - Luminárias de obstrução com painel solar em apoio reticulado

#### 2.2.6.7.2. Sinalização para avifauna

São colocados, nos cabos de guarda, dispositivos denominados de *Bird fly dverter* (BFD), conforme a Figura 2.40. Estes equipamentos de forma helicoidal, em plástico, permitem identificar o traçado dos cabos para as aves por forma a que estas não embatam nestes. A sua forma permite ainda que não exista um aumento significativo da resistência dos cabos à passagem do vento.



Figura 2.40 - BFD's Instalados em linha com dois cabos de guarda

#### 2.2.6.8. Acessórios para Proteção das Cegonhas

A cegonha branca (*Ciconia de Ciconia*), é uma ave de espécie protegida, com cerca de um metro de altura por dois metros de envergadura. Esta ave tem como ritual construir os seus grandes e pesados ninhos em locais muito altos, em que os apoios das Linhas de MAT são considerados um dos lugares de eleição para esta espécie.

A construção de um ninho na viga do apoio, nas imediações de uma cadeia de isoladores, conforme a Figura 2.41, pode causar:



**Figura 2.41 - Ninhos de cegonha em locais de risco**

- Poluição da cadeia de isoladores provocada pelos dejetos do animal originando perda das características isolantes, favorecendo o contornamento. Mesmo sem poluir diretamente a cadeia, no momento da defecação é expelido um jato que, nas imediações da cadeia pode criar uma zona de resistência dielétrica baixa originando um arco elétrico;
- Os pedaços de ramo utilizados pelas cegonhas para construção do ninho, podem tocar numa zona em tensão provocando um curto-circuito fase-terra. Mesmo a queda de pedaços de ramo pode também dar origem a um curto-circuito.

Com o natural aumento de avarias/indisponibilidades na RNT devido a esta temática, o ORT estabeleceu um conjunto de medidas de modo a:

1. Limitar os locais de edificação de ninhos<sup>14</sup> nos apoios, e favorecer a sua construção em locais no apoio cujo risco seja menor;
2. Controlar o crescimento da população, bem como verificar a eficácia destas medidas.

No que concerne ao ponto 1. foram introduzidos acessórios nos apoios para a inibição do poiso que dificultam a construção ninhos e a circulação nas suas redondezas que se assemelha a um anemómetro mas com dimensões muito maiores como é visível na Figura 2.42.

---

<sup>14</sup> Locais que, pela sua posição, são propícios a que existam indisponibilidade, p. ex ninhos por cima de cadeias de isoladores.

Para o favorecimento da nidificação foram instaladas plataformas nos apoios, de forma a tornar-se mais *apetecível* a nidificação nesses locais, conforme a Figura 2.43.



Figura 2.42 - Inibidor de poiso



Figura 2.43 -Plataforma

### 2.3. Conclusões do Capítulo

Neste capítulo apresentou-se e identificou-se os elementos que constituem uma linha aérea de MAT. Foi também, de forma sucinta, introduzida a história da implementação da rede Nacional de transporte.

Todos os elementos apresentados seguem parâmetros definidos em normas internacionais e em normas do operador da rede de modo a garantir tanto a segurança da operação como a disponibilidade requerida para a rede Nacional de transporte.

De seguida ir-se-á apresentar e caracterizar a inspeção de linhas aéreas por via aérea.

## 3. Inspeção a linhas aéreas

### 3.1. Generalidades

A inspeção a linhas aéreas por via aérea, sejam de MAT, AT ou MT, inserem-se num cariz de manutenção planeada com vista a verificar o estado dos componentes que compõem a linha.

No que respeita a MAT, a inspeção é constituída por diversos segmentos sendo eles:

- IMD – Inspeção medição de distâncias;
- IVA – Inspeção visual;
- ITA – Inspeção termográfica;
- LNC – Recenseamento e localização de ninhos de cegonha;
- NC – Registo de apoios, por segmento, com ninhos de cegonha;
- UN – Identificação e localização de uniões

Este tipo de inspeção realiza-se a partir de um helicóptero preparado para o efeito, sendo que a IVA, a ITA, a IMD, a UN e a NC realizam-se em simultâneo.

### 3.2. Sistemas instalados

Para a realização das ações elencadas anteriormente torna-se necessário a instalação de equipamentos a bordo da aeronave. Dependendo do tipo de operação realizada pela entidade inspetora são instalados diferentes equipamentos que, entre outros, podem ser:

- Sistema de recolha vídeo, com capacidade termográfica e capacidade de visualização UV, conforme Figura 3.1;
- Sistema de mapeamento para medição de distâncias, utilizando tecnologia *Light Detection and Ranging* – LiDAR, apresentado na Figura 3.2;
- Sistema de gravação que conjuga a gravação de vídeo, com o percurso realizado, bem como o *pinpoint* das anomalias detetadas, para o posterior processamento em *Geographic Information Systems* - GIS.

Os técnicos a bordo da aeronave poderão ainda ter ao seu dispor: binóculos estabilizados, máquinas fotográficas, e material informático diverso de forma a complementar os sistemas referidos anteriormente.



Figura 3.1 - Gimbal estabilizada



Figura 3.2 - Pod LiDAR instalado num helicóptero

### 3.3. Inspeção visual

Esta inspeção tem como objetivo identificar todos os defeitos visíveis, bem como uma avaliação visual do estado dos componentes da linha. O voo deve ser lento e realizado a cerca de 15m da linha, de forma a permitir a visualização dos defeitos.

Por forma a documentar devidamente, os defeitos, são registados por forma fotográfica com georreferenciação obtendo uma localização expedita. De salientar que de todos os tipos de inspeção a realizar esta é a que, por norma, devido ao número de elementos a inspecionar, é onde se tem maior probabilidade de encontrar mais defeitos.

#### 3.3.1. Tipos de defeitos encontrados

Não é objeto deste trabalho elencar todos os tipos de defeitos passíveis de serem encontrados neste tipo de Inspeção, pois tendo em devida consideração não só a multiplicidade de possibilidades, mas também a quantidade de elementos que compõe uma linha tal tarefa tornar-se-ia demasiado morosa. Contudo, seguidamente apresentam-se os defeitos mais comuns, sendo o mais frequente o “isolador partido”.

##### 3.3.1.1. Equipamentos dos apoios

Neste grupo inserem-se todos os defeitos encontrados nos equipamentos que pertencem aos apoios, salientando-se a corrosão no apoio e inibidores de poiso danificados, conforme Figuras 3.3, 3.4 e 3.5.



Figura 3.3 - Corrosão em cantoneiras de um apoio



Figura 3.5 - Inibidor de poiso partido



Figura 3.4 - Base de apoio queimada

### 3.3.1.2. Equipamentos dos cabos condutores e cabo de guarda

Neste grupo inserem-se os cabos condutores e todos os equipamentos aos quais estão fixos, salientando-se, entre outros, a condição dos cabos condutores e de guarda, balisores, amortecedores *stockbridge*, sinalização e separadores.



Figura 3.6 - Fiador cabo de guarda solto



Figura 3.7 - Amortecedor *Stockbridge* partido



Figura 3.8 - Balisor partido



Figura 3.9 - Esferas de sinalização derretidas

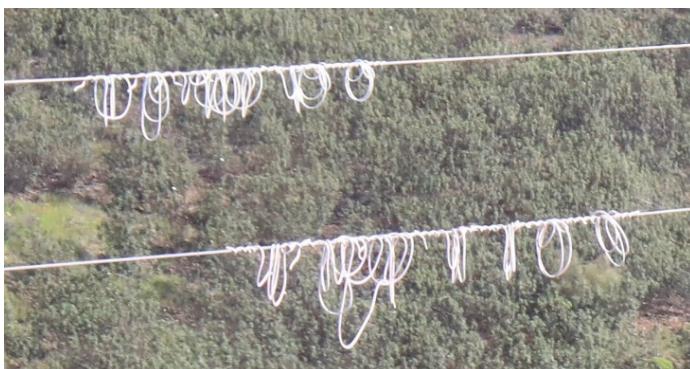


Figura 3.10 - BFD's derretidos



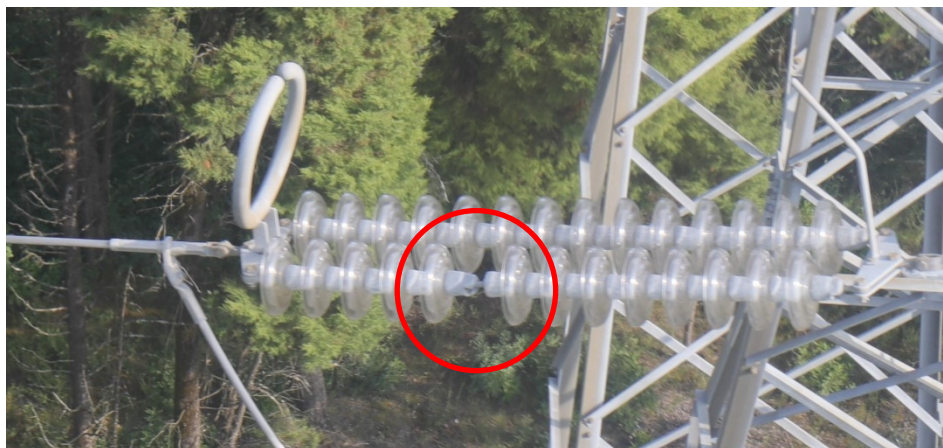
**Figura 3.11 - Cabo de guarda com corrosão e desfiado**



**Figura 3.12 - Separador partido**

### **3.3.1.3. Equipamentos Cadeias de isoladores**

Neste grupo inserem-se os equipamentos que compõem uma cadeia de isoladores, acessórios incluídos, salientando-se, entre outros, o estado dos isoladores, e anéis de guarda



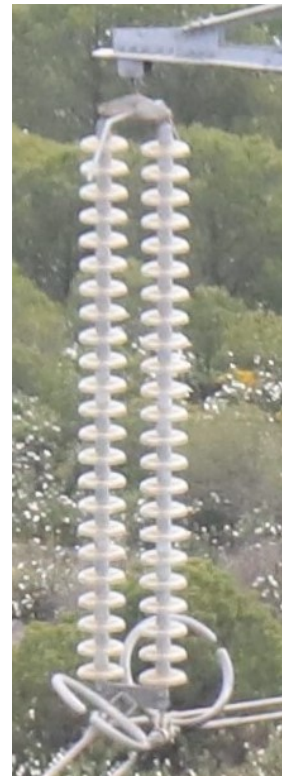
**Figura 3.13 - Isolador partido em linha de 220 kV**



**Figura 3.14 - Dois isoladores partidos na mesma cadeia em linha de 220kV  
- Alternados (Esq<sup>º</sup>) e Consecutivos (Dt<sup>º</sup>)**



**Figura 3.15 - Anéis de guarda com corrosão**



**Figura 3.16 - Anéis de guarda soltos**



**Figura 3.17 - Fiador solto**

### **3.4. Inspeção medição de distâncias**

O RSLEAT prevê distâncias mínimas a serem observadas na implementação e exploração das linhas de alta tensão. Devido ao perigo inerente de ocorrência de arcos elétricos ou mesmo curtos-circuitos Fase-Terra, devido a eventuais contactos entre os componentes da linha e eventuais obstáculos (edifícios, vegetação ou solo), esta inspeção tem como objetivo a verificação da existência de obstáculos localizados na faixa de proteção das linhas.

De acordo com o RSLEAT as distâncias mínimas a obstáculos que as linhas elétricas de alta tensão têm de cumprir são as apresentadas na Tabela 3.1:

**Tabela 3.1 - Distâncias mínimas a obstáculos a observar em linhas aéreas de alta tensão (DECRETO-REGULAMENTAR nº1/92)**

Tipo de obstáculos	Distância mínima(m)		
	150 kV	220 kV	400 kV
Solo	6,3	7,1	8,0
Árvores	3,1	3,7	5,0
Edifícios	4,2	4,7	6,0
Estradas	7,8	8,5	10,3
Vias-férreas eletrificadas <sup>15</sup>	4	4,7	16,0
Vias férreas não eletrificadas	7,8	8,5	10,3
Outras linhas aéreas <sup>16</sup>	4,5	5,2	7,0
Obstáculos diversos	3,2	3,7	5,0

<sup>15</sup> Para distâncias entre o ponto de cruzamento e o apoio mais próximo, iguais ou inferiores a 200m.

<sup>16</sup> Para linhas de tensão igual ou inferior ao nível de tensão da linha e para distâncias entre o ponto de cruzamento e o apoio da linha de tensão superior mais próximo iguais ou inferiores a 300m.

Esta inspeção é realizada com recurso a tecnologia LiDAR que consiste na emissão de luz, cuja a distância ao obstáculo é calculada pelo tempo de reflexão, de forma análoga ao de um Sistema RADAR. O resultado deste sistema resulta numa *nuvem* de pontos que, após processamento, produz uma imagem 3D da linha aérea em toda a sua extensão. Nas Figuras 3.18, 3.19 e 3.20 apresentam-se exemplos de três vistas dessa imagem 3D (Topo, lateral e longitudinal) correspondentes ao mesmo vão.

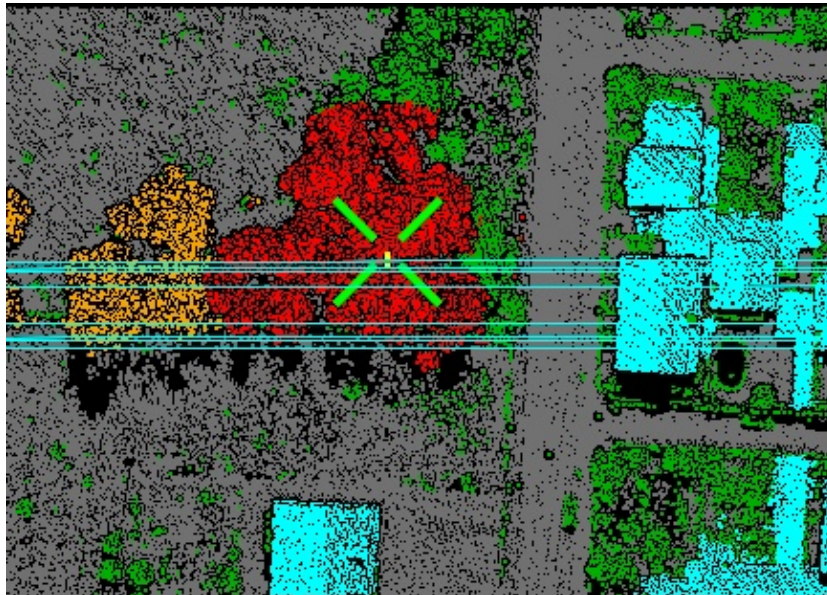


Figura 3.18 - Imagem LiDAR processada (Vista de topo)

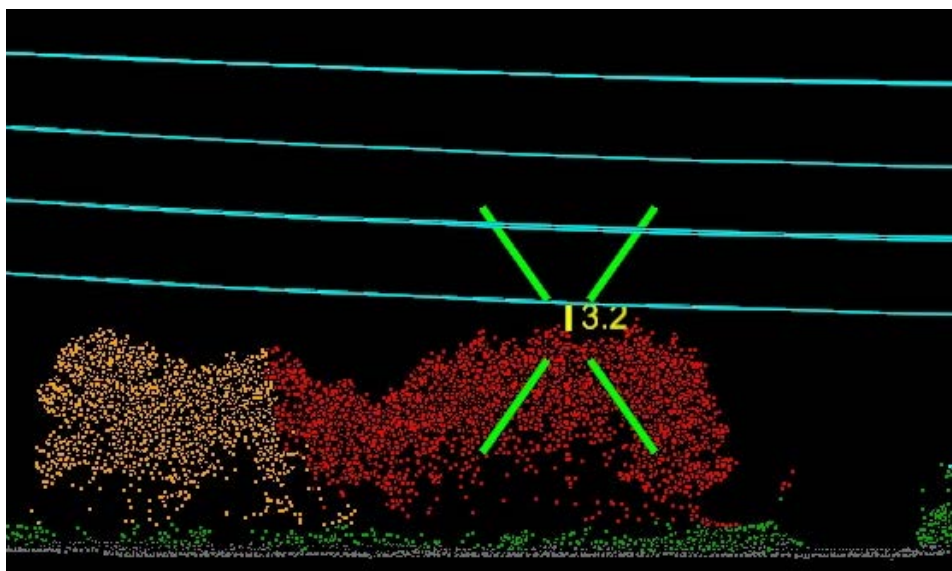


Figura 3.19 - Imagem LiDAR processada (Vista lateral)

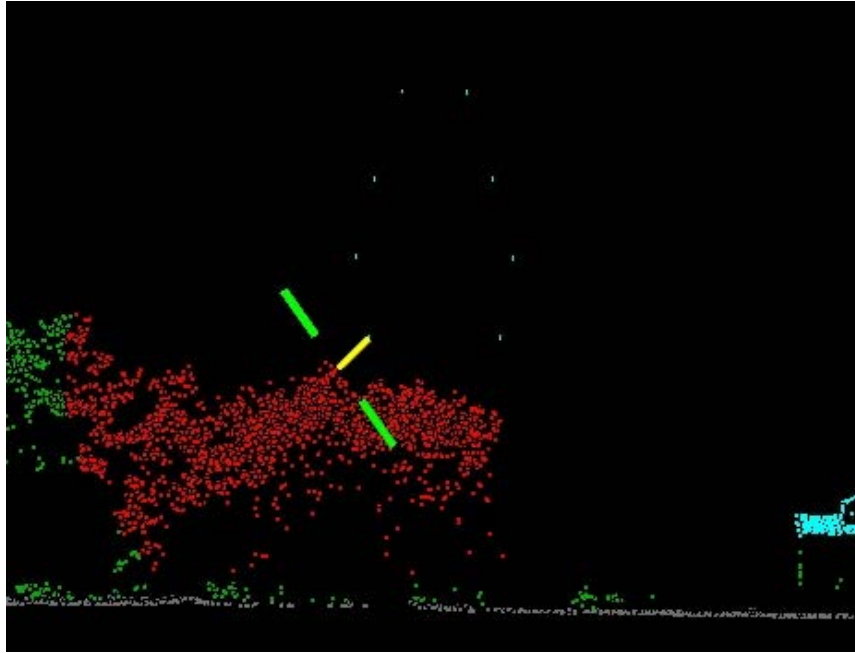


Figura 3.20 - Imagem LiDAR processada (Vista longitudinal)

A diferença de cores nas imagens é configurável de forma a classificar os graus de gravidade. Esta é, sem dúvida, uma ferramenta relevante servindo de base ao cumprimento dos regulamentos no que concerne às distâncias mínimas a obstáculos e tendo em consideração a qualidade dos resultados.

### 3.5. Inspeção termográfica

A inspeção termográfica destina-se à deteção e medição da temperatura absoluta e do seu diferencial relativamente a um elemento idêntico que não se encontra sobreaquecido. Para esta inspeção é necessária uma câmara IV (instalada na *gimbal*) e consequente *software* de processamento termográfico.

Os pontos mais prováveis de apresentar sobreaquecimentos são, sem dúvida, as discontinuidades da linha, nomeadamente pinças de amarração, uniões, juntas de reparação, fiadores, ligadores, entre outros. Os isoladores poderão também apresentar sobreaquecimentos, originados pela eventual corrente de fuga causada por poluição e/ou danos físicos. Nesta situação, o aquecimento é proporcional à corrente que circula na linha, acrescentando ainda o efeito de arrefecimento devido ao vento.

No caso da RNT, para a caracterização de uma situação anómala, que tem a finalidade de priorizar e classificar o defeito, tendo como fim último uma data limite para uma intervenção corretiva é aplicada a expressão, que resulta num valor de temperatura corrigido:

$$T_c = \left[ \frac{\left( \frac{P_{nom}}{2} \right)^2}{P} \right] \times \left[ \frac{V^{0,448}}{0,6} \right] \times (tPQ - tRef) \quad [^{\circ}C] \quad (3.1)$$

Em que:

Tc - Temperatura corrigida para avaliação de criticidade [°C]

Pnom – Potência nominal da Linha [MVA];

P – Potência da linha no momento da inspeção [MVA];

V - Velocidade do vento durante a medição [ms<sup>-1</sup>];

tPQ - Temperatura do ponto quente [°C];

tRef - Temperatura do ponto de referência [°C].

É realizada também uma extrapolação em situações de potência específicas, nomeadamente a 25, 50, 75 e 100% da potência nominal, de forma a prever o aquecimento no elemento para o caso de elevação da carga na linha. Nas Figuras 3.21 e 3.22, apresentam-se exemplos de dois pontos quentes, numa união e numa pinça de amarração, respetivamente.



Figura 3.21 - Ponto quente em união

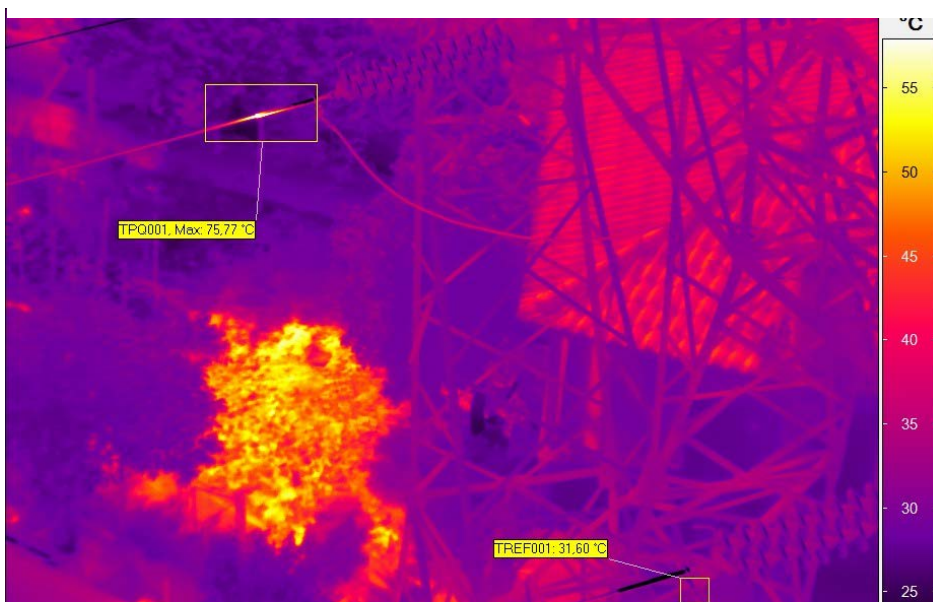


Figura 3.22 - Ponto quente em pinça de amarração

Em função do valor obtido da expressão (3.1), o defeito é classificado, e atribuído um grau de priorização, que definirá um prazo máximo para a sua reparação ou vigilância, conforme regulamentações do operador da RNT.

### **3.6. Inspeção de ninhos de cegonha, recenseamento e localização**

A INC é uma inspeção que se realiza aquando da IVA e tem como objetivo a indicação de existência de ninhos de cegonha nas linhas identificadas em áreas de nidificação. Os dados desta inspeção serão usados para a LNC.

A LNC é uma inspeção que se realiza após o período de nidificação e caracteriza a nidificação, na medida em que identifica o local específico do apoio onde está construído o ninho.

### **3.7. Registo de uniões**

Este registo, a realizar aquando da IVA, identifica o local onde estão colocadas as uniões e as juntas de reparação.

### **3.8. Conclusões do capítulo**

Neste capítulo foi apresentada e caracterizada a inspeção por via aérea a linhas aéreas de muito alta tensão. Salvo procedimentos específicos de cada operador, mediante diferentes níveis de tensão, e de uma forma geral, esta inspeção realiza-se de forma idêntica em vários países. A inspeção por via aérea a linhas aéreas é um procedimento que se reveste de um risco considerável, dado a necessidade de realização de voos próximos de linhas elétricas, a baixa altitude e a baixa velocidade, que, em caso de emergência a bordo, o piloto terá uma reduzida margem de manobra para conseguir aterrar em segurança. No entanto, o resultado desta operação permite ao operador obter um *situational awareness* do estado da rede.

Em função dos defeitos encontrados o operador da rede prioriza e planeia as ações de manutenção corretiva a serem realizadas, contribuindo de sobremaneira para os índices de disponibilidade que lhe estão cometidos em regulamentação própria.

De todos os defeitos apresentados, o maior recorrente é o defeito “isolador partido”. Em função desse facto, no próximo capítulo, ir-se-á desenvolver a temática do isolamento bem como efetuar-se o dimensionamento de uma cadeia de isoladores.

## 4. Isolamento e isoladores

### 4.1. Generalidades

Os isoladores têm como função o isolamento entre os elementos sob tensão (condutores) e os elementos que, em norma, não se encontram sob tensão (apoio e cabos de guarda).

Este isolamento é garantido pelo uso de cadeias de isoladores (ou por um isolador rígido), sendo determinado pelo nível de tensão aplicado e a linha de fuga necessária.

### 4.2. Caracterização do isolamento

#### 4.2.1. Nível de isolamento

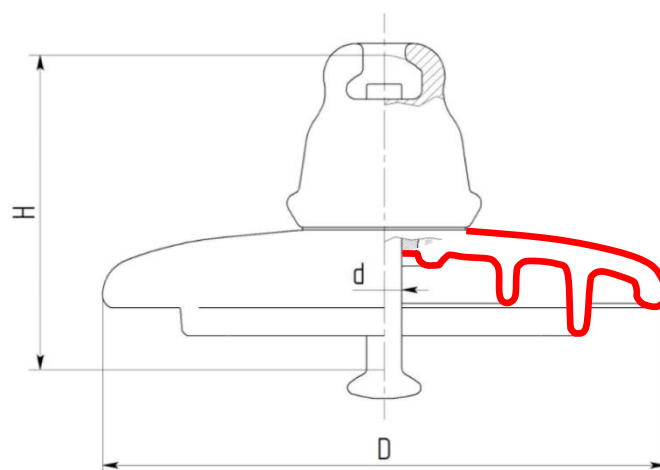
O nível de isolamento de um isolador (ou cadeia) tem como definição a *tensão suportada por um isolador sob chuva, durante um minuto e à frequência de 50 Hz, e também com uma onda de impulso com as características definidas nas Normas IEC (Távora)*. Esta definição é materializada, em conjugação com os ensaios definidos na IEC 383-1, na Tabela 4.1, adaptado para as tensões de serviço em MAT na RNT:

**Tabela 4.1 - Níveis de tensões de ensaio. (Adaptado de (Rosário, 2011))**

Tensão de Serviço $U_c$ [kV]	Tensão máxima $U_m$ [kV]	Tensão de Ensaio de 1 minuto sob chuva $U_{ch}$ [kV]	Tensão de ensaio ao choque $U_{imp}$ [kV]
150	170	275	750
220	245	395	950
400	420	710	1425

#### 4.2.2. Linha de fuga e grau de Isolamento

A linha de fuga consubstancia-se na distância que a corrente elétrica tem de percorrer pela superfície do isolador para que exista um contornamento, conforme exemplificado na Figura 4.1.



**Figura 4.1 - Linha de fuga num isolador**

O grau de isolamento, por sua vez, constitui-se como a *relação entre o comprimento da linha de fuga de um isolador (ou comprimento total da linha de fuga de uma cadeia de isoladores) e a tensão composta* (Távora).

Tendo em consideração o local onde a linha é desenvolvida, em termos de poluição (industrial, salinidade, etc.), surge o conceito de linha de fuga específica, que contém os valores recomendados para o grau de isolamento, conforme a Tabela 4.2:

**Tabela 4.2 - Valores mínimos de grau de isolamento recomendados (Adaptado de (Rosário, 2011))**

<b>Classe</b>	<b>Nível de Poluição</b>	<b>Tipificação Ambiental</b>	<b>Linha de Fuga Específica Mínima - <math>LF_e</math> [mm/kV]</b>	<b>Salinidade Equivalente [kg/m<sup>3</sup>]</b>
1	Fraca	Zonas Agrícolas, montanhosas, e com fraca densidade industrial, situadas a pelo menos 10km da orla marítima.	16	≥10
2	Média	Zonas com indústrias não poluentes ou com grande densidade habitacional, sujeitas a vento e chuvas a pelo menos 5km do mar.	20	≥28
3	Forte	Zonas de forte densidade habitacional e industrial, próximas do mar (<5km) ou submetidas a ventos marítimos fortes.	25	≥80
4	Muito Forte	Zonas sujeitas a poeiras industriais condutoras, zonas costeiras com ventos fortes e poluentes e zonas desérticas com tempestades de areia.	31	≥160

No caso particular da RNT os dimensionamentos realizam-se de forma generalizada para poluição, nos níveis “média” e “forte”, sendo que nas situações em que se verifica poluição do tipo “muito forte” o seu dimensionamento realiza-se caso a caso.

### **4.3. Isoladores *Cap and Pin***

Um isolador *Cap and Pin*<sup>17</sup>, devendo a sua designação ao método de fixação aos elementos terminais e/ou a outros isoladores, já referida em 2.2.5, é constituído pelo dielétrico, campânula e haste ou espigão.

<sup>17</sup> Também chamado de calota e haste

A envolver os três constituintes, de forma a mantê-los agregados como um só é colocado, nos espaços vazios, cimento *portland*, como ilustra a Figura 4.2.

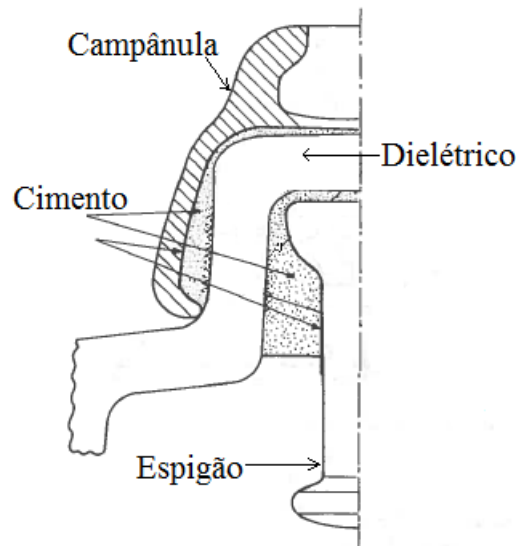


Figura 4.2 - Elementos que compõem um isolador (Adaptado de (Queirós, 2013))

#### 4.3.1. Dielétrico

O elemento de um isolador que deve impedir a passagem de corrente elétrica aos elementos normalmente sem tensão é chamado de dielétrico podendo ser dos seguintes tipos:

- Porcelana<sup>18</sup>;
- Vidro.

A porcelana, agora em desuso para os isoladores de linha, é uma mistura homogênea de argila e de quartzo apresentando uma elevada rigidez dielétrica, com uma boa resistência mecânica aos esforços e variações de temperatura. É ainda finalizada por esmalte de forma a dificultar a aderência de humidade, poeiras e de depósitos sólidos aumentando a resistência elétrica superficial do isolador. Pese embora a sua longa história de uso a porcelana aponta como desvantagens a possibilidade de ter defeitos escondidos, ou seja, existir uma perfuração que diminua a sua linha de fuga e também a probabilidade de ser vandalizado.

O Vidro temperado possui uma boa resistência mecânica e excelente comportamento às variações de temperatura, possuindo uma rigidez elétrica cerca de 45% mais elevada que a porcelana. Acresce ainda o facto deste tipo de material ter como grande vantagem uma clara visualização de defeitos, pois caso haja um defeito este material parte, identificando-se facilmente. Este tipo de isolador apresenta ainda uma maior probabilidade de ser vandalizado quando em comparação com os de porcelana.

---

<sup>18</sup> Também chamada de porcelana eletrotécnica

### 4.3.2. Espigão

O espigão é a peça metálica que permite a ligação a outro isolador da cadeia ou terminal metálico. A ligação entre o espigão e o material dielétrico é assegurada pela introdução de cimento na cavidade inferior da saia. A expansão do cimento deve ser de tal forma correta que estabeleça uma ligação forte entre ambos, sem criar pontos de grande densidade de força que provoque a fratura do material dielétrico. (Queirós, 2013)

### 4.3.3. Campânula

A campânula é a ferragem metálica que abraça a parte superior do dielétrico, a qual é fixa através do uso de cimento ao longo de toda a superfície. Tal como no espigão, a qualidade da ligação deve ser elevada por forma a garantir resistência mecânica à tensão nominal.

### 4.3.4. Características eletromecânicas

Este tipo de isoladores, de acordo com a IEC 60305, são identificados de acordo com uma codificação alfanumérica, sendo o 1º carácter a letra “U” seguido por um número que corresponde à carga de rotura eletromecânica.

De seguida a codificação poderá ter uma, duas ou três letras consecutivas, caracterizando o tipo de fixação, o tipo de passo ou se é um isolador para poluição. Desta forma as três letras poderão ser:

- 1ª letra:
  - “B” – Isolador *cap and pin*;
  - “C” – Isolador *clevis and tongue*<sup>19</sup>.
- 2ª letra:
  - “S” – Passo pequeno;
  - “L” – Passo longo.
- 3ª letra: “P” – Longa linha de fuga.

Uma possível codificação, de um tipo de isolador usado na RNT, será U70BS, em que:

- “U” – identifica um isolador de linha, cerâmico ou de vidro;
- “70” - Carga de rotura eletromecânica [kN]
- “B” – Fixação do tipo *Cap and Pin*;
- “S” – Passo curto

---

<sup>19</sup> Também denominado por isolador de garfo e olhal

As características elétricas e mecânicas de cada elemento que constituem as cadeias de isoladores, estão perfeitamente definidas na mesma norma acima referida, conforme a Figura 4.3, e que se constituem como base de escolha para um bom dimensionamento. De salientar:

- Diâmetro do espigão [mm];
- Carga de rotura eletromecânica [kN];
- Carga máxima admissível [kN];
- Passo nominal [mm];
- Comprimento da linha de fuga [mm];
- Diâmetro do disco isolante [mm];
- Peso [kg];
- Tensão de perfuração em óleo [kV].

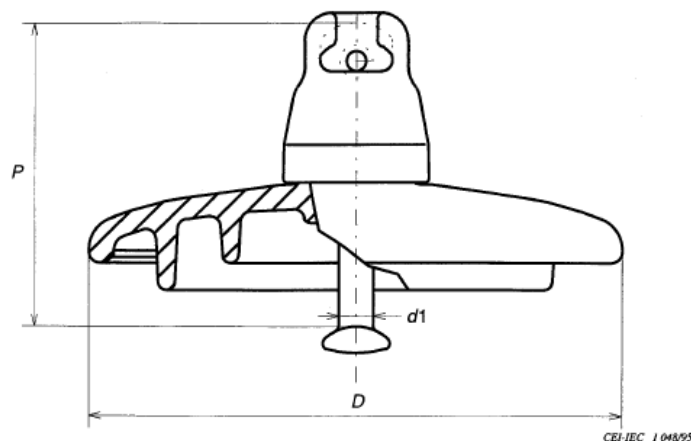


Figura 4.3 - Isolador do tipo "calota e haste" (International Electrotechnical Commission, 1995)

#### 4.4. Isoladores de compósito

Os isoladores rígidos em compósito são constituídos por um núcleo central de fibra de vidro, revestido por uma borracha siliconada vulcanizada a alta temperatura, tendo nas suas extremidades ferragens metálicas para fixação ao apoio de um lado e ao(s) cabo(s) condutor(es) do outro. Esta estrutura confere uma maior resistência mecânica, face ao seu peso, que é muito menor quando em comparação com uma cadeia de isoladores, em igualdade de características elétricas.

Estes isoladores, com o decréscimo do seu custo ao longo do tempo, têm vindo a ser cada vez mais utilizados em zonas com poluição do tipo "muito forte" correspondendo a zonas fortemente industriais, urbanas e perto do mar. As suas propriedades hidrofóbicas apresentam um melhor desempenho face à água e contaminação que os isoladores de porcelana e/ou vidro. No entanto este tipo de isolador apresenta menor tempo de vida útil quando em comparação com os isoladores de porcelana e de vidro temperado, apresentando-se uma comparação, entre os diferentes tipos de isoladores, na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3 - Quadro comparativo de diferentes tipos de isoladores - Adaptado de (Sousa, 2006)**

	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Porcelana</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longa história de uso</li> <li>• Pouca suscetibilidade a envelhecimento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrosão das partes metálicas</li> <li>• Esconde os defeitos</li> <li>• Vandalismo</li> </ul>
<b>Vidro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reconhecimento das unidades com defeito</li> <li>• Pouca suscetibilidade a envelhecimento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vandalismo</li> <li>• Corrosão das partes metálicas</li> </ul>
<b>Compósito</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peso</li> <li>• Comportamento à poluição</li> <li>• Custo de instalação baixo</li> <li>• Resistência a impactos</li> <li>• Pequeno perfil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possíveis fraturas frágeis</li> <li>• Suscetibilidade ao arco</li> <li>• Suscetibilidade para envelhecimento</li> <li>• Danos por animais (roedores, pássaros)</li> </ul>

No presente ponto apresentou-se, de uma forma geral, as vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de isoladores. No entanto, o foco será dirigido para os isoladores de vidro, tendo em consideração o objeto deste trabalho que se consubstancia na inspeção por via aérea a linhas de MAT, com especial interesse no comportamento dos isoladores de vidro temperado.

#### **4.5. Comportamento de um isolador**

A performance de um isolador está diretamente correlacionada com o ambiente em que está inserido destacando-se:

- Condições ambientais: Ambientes Secos, Húmidos, Gelo, Poluição;
- *Stress* mecânicos: Vibrações, Temperatura;
- *Stress* elétricos: Sobretensões, Arcos Elétricos

##### **4.5.1. Comportamento térmico**

No que diz respeito ao comportamento térmico os isoladores, no caso da RNT, podem possuir um espigão de 16mm ou de 20mm. Esta diferença é definida pela corrente de curto-circuito que a cadeia de isoladores tem de suportar durante um (01) segundo(s).

##### **4.5.2. Comportamento mecânico**

O comportamento mecânico de um isolador é definido por todos os elementos que o constituem, nomeadamente as ligações metálicas e o dielétrico. Na ocorrência de uma falha mecânica o cabo condutor cai, originando tempos de indisponibilidade elevados. Desta forma os isoladores

devem ser dimensionados para resistir aos esforços mecânicos atuantes, sendo eles: peso próprio, peso dos condutores, resultante da ação do vento e tensão mecânica de tração.

### 4.5.3. Comportamento elétrico

A função de um isolador é de não permitir a passagem de corrente elétrica dos condutores ao apoio. Esta passagem pode advir dos seguintes fatores (Távora):

- Condutividade elétrica através da massa dos isoladores que, com o controle de qualidade existente nos dias de hoje assim como os materiais usados, é desprezada.
- Condutividade elétrica superficial, esta característica é dependente do estado de limpeza do isolador, sendo que o seu valor aumenta com a acumulação de humidade, poeiras e depósitos salinos. Este fenómeno é incontornável e é minimizado pelo aumento da linha de fuga que se consubstancia na alteração da configuração das nervuras ou *saídas* dos isoladores.
- Perfuração da massa do isolador, devido a impurezas existentes em peças de espessura apreciável. Dado a impossibilidade de se obter uma massa perfeitamente uniforme, o fenómeno é atenuado com a sobreposição de duas ou mais peças.
- Descarga disruptiva, com a ocorrência de um arco elétrico entre o condutor e o apoio, através do espaço de ar entre eles. Nesta situação a rigidez dielétrica pode diminuir devido à humidade relativa ou mesmo chuva com um determinado ângulo; neste caso o fenómeno é atenuado com o afastamento devido entre o condutor e o apoio.

Tendo em conta estes fatores um isolador perfeito (limpo e seco) pode ser reduzido a um circuito equivalente RC, conforme a Figura 4.4, em que  $C_0$  e  $R_0$  correspondem à Capacidade elétrica e Resistência elétrica do isolador, respetivamente.

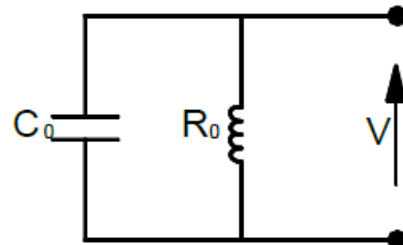


Figura 4.4 - Circuito equivalente de um isolador perfeito (George et al, 2013)

Também existente em variadas referências tem-se a variação de tensão ao longo da linha de fuga de um isolador perfeito e limpo. Essa variação está presente na Figura 4.5.

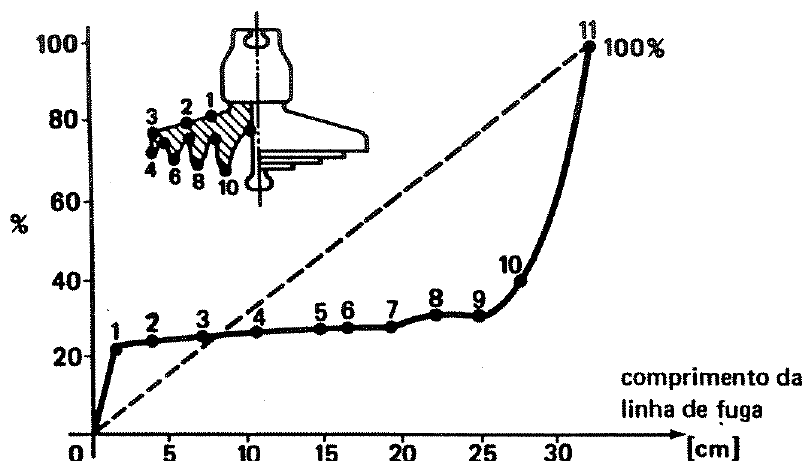


Figura 4.5 - Variação de Tensão ao longo de um isolador (Távora)

## 4.6. Dimensionamento eletromecânico de cadeias de isoladores

O dimensionamento de uma cadeia de isoladores é um processo que tem como objetivo o necessário isolamento das peças normalmente sem tensão (apoio e acessórios adjacentes) das peças em tensão (cabos condutores e acessórios adjacentes).

A cadeia deve também ser dimensionada de forma a suportar os esforços mecânicos originados pelo peso dos condutores, tensão exercida, forças externas, entre outros. O isolamento da cadeia deverá ser mantido em situações de chuva e considerando ainda o nível de poluição no local de instalação.

Desta forma, a título de exemplo, apresenta-se seguidamente o método de dimensionamento de cadeias de isoladores.

### 1. Determinação da linha de fuga mínima

$$LF_{min} = LF_e \cdot U_m \quad (4.1)$$

Em que:

$LF_{min}$  - Linha de fuga mínima [mm]

$LF_e$  - Linha de fuga específica mínima [mm/kV]

$U_m$  - Tensão máxima [kV]

### 2. Número de elementos que compõem a cadeia e linha de fuga total

$$N = \frac{LF_{min}}{LF_{el}} \quad (4.2)$$

Em que:

$LF_{min}$  - Linha de fuga mínima [mm]

$LF_{el}$  - Linha de fuga de cada elemento [mm]

$N$  - Número de elementos

$$LF_{tot} = LF_{el} \cdot N \quad (4.3)$$

Em que:

$LF_{tot}$  - Linha de fuga total da cadeia [mm]

### 3. Condições a verificar

$$LF_{tot} > LF_{min}$$

$$\text{Tensão contornamento de chuva cadeia} > 1,1 \times U_{ch}$$

$$\text{Carga mecânica máxima admissível} \times 0,4 > \text{Resistência mecânica máxima}$$

Tendo em consideração que a resistência mecânica que a cadeia tem de suportar é um fator impeditivo para o uso de um determinado tipo de isolador, para esse caso utiliza-se um tipo de isolador que possua resistência mecânica superior, repetindo-se o cálculo correspondente à linha de fuga e número de elementos que compõem a cadeia.

#### 4.6.1. Exemplo de Dimensionamento

Dê-se como exemplo de dimensionamento uma cadeia de suspensão para o nível de tensão de 220kV, inserida num local considerado com “poluição média”, prevendo-se utilizar isoladores do tipo U160BS:

- **Considerações Iniciais:**
  - Nível de tensão:  $U_c=220$  kV,  $U_m=245$  kV;
  - Tensão máxima 1min (chuva) – da Tabela 4.1:  $U_{ch} = 395$  kV
  - Nível de poluição prevista na zona a instalar: Média ( $LF_e = 20$  mm/kV).
  - Isoladores a instalar:
    - Tipo: U160BS
      - Linha de fuga de cada elemento:  $LF_{el} = 380$  mm
      - Passo: 146 mm
      - Diâmetro: 280 mm
      - Diâmetro do *pin*: 20 mm
      - Carga de rotura eletromecânica: 160 kN
    - Esforço mecânico máximo previsto na cadeia (peso próprio da cadeia, esforços verticais)

- **Determinação da linha de fuga mínima:**

$$LF_{min} = 20 \times 245 = 4900mm$$

- **Determinação do número de elementos que constituem a cadeia:**

$$N = \frac{4900}{380} = 12,89 \approx 13 \text{ elementos}$$

- **Verificação das condições:**

$$1^a - 380mm \times 13 > 4900mm (=) 4940mm > 4900mm \quad \textbf{Validada}$$

$$2^a - 475kV^{20} > 1,1 \times 395kV (=) 475kV > 434,5kV \quad \textbf{Validada}$$

$$3^a - 160kN \times 0,4 > \text{Carga máxima prevista} (=) 64kN > \text{Carga máxima prevista}$$

---

<sup>20</sup> Valor obtido do catálogo da Sediver para uma cadeia consituída por 13 isoladores U160BS (Sediver, 2007)

Neste exemplo, em que não foi considerado o cálculo mecânico, verificou-se que, para uma poluição do tipo “média”, e para um nível de tensão  $U_c=220$  kV uma hipótese de dimensionamento seria a utilização de uma cadeia de 13 elementos de isoladores de vidro temperado do tipo U160BS.

Além deste dimensionamento deve-se ainda ter em conta o afastamento dos condutores à estrutura metálica e aos outros condutores existentes no mesmo apoio, para assim realizar a correta coordenação de isolamento. De modo a que todas estas condições sejam garantidas podem ser adicionados mais elementos por forma a que todas as condições do sistema apoio-cabos-isoladores sejam garantidas.

#### 4.7. Isolador partido

Um isolador partido, ou *stub*, é caracterizado como o dielétrico do isolador que não tem as suas abas, conforme apresentado na Figura 4.6. As razões da perda podem ser por vandalismo, por deficiência interna do material, entre outras.

Tal como num isolador sem danos, a performance de um *stub* está diretamente correlacionada com o ambiente já exposto em 4.5..

As características elétricas e o comportamento de um *stub*, bem como o seu circuito equivalente exposto na Figura 4.7, foram apresentadas por George, Prat, Tartier, & Lodi (George, Prat, Tartier, & Lodi, 2013) em que, em adição ao já referido para um isolador perfeito, na Figura 4.4,  $C_s$  e  $R_s$  correspondem à Capacidade elétrica e Resistência elétrica suplementares do vidro partido dentro da câpanula do isolador, respectivamente.



Figura 4.6 – Isolador U160BS Partido

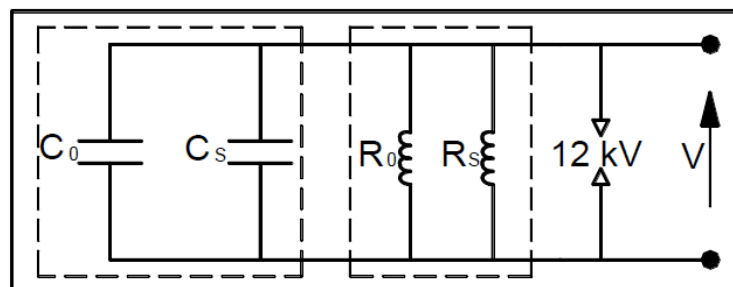


Figura 4.7 - Circuito equivalente de um *stub* (George et al, 2013)

Os autores apresentam ainda o resultado do comportamento experimental de uma tensão de 80kV aplicada a uma cadeia típica para 138kV com 8 isoladores substituindo isoladores perfeitos com *stubs*. Este estudo conclui que existe efectivamente um decréscimo da capacidade de isolamento, em condições secas, húmidas e de choque, estando esses resultados expressos na Figura 4.8.

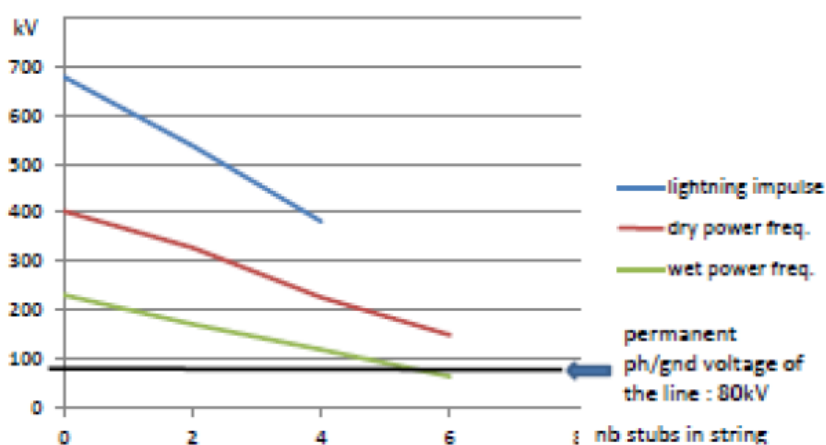


Figura 4.8 - Tensões limite numa cadeia com *stubs* (George et al, 2013)

Leite & Yanaguizawa após ensaios experimentais também concluíram que a presença de isoladores partidos afecta a capacidade de isolamento ao choque (Leite & Yanaguizawa, 2008), inferindo daí que a capacidade de isolamento sob chuva será também afetada, concluindo também que a posição dos *stubs* na cadeia era fator preponderante para a alteração do isolamento ao choque, como apresentado nas Figuras 4.9 e 4.10.

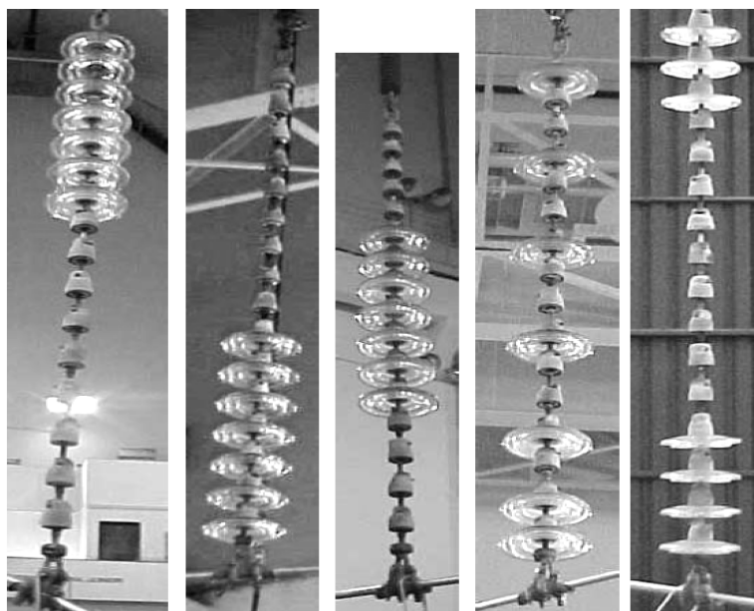


Figura 4.9 - Configurações numa cadeia de isoladores com *stubs* (Leite & Yanaguizawa, 2008)

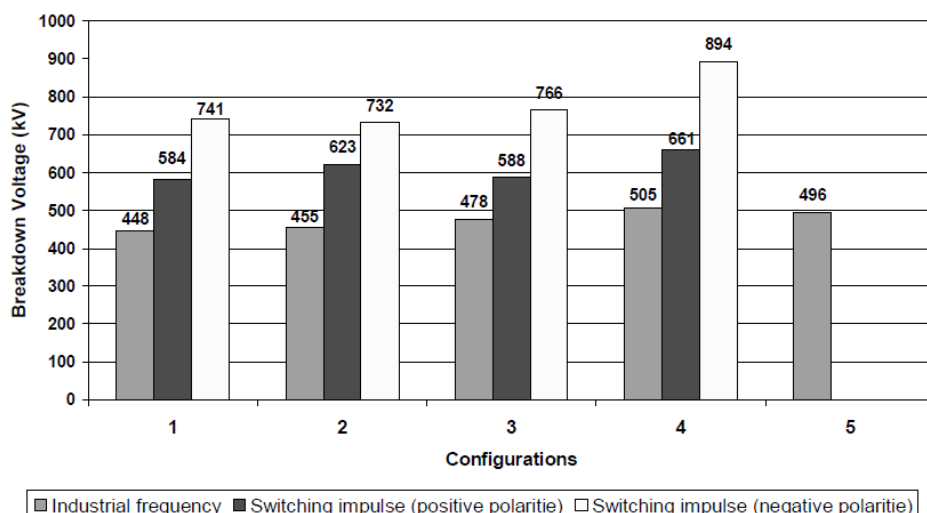


Figura 4.10 - Comparação de tensões limite em cadeias de isoladores com *stubs*, com diferentes configurações (Leite & Yanaguizawa, 2008)

## 4.8. Ensaio Experimental

De forma a verificar *in loco* a distribuição de tensão ao longo de uma cadeia de isoladores foram realizados dois ensaios no Laboratório de alta tensão da EDP Labelec. Estes ensaios além de servirem de exemplo de como é efetuada a distribuição de tensão numa cadeia servem também de controle para a simulação que irá ser apresentada mais adiante neste trabalho.

De salientar que por motivos de praticidade não foram utilizadas tensões da gama de MAT, permitindo assim a realização de medições de tensão com um voltímetro de média tensão.

Salienta-se ainda que, por razões de segurança, foi colocada uma rede conectada à terra de proteção com o propósito de proteção contra eventuais arcos elétricos.

### 4.8.1. Ensaio Realizados

Foram realizados dois ensaios com as seguintes características:

- **1º Ensaio**
  - Cadeia de 12 isoladores do tipo U70BS instalada conforme Figura 4.11;
  - Tensão aplicada ( $U_1$ ) de 28,66 kV.

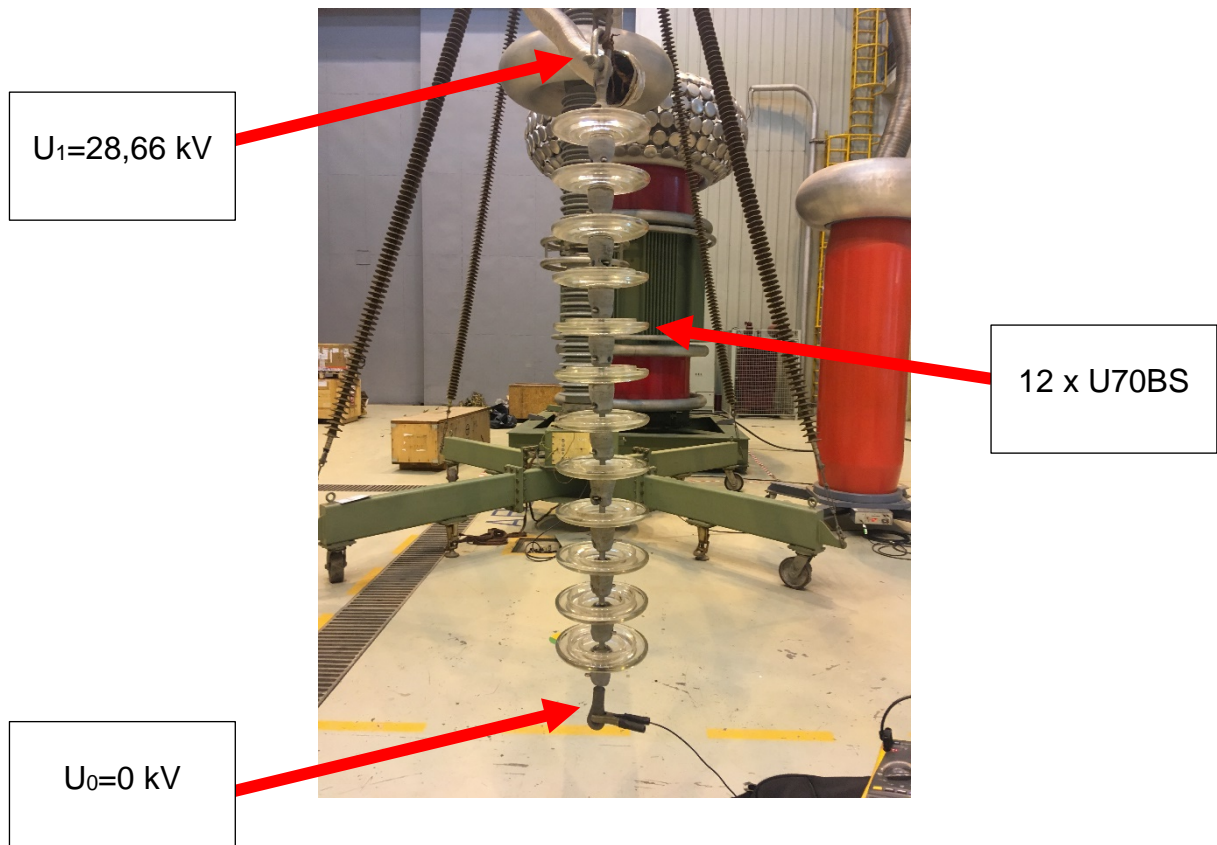


Figura 4.13 - Ensaio nº1: Cadeia com 12 Isoladores

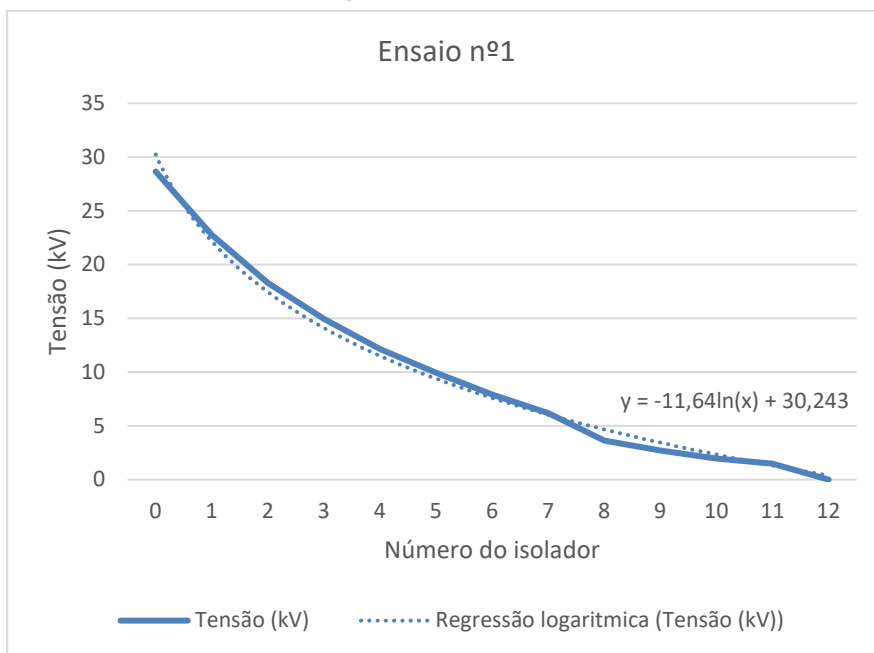


Figura 4.12 - Ensaio nº1: Curva de distribuição

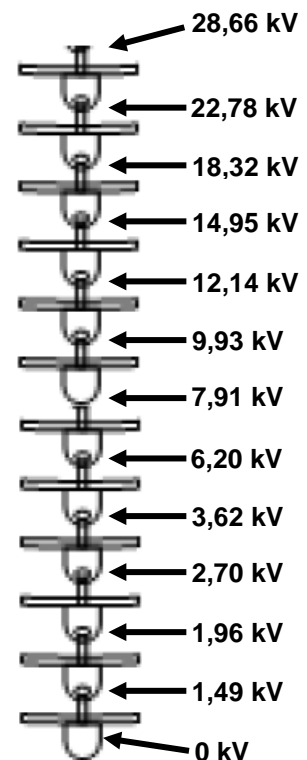


Figura 4.11 – Ensaio nº1: Resultados

Os resultados obtidos neste ensaio apresentam-se na Figura 4.13. Da experiência verificou-se uma distribuição semelhante a uma função logarítmica, por regressão, conforme análise do gráfico da Figura 4.12. A não linearidade da distribuição de tensão ao longo da cadeia de isoladores resulta da ligação à terra da rede de proteção, que altera os valores do campo elétrico, e por consequente os valores de tensão (Kothari & Nagrath, 2008).

- **2ºEnsaio**

- Cadeia de 11 isoladores do tipo U70BS com um *stub* do lado do cabo condutor (10ª Posição), conforme Figura 4.14;
- Tensão aplicada ( $U_2$ ) de 27 kV.

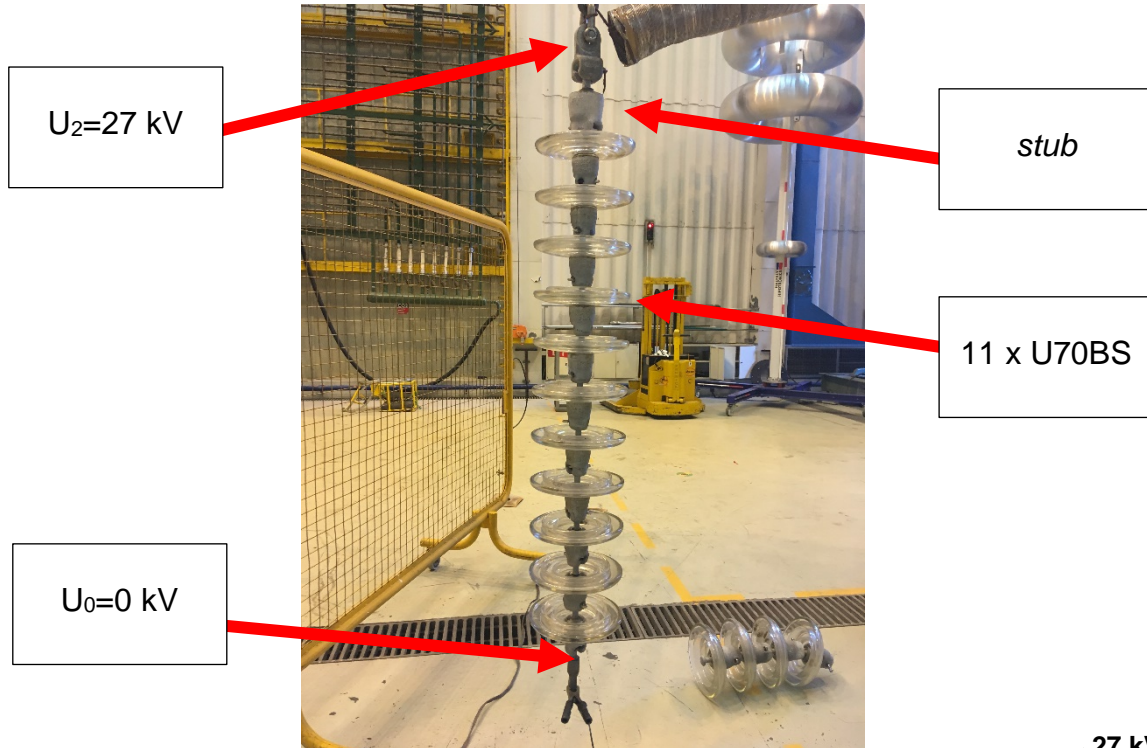


Figura 4.15 – Ensaio nº2: Cadeia de 11 Isoladores e um *stub*

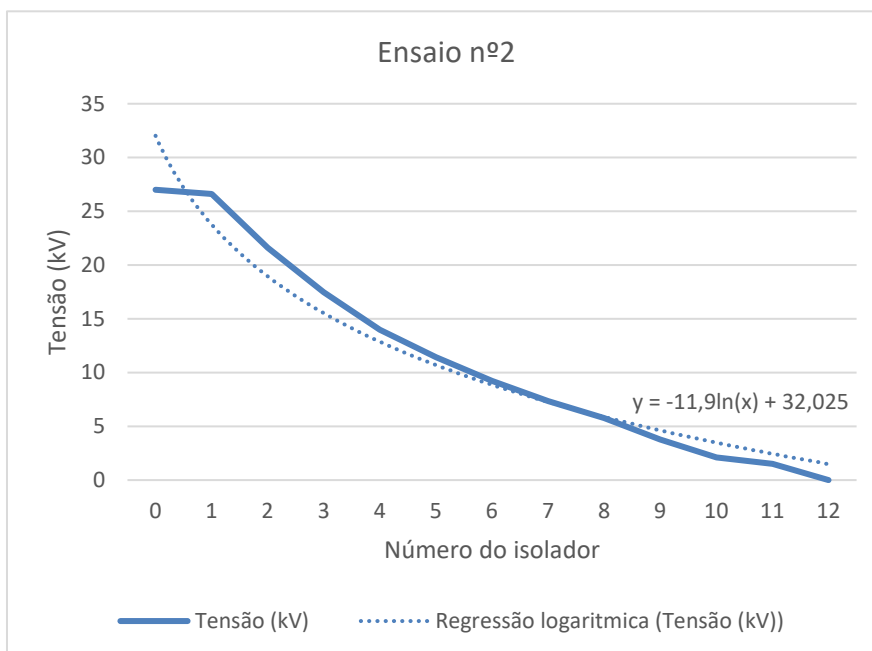


Figura 4.14 - Ensaio nº2: Curva de distribuição

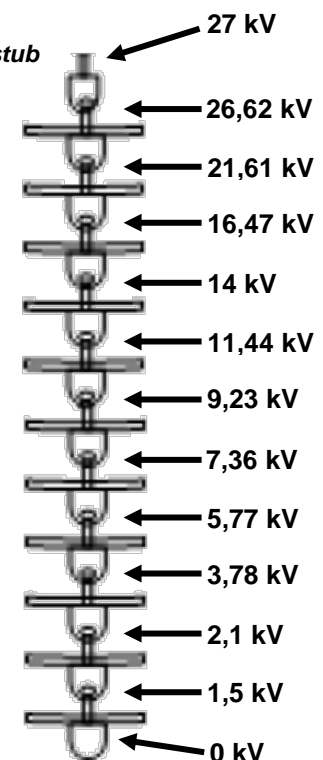


Figura 4.16 – Ensaio nº2: Resultados

Os resultados obtidos neste ensaio apresentam-se nas Figuras 4.15 e 4.16. Da análise verifica-se uma distribuição uniforme, após a posição associada ao *stub* (10ª). A queda de tensão, quando em comparação com a queda de tensão num isolador perfeito, é muito menor

que no ensaio anterior, indicando que um *stub* produz, efetivamente, uma alteração na distribuição de tensões e que os isoladores seguintes terão de compensar uma maior perda por isolador.

#### **4.9. Conclusões do capítulo**

Neste capítulo abordou-se a temática do isolamento, com especial interesse para o dimensionamento de isoladores e as suas características. Realizou-se ainda uma breve comparação entre os isoladores de vidro, porcelana e compósito, apresentando-se vantagens e desvantagens na escolha de cada um dos tipos.

Definiu-se os pressupostos a reter para um correto dimensionamento, ambientais, elétricos e mecânicos e, a título de exemplo, dimensionou-se uma cadeia de isoladores para um determinado apoio.

Introduziu-se o conceito de isolador partido ou *stub*, caracterizando-o e apresentando resultados de ensaios experimentais do comportamento de cadeias de isoladores, verificando-se que a presença de *stubs* influencia a sua capacidade de isolamento.

Por último apresentou-se o resultado de Ensaios experimentais que decorreram no laboratório de alta tensão da EDP Labelec.

No capítulo seguinte realizar-se-á o estudo da distribuição de tensão numa cadeia de isoladores, com recurso à análise de métodos finitos.

PÁGINA INTENCIONALMENTE DEIXADA EM BRANCO

## 5. Cálculo e simulação de grandezas

### 5.1. Método de elementos finitos e análise de elementos finitos

Com o avanço da tecnologia, nomeadamente computacional, e com a fabricação de estruturas cada vez mais complexas surgiram métodos que possibilitaram a análise de comportamentos a elementos de forma simulada, sendo um deles o método de elementos finitos ou *Finite Element Method* (FEM) que se consubstancia num método matemático para a resolução de equações parciais diferenciais.

Outros métodos são o *Finite Difference Method*, o *Boundary Element Method* e o *Equivalent Circuit Method*, estando as diferenças entre eles apresentados na Figura 5.1.



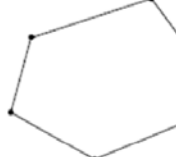
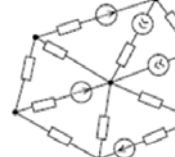
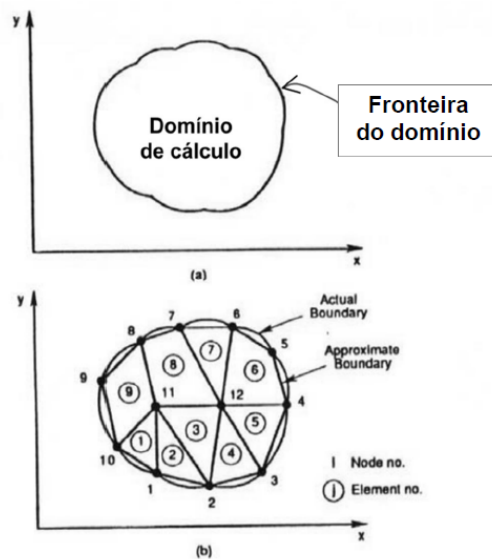
Method	Finite element method (FEM)	Finite difference method (FDM)	Boundary element method (BEM)	Equivalent circuit method (ECM)
Principle of discretisation				
Geometry approximation	Extremely flexible	Inflexible	Extremely flexible	Specific geometries
Non-linearity	Possible	Possible	Troublesome	Possible
Computational cost	High	High	High	Very low

Figura 5.1 - Diferenças entre métodos de cálculo (Luís, 2018)

O fim último deste método é a formulação para analisar, automaticamente, o cálculo de grandezas físicas (Tensão, Corrente, Força, Calor, entre outros) em equipamentos com geometria irregular em meios físicos irregulares, utilizando para esse desiderato a capacidade atual de computação existente nos computadores.

O funcionamento do método passa por considerar o problema a resolver equivalente a um conjunto agrupado de elementos finitos, sendo cada um desses elementos uma estrutura contínua mais simples. Existindo pontos comuns em vários elementos, designados por nós<sup>21</sup>, conforme a Figura 5.2, e que em cada nó se agregam diversos elementos, as grandezas físicas são conciliáveis entre eles e, estando esses elementos em equilíbrio, o resultado do conjunto agrupado comporta-se como um só corpo.

<sup>21</sup> Também designados por nodos



Elemento ①: nodos 1, 11 e 10;

Elemento ⑤: nodos 3, 4 e 12;

Elemento ⑨: nodos 10, 11, 8 e 9.

(a) região de solução; (b) discretização em elementos finitos.

**Figura 5.2 - Discretização espacial (Luís, 2018)**

A mais valia desta metodologia, é que a equação que gera o problema global é obtida pela reunião das equações determinadas individualmente para cada elemento finito empregue na modelização. Desta forma, a grandeza física em qualquer ponto do elemento, é obtida por via de interpolação, sendo as funções de interpolação polinómios de baixo grau iguais para todos os elementos idênticos, realçando-se a capacidade de generalização para a resolução de problemas bidimensionais e tridimensionais, compostos por materiais diferentes com geometrias irregulares.

O processo de formulação matemática do FEM envolve quatro grandes etapas (Luís, 2018):

1. **Discretização da região** onde se procura uma solução num número finito de sub-regiões;
2. **Aproximação da solução** em cada elemento, - utilizando interpolação polinomial obtendo-se, consequentemente as equações para cada elemento;
3. **Montagem de um sistema global** que inclui as equações de todos os elementos;
4. **Resolução do sistema** de equações resultante de forma a obter a solução do problema.

De uma forma geral o FEM possui, essencialmente, três métodos para cálculo dos valores em cada nó, sendo eles: 1) Método das diferenças finitas (*Ritz*), 2) Método variacional (*Rayleigh-Ritz*) e 3) Método dos resíduos pesados (*Galerkin*).

O FEM transforma um problema contínuo, expresso em equações diferenciais, num problema discreto, expresso em expressões algébricas, em que a solução para o sistema de equações será aproximada. O valor do erro define-se tendo em conta as capacidades de processamento e as necessidades do problema.

A análise de elementos finitos (FEA – *Finite Elements Analysis*) pode ser considerada como uma implementação do FEM para a resolução de um determinado problema. Esta análise, além de

conter a formulação matemática do FEM, tem ainda todos os restantes dados que podem ser, entre outros: geometria, tipos de material, condições fronteira, o tamanho dos elementos e consequentemente se a *mesh* é mais intrincada ou não.

Desta forma a FEA pode ser dividida em três grandes passos: o pré-processamento, o processamento e o pós-processamento, com diversas tarefas associadas a cada passo, apresentadas na Figura 5.3.

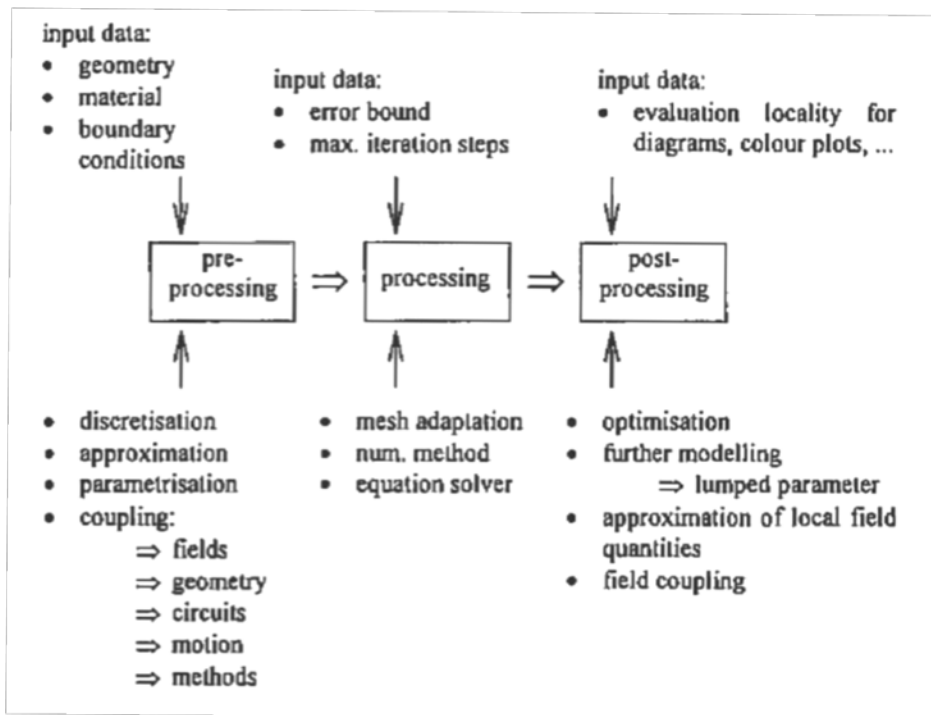


Figura 5.3 - Passos na análise de elementos finitos (Luís, 2018)

## 5.2. Caracterização dos modelos desenvolvidos

Sendo objeto deste trabalho a análise da distribuição de Tensão ao longo de uma cadeia de isoladores é necessário definir algumas considerações para o início da análise de elementos finitos, sendo eles:

1. Tipo de estudo a aplicar no FEA;
2. Modelação matemática;
3. Materiais constituintes com as suas características elétricas;
4. Desenhos *Computer Assisted Drawing* (CAD) das cadeias de isoladores;
5. Nível de tensão e cadeias de isoladores;

Para a realização da FEA foi escolhido o programa FEMM ©, por ser um programa *freeware* e intuitivo com provas dadas neste campo.

Este programa permite uma multiplicidade de estudos, salientando-se problemas magnetostáticos, electrostáticos e condução de corrente.

Tendo em consideração as conclusões referidas em 4.7 importa definir a distribuição de tensão ao longo da cadeia, nas seguintes condições:

- Isolador perfeito;
- *Stub*;
- Isolador com poluição;
- Cadeia completa (perfeita) limpa;
- Cadeia com *stubs* limpa;
- Cadeia completa poluída;
- Cadeia poluída com *stubs*.

Desta forma o estudo a aplicar será o *Current Flow*, existente no FEMM©, pois conjuga a condutividade e a permitividade dos materiais utilizados com a diminuição da linha de fuga, devido à existência de *stubs*.

Este estudo deriva do electrostático na medida em que a condutividade do material é inserida como variável, e tendo em conta esse aspeto é considerado um problema quasi-electrostático em que as componentes magnéticas nas equações de *Maxwell* podem ser desprezadas.

Considerando as dimensões a utilizar e dado que este programa tem esta possibilidade, será aplicado um modelo *Axisymmetric*. Esta escolha prevalece devido à simetria do isolador unitário e da respetiva cadeia de isoladores. Desta forma o programa representa um sólido 3D num 2D, por revolução, diminuindo muito tempo de cálculo face a um estudo em 3D.

As grandezas elétricas fornecidas por este estudo serão a distribuição da Tensão elétrica e a Intensidade do campo elétrico.

### 5.2.1. Formulação Matemática

O cálculo realizado pelo FEMM© no estudo *Current Flow* deriva das equações de *Maxwell*, para campos variáveis no tempo, em que os campos elétricos devem obedecer às seguintes fórmulas, aqui representadas na forma diferencial e descritas no manual do utilizador do *software* (Meeker, 2018):

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (5.1)$$

Em que:

$\vec{H}$  - Campo magnético [A/m]

$\vec{J}$  - Densidade de corrente elétrica [A/m<sup>2</sup>]

$\vec{D}$  - Campo de deslocamento elétrico [C/m<sup>2</sup>]

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (5.2)$$

Em que:

$\vec{B}$  - Densidade de fluxo magnético [Wb/m<sup>2</sup>]

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (5.3)$$

Em que:

$\vec{E}$  - Campo elétrico [V/m]

$$\vec{\nabla} \times \vec{D} = \rho \quad (5.4)$$

Em que:

$\rho$  – Densidade de carga elétrica [C/m]

Para a resolução destas equações é necessário relacionar o deslocamento elétrico e o campo magnético no meio com o campo elétrico e o campo magnético. Para tal a solução está sujeita às seguintes equações:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (5.5)$$

Em que:

$\vec{E}$  - Campo elétrico [V/m]

$\sigma$ - Condutividade elétrica [S/m]

$$\vec{D} = \epsilon_r \vec{E} \quad (5.6)$$

Em que:

$\epsilon_r$ - Permitividade elétrica relativa

Colocando o gradiente em evidência em (5.1) vem:

$$\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \times \vec{H}) = \vec{\nabla} \vec{J} + \vec{\nabla} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (5.7)$$

Com a aplicação de um vetor identidade o termo esquerdo de (5.7) é reduzido a zero ficando:

$$\vec{\nabla} \vec{J} + \vec{\nabla} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0 \quad (5.8)$$

Consegue-se obter um potencial elétrico  $\vec{V}$  a partir de um campo elétrico  $\vec{E}$ , pois estão relacionados, e obtém-se:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \vec{V} \quad (5.9)$$

Em que:

$\vec{E}$  - Campo elétrico [V/m]

$\vec{V}$ - Tensão elétrica [V]

Como a densidade de fluxo magnético  $\vec{B}$  é muito baixa, esta pode ser desprezada em que (5.2) e (5.3) podem ser igualadas a zero, e realizando uma transformação fasorial obtém-se:

$$-\vec{\nabla} \cdot [(\sigma + j\omega\epsilon_r)\vec{\nabla}\vec{V}] = 0 \quad (5.10)$$

Assumindo que as propriedades dos materiais são contínuas então:

$$-[(\sigma + j\omega\epsilon_r)\vec{\nabla}^2\vec{V}] = 0 \quad (5.11)$$

A fórmula (5.11) é a utilizada pelo FEMM© para resolver problemas de *current flow* em corrente alternada. Analisando a fórmula verifica-se que é solicitado apenas a condutividade elétrica e a permitividade elétrica dos materiais em uso no modelo.

Se for utilizada uma fonte de corrente contínua a fórmula (5.11) fica simplificada:

$$-\sigma \vec{\nabla}^2 \vec{V} = 0 \quad (5.12)$$

A fórmula (5.11) pode ser definida como uma adaptação da equação de *Laplace* em que vem, para problemas 3D ( $V=V(x,y,z)$ ) e 2D ( $V=V(x,y)$ ), respetivamente:

$$-(\sigma + j\omega\epsilon_r) \cdot \left( \frac{\partial^2 \vec{V}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{V}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{V}}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (5.13)$$

$$-(\sigma + j\omega\epsilon_r) \cdot \left( \frac{\partial^2 \vec{V}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{V}}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (5.14)$$

## 5.2.2. Condutividade e permitividade

### 5.2.2.1. Isoladores e *stub*

A condutividade elétrica e permitividade elétrica de um isolador ou de um *stub* dependem dos materiais utilizados na sua construção. Desta mesma forma, o modelo será tanto mais rigoroso quanto mais precisos forem os valores utilizados para caracterizar a condutividade elétrica e permitividade elétrica dos materiais e meio envolvente, em que a permitividade elétrica  $\epsilon$  de um material é definida por  $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ .

Teremos seguidamente as grandezas a considerar e representadas na Figura 5.4:

- Permittividade elétrica relativa e condutividade elétrica do dielétrico (Vidro Temperado) -  $\epsilon_d$  e  $\sigma_d$  ;
- Permittividade elétrica relativa e condutividade elétrica dos elementos metálicos (Espigão e Campânula) -  $\epsilon_m$  e  $\sigma_m$  ;
- Permittividade elétrica relativa e condutividade elétrica do cimento envolvente -  $\epsilon_c$  e  $\sigma_c$  ;
- Permittividade elétrica relativa e condutividade elétrica do meio envolvente (Ar) -  $\epsilon_a$  e  $\sigma_a$  ;

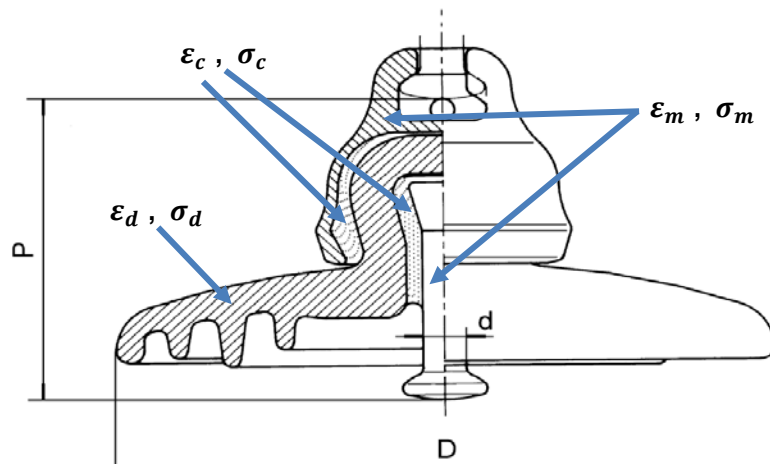


Figura 5.4 - Tipos de materiais num Isolador (Adaptado de (EDP Distribuição - Energia S.A., 2008))

Estes valores, retirados do artigo *Simulations of Pollution and their effects on the Electrical Performance of Glass Suspension Insulators* (Ilhan, Ozdemir, Jayaram, & Cherney, 2012a), encontram-se na Tabela 5.1. Os valores foram escolhidos de entre todas as fontes devido aos valores obtidos terem sido comparados com valores experimentais. De referir que obter as características elétricas do cimento que envolve o dielétrico e os elementos metálicos são de extrema importância e também muito difíceis de obter, (Kontargyri, Gonos, Stathopoulos, & Michaelides, 2003) devido à capacidade que o cimento tem em absorver água e como tal alterar os valores de permitividade e condutividade.

Tabela 5.1 - Permitividade e condutividade dos materiais de um isolador (Adaptado de (Ilhan et al, 2012a))

Material	Permitividade Elétrica Relativa $\epsilon_r$	Condutividade Elétrica $\sigma$ [S/m]
Ar	1	0
Vidro	4,2	0
Cimento	15	$10^{-4}$
Elementos Metálicos	$10^3$	104400

### 5.2.2.2. Poluição

A fim de se modelizar a poluição que se acumula na superfície dos isoladores, tomou-se como referência os trabalhos realizados por Ilhan et al em *Ac and Transient Electric Field Distributions along a 380 kV V-String Insulator* e *Simulations of Pollution and their effects on the Electrical Performance of Glass Suspension Insulators* (Ilhan et al, 2012b) e por Othman, Piah, Adzis, Ahmad & Ahmad em

*Simulation of Voltage and Electric-Field Distribution for Contaminated Glass Insulator* (Othman N. , Piah, Adzis, Ahmad, & Ahmad, 2013).

Em ambos os trabalhos os autores modelizaram uma camada de poluição de 2mm em redor do dielétrico, sendo que os primeiros variam o valor da condutividade elétrica ( $\sigma_p$ ) de  $10^{-8}$  a  $1 \text{ Sm}^{-1}$ . Os segundos autores fixaram o valor da condutividade elétrica ( $\sigma_p$ ) em  $10^{-3} \text{ Sm}^{-1}$ . A permitividade elétrica relativa foi a mesma para ambos os autores ( $\epsilon_p$ ), 81, correspondendo aos valores de condutividade e permitividade da água do mar, respetivamente. Dado que a modelização deste trabalho assenta nos valores obtidos por estas duas fontes devido aos seus resultados apresentarem uma boa correlação simulação-real, o efeito de isoladores poluídos será simulado, neste trabalho, com os valores de condutividade elétrica e de permitividade elétrica relativa de  $10^{-3} \text{ Sm}^{-1}$  e 81, respetivamente.

Desta forma serão realizadas duas análises de isoladores com poluição:

- Poluição total, em que ambas as faces (superior e inferior) do dielétrico encontram-se com uma camada uniforme de espessura de 2 mm;
- Poluição parcial, em que apenas a face inferior se encontra com uma camada idêntica ao ponto anterior. Esta análise tem o objetivo de simular um isolador completamente poluído em que, por ocorrência da queda de precipitação sob a forma de chuva, a zona superior foi limpa, mantendo-se, no entanto, a zona inferior poluída.

### 5.2.3. Geometria

Para se conseguir obter o modelo mais preciso foi necessário obter desenhos CAD reais dos isoladores em estudo, do tipo U70BS e U160BS, representados nas Figura 5.5 e Figura 5.6.

De realçar que como o modelo é *axisymmetric*, como referido em 5.2.1, apenas será necessária metade da geometria, sendo a restante obtida por revolução.

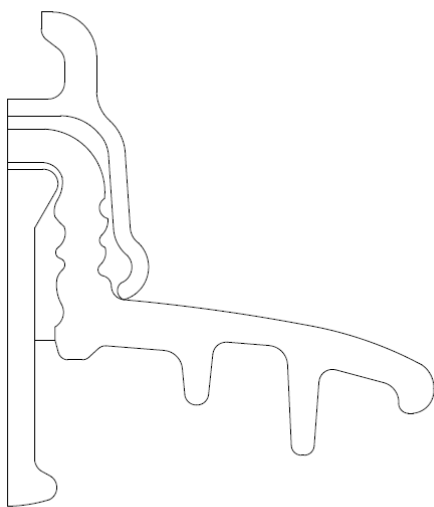


Figura 5.5 - Desenho CAD de um isolador U70BS

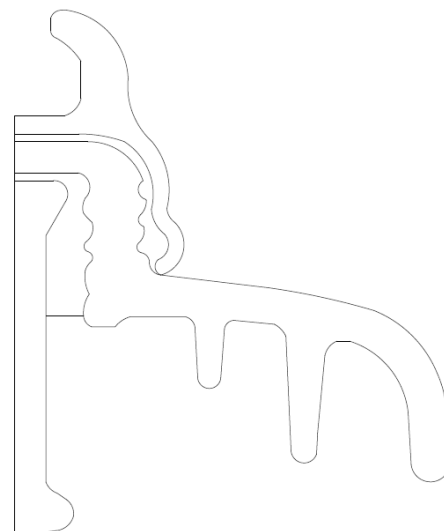


Figura 5.6 - Desenho CAD de um isolador U160BS

Da mesma forma apresenta-se nas Figuras 5.7 e 5.8 os desenhos CAD dos *stubs* referentes ao U70BS e U160BS.

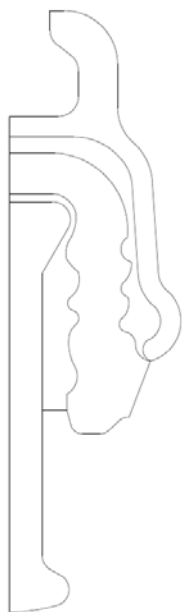


Figura 5.7 - Desenho CAD de um *stub* (U70BS)

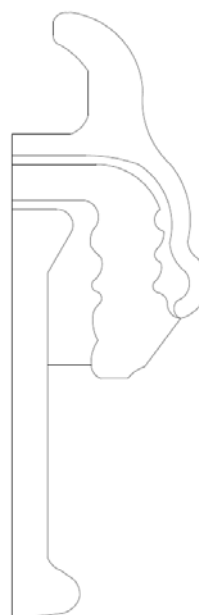


Figura 5.8 - Desenho CAD de um *stub* (U160BS)

Na Tabela 5.2 apresenta-se um quadro-resumo das características geométricas dos isoladores e *stubs* acima representados.

Tabela 5.2 - Características dimensionais dos isoladores e *stubs* considerados (Sediver, 2007)

Isolador/ <i>Stub</i>	Carga de rotura [kN]	Linha de Fuga <sup>22</sup> [mm]	Diâmetro [mm]	Passo [mm]	Diâmetro espigão [mm]	Tensão máxima 1min/50 Hz (seco/húmido) [kV]
<b>U70BS</b>	70	320	255	127	16	70/40
<b>U160BS</b>	160	380	280	146	20	75/45
<b><i>Stub</i> U70BS</b>	70	34,38	N/A	127	16	N/A
<b><i>Stub</i> U160BS</b>	160	34,77	N/A	146	20	N/A

<sup>22</sup> Valor obtido do catálogo (Sediver, 2007); no caso dos *stubs* obtido em função dos desenhos CAD, tratando-se do menor comprimento

### 5.2.3.1. Cadeias de isoladores

As cadeias em estudo serão cadeias típicas de 150kV (10 x U70BS), 220kV (14x U160BS) e 400kV (23 x U160BS), caracterizadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Características espaciais das cadeias de isolador consideradas

Cadeia	Linha de Fuga (mm)	Comprimento (mm)
10 x U70BS	3200	1270
14 x U160BS	3840	1524
23 x U160BS	8740	3358

Ao longo do estudo apresentado adiante serão substituídos isoladores perfeitos por *stubs*, alterando a linha de fuga total. Por uma questão de simplicidade geométrica a ligação entre a campânula e o espigão do isolador seguinte será realizada por forma a que seja um corpo só; desta forma fica garantido o contacto entre as peças. A geometria possuirá apenas a cadeia de isoladores, sem acessórios, nomeadamente hastes de descarga e pinças de amarração.

### 5.2.4. Condições Fronteira

As condições-fronteira definem o *stress* que vai ser aplicado aos isoladores ou às cadeias de isoladores. Assim, e de acordo com o representado na Figura 5.9, é aplicado na campânula do 1º isolador 0V, correspondendo a ligação ao apoio e no espigão do ultimo isolador a tensão simples (RMS) do nível de tensão considerado, correspondendo à ligação ao cabo condutor,  $U_s$ . As tensões em uso serão conforme indicado na Tabela 5.4.

Para as simulações com um isolador ou um *stub* será aplicado uma tensão de 11kV, de forma análoga ao realizado em *Effect of Broken Skirts on Voltage Distribution along Insulator Strings* (Othman et al, 2016), como forma de verificação de resultados.

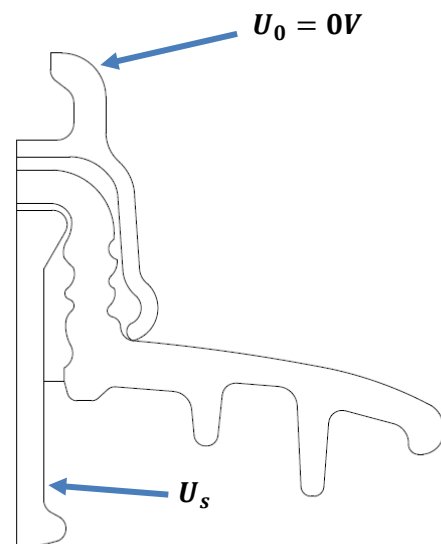


Figura 5.9 - Stress aplicado a um isolador

**Tabela 5.4 - Stress aplicado às cadeias de isoladores**

Nível de Tensão $U_c$ [kV]	Stress aplicado ao espigão - $U_s$
150	86,6
220	127
400	230,94

### 5.2.5. Malha de cálculo

Para o cálculo é realizada uma malha, ou *mesh*, composta, como referido em 5.1, por nós e elementos. A cada zona, correspondente a um material, e denominada de bloco, é definido o tamanho do elemento triangular, a fim de aumentar a continuidade da função que se pretende. A título de exemplo quanto maior for o elemento, maior será o *salto* de valores entre elementos e, conseqüentemente, menos preciso. Por sua vez, o tempo de cálculo será muito menor.

Desta forma definiu-se que o tamanho dos elementos para cada material será o exposto na Tabela 5.5.

**Tabela 5.5 - Tamanho dos elementos da *mesh***

Material	Tamanho do elemento [mm]
Ar	10
Vidro	1
Cimento	1
Ferro	1
Poluição	1

A distância acima referida é a que se utiliza quando não existem pontos. Nos pontos a distância diminuí, de forma a aumentar a precisão e, no caso de existirem pontos angulosos (locais onde não existem derivadas), permite que nesse local existam mais elementos, transformando esse local, inicialmente não diferenciável, num local diferenciável.

### **5.3. Conclusões do capítulo**

Neste capítulo caracterizou-se todo o estudo a realizar no âmbito do FEA. Foram definidas todas as variáveis e considerações.

Realizou-se ainda uma introdução sucinta acerca do método FEM e FEA.

No próximo capítulo apresentar-se-ão os resultados obtidos nas simulações realizadas.

## 6. Resultados das simulações

### 6.1. Isolador U70BS e stub U70BS

#### 6.1.1. Isolador

Nesta simulação a *mesh* de cálculo, exposta na Figura 6.1, é composta por 15973 nós e 31527 elementos.

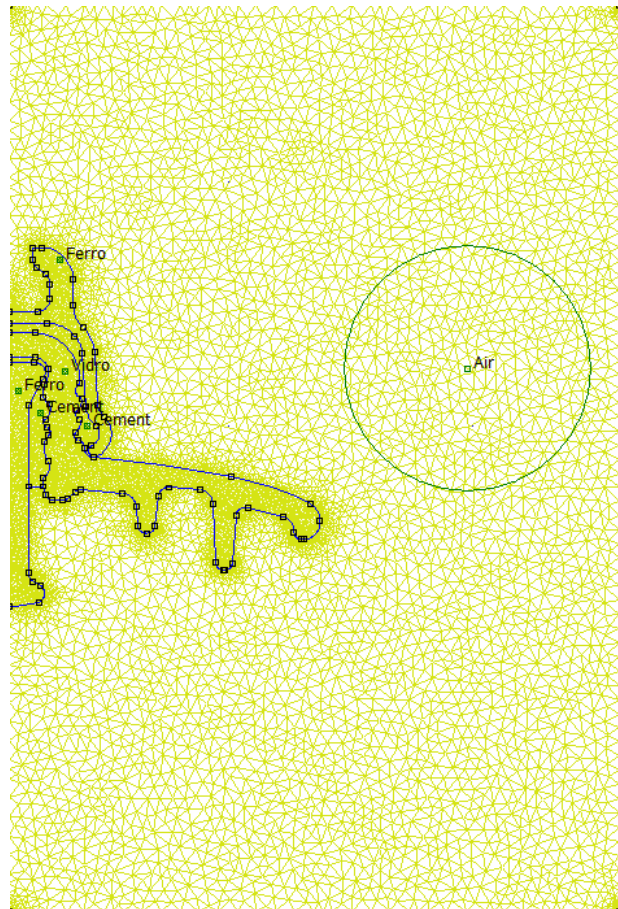


Figura 6.1 - Mesh aplicada ao modelo do isolador U70BS

#### 6.1.1.1. Distribuição de tensão

A distribuição de tensão ao longo da linha de fuga neste tipo de isolador, idêntica à já apresentada em 4.4.3 e à referida em diversas referências bibliográficas, nomeadamente em Othman, Piah, & Adzis, 2016, está apresentada na Figura 6.2. De notar as protuberâncias na função que indicam as nervuras existentes na parte inferior do isolador. A tensão ao longo da linha de fuga encontra-se, quase na totalidade do

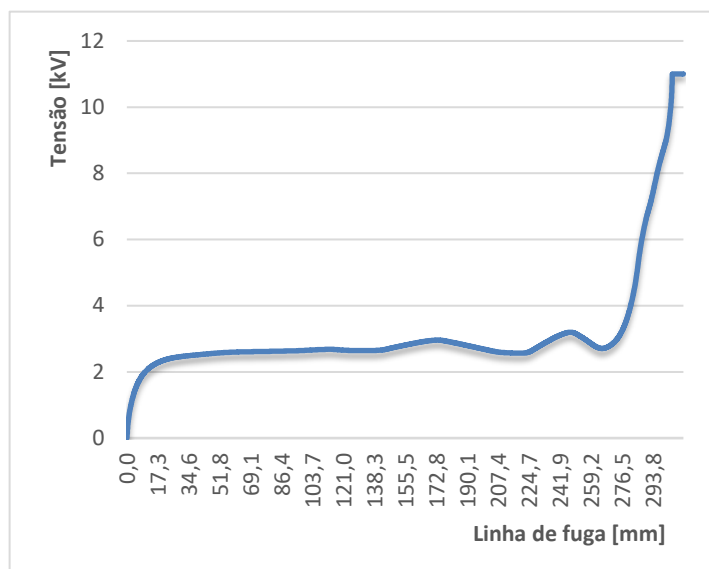


Figura 6.2 - U70BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga

isolador, entre os 2kV e os 3kV, sendo apenas superior após a última nervura, mais próxima do *pin*. Na Figura 6.3 está representada a distribuição de tensão no modelo realizado.

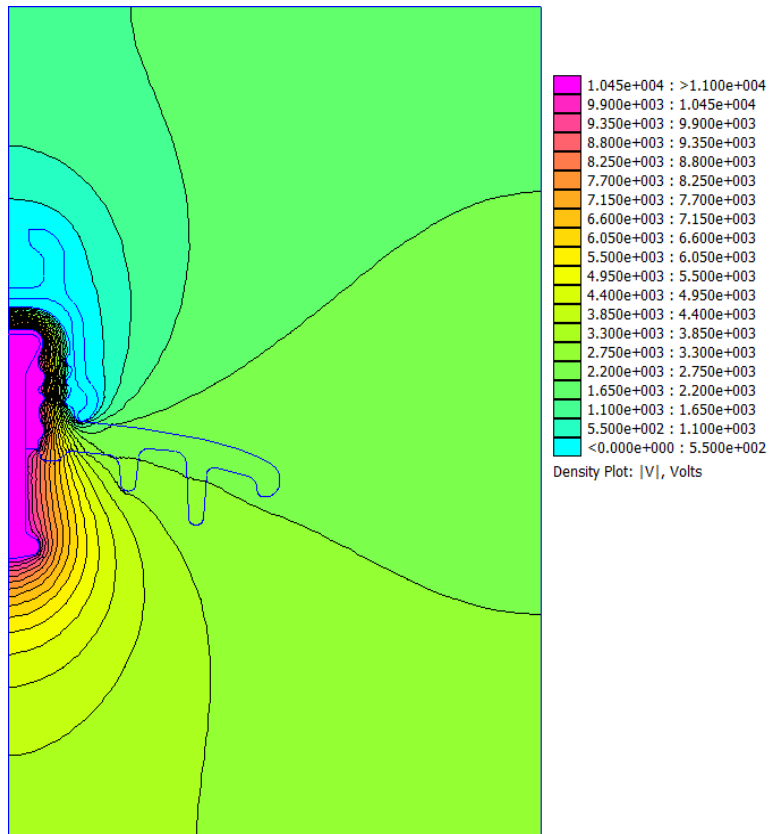


Figura 6.3 - U70BS: Distribuição de tensão no modelo

### 6.1.1.2. Campo elétrico

A derivada da tensão é a definição do campo elétrico, tal como definido em 5.2.1.. Assim os maiores valores de campo serão adstritos aos locais em que a variação de tensão é maior, sendo verificada esta premissa na Figura 6.6. Desta forma é possível obter os valores do campo elétrico ao longo da linha de fuga e no modelo, sendo visíveis nas Figuras 6.4 e 6.5, respetivamente.

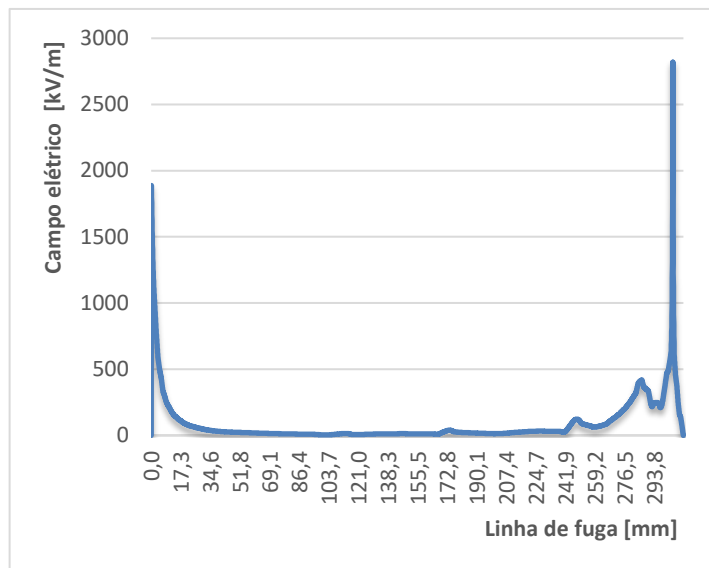


Figura 6.4 - U70BS: Campo elétrico ao longo da linha de fuga

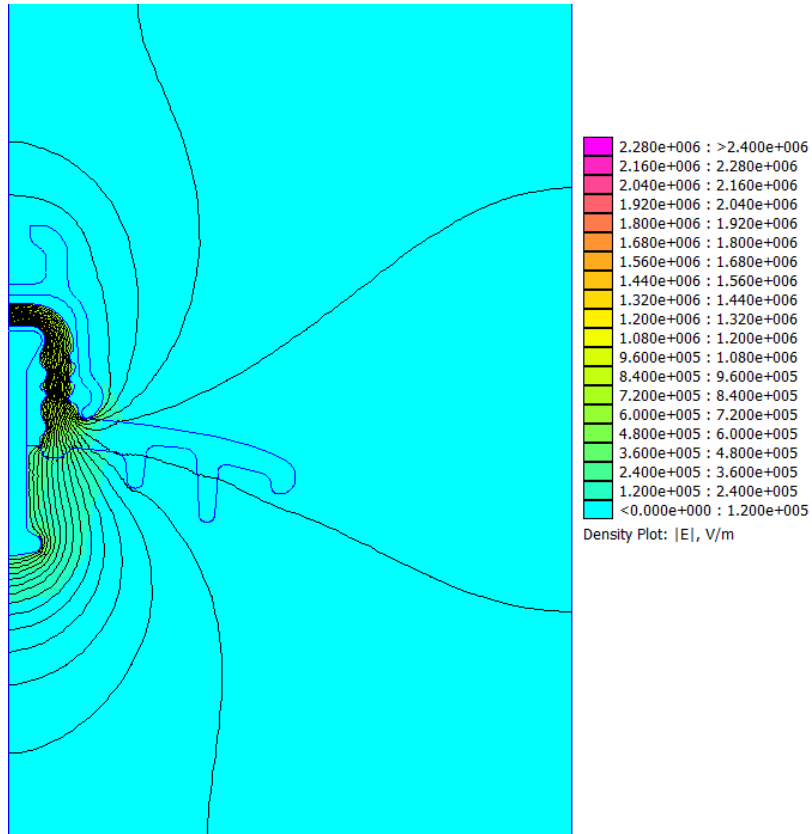


Figura 6.5 - U70BS: Campo elétrico no modelo

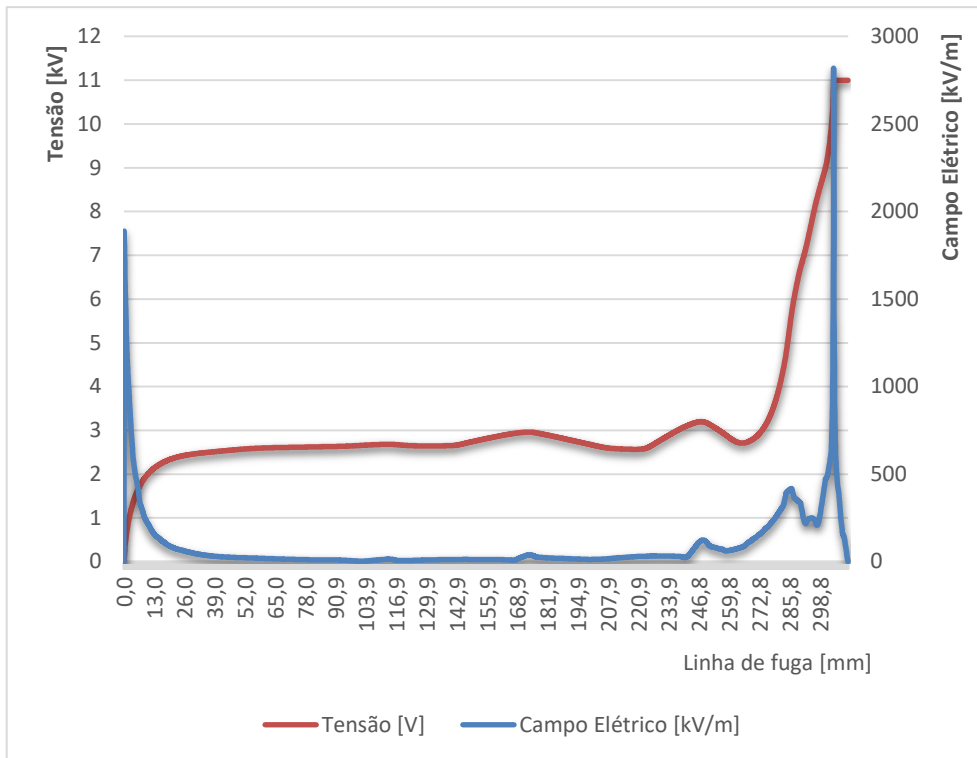


Figura 6.6 – U70BS: tensão vs campo elétrico ao longo da linha de fuga

### 6.1.2. Stub

Esta simulação tem uma *mesh* definida por 12011 nós e 23606 elementos, sendo apresentada na Figura 6.7.

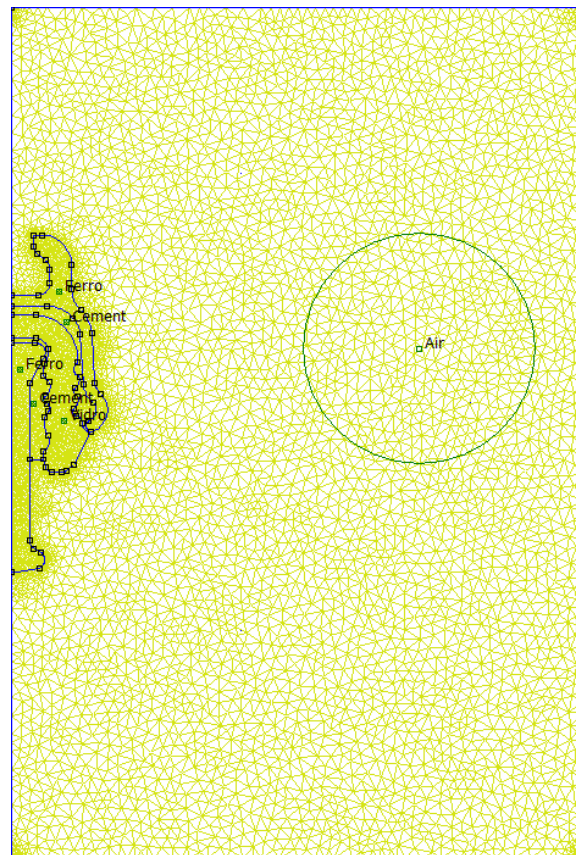


Figura 6.7 - *Mesh* aplicada ao modelo do stub U70BS

#### 6.1.2.1. Distribuição de tensão

A distribuição de tensão ao longo da linha de fuga do stub encontra-se representada na Figura 6.8. Através da análise do gráfico verifica-se que a relação entre as grandezas se desenvolve de uma forma mais acentuada, comparativamente ao resultado obtido em 6.1.1.1, sendo quase linear. Na Figura 6.9 apresenta-se a distribuição no modelo. De realçar que, devido à inexistência das nervuras inferiores do isolador, a distribuição de tensão ao longo do modelo do *stub* é mais uniforme, contrastando com a distribuição de tensão num isolador perfeito apresentado na Figura 6.3.

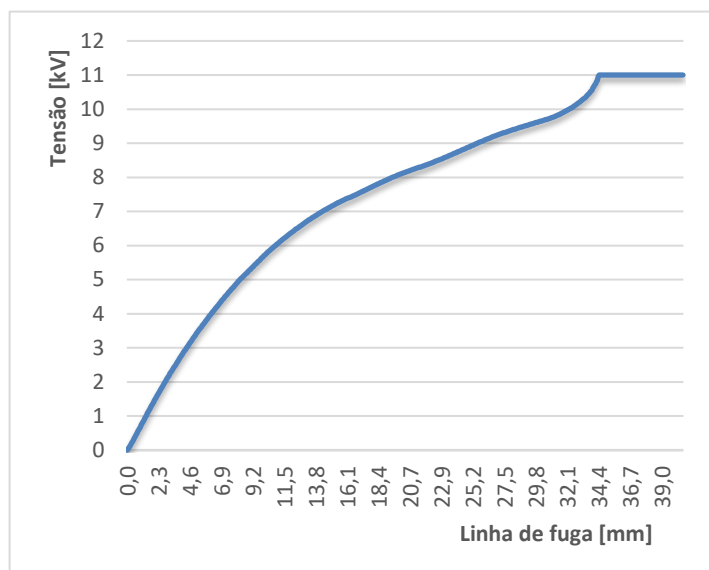


Figura 6.8 - *Stub* U70BS: distribuição de tensão ao longo da linha de fuga

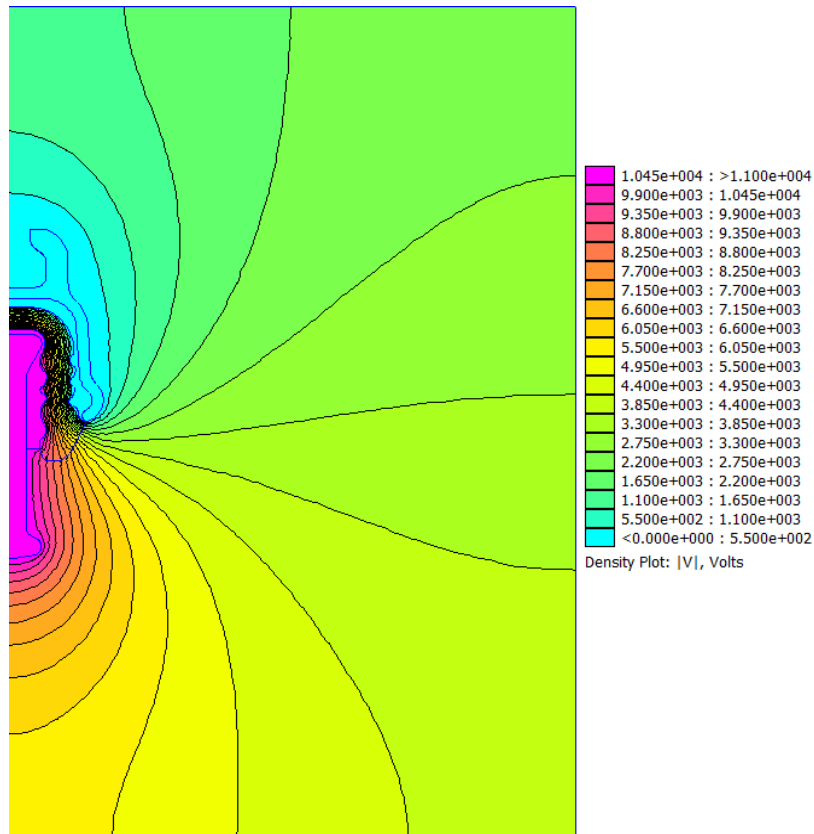


Figura 6.9 - Stub U70BS: Distribuição de tensão no modelo

### 6.1.2.2. Campo elétrico

Da mesma forma que em 6.1.1.2 o campo elétrico ao longo da linha de fuga está representado na Figura 6.10. O pico visível corresponde à elevação mais abrupta da tensão na Figura 6.8.

Identicamente, o campo elétrico no modelo do stub U70BS encontra-se representado está na Figura 6.11.

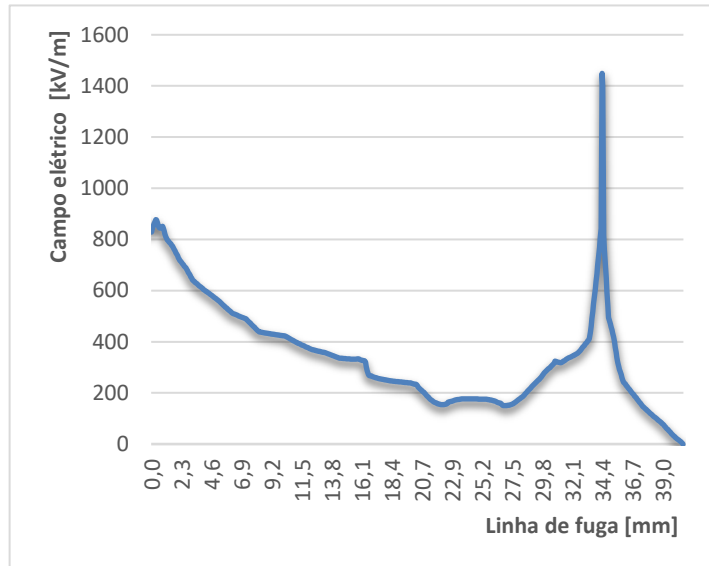


Figura 6.10 - Stub U70BS: Campo elétrico ao longo da linha de fuga

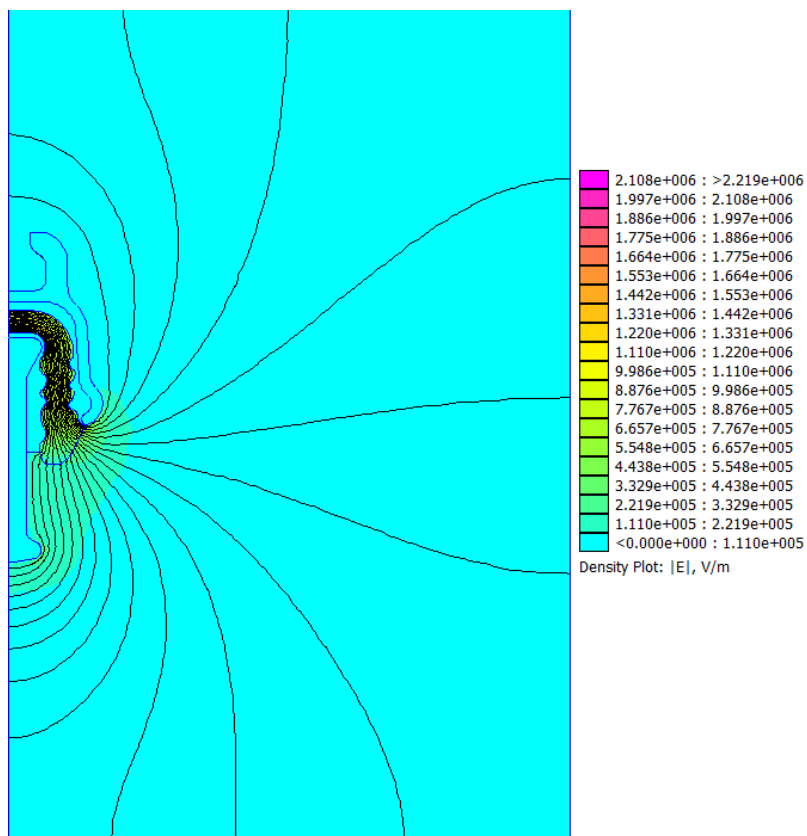


Figura 6.11 - *Stub* U70BS: Campo elétrico no modelo

### 6.1.3. Isolador vs *stub*

Tendo sido expostas as grandezas elétricas, tensão e campo elétrico, nos pontos anteriores para o isolador e para o *stub*, neste ponto far-se-á a comparação da evolução dessas grandezas, ao longo da linha de fuga.

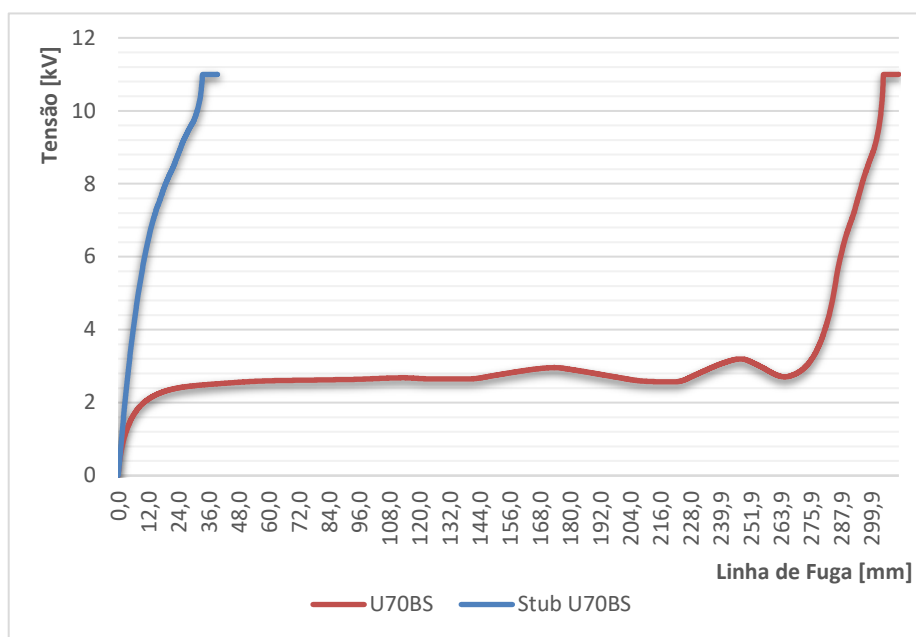


Figura 6.12 - U70BS vs. *stub* U70BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga

Analisando a Figura 6.12, a diferença mais perceptível é, sem dúvida, a evolução da tensão, devido à linha de fuga sendo muito menor no *stub*. De salientar que o declive final até à tensão aplicada no *pin* é idêntico no *stub* e no isolador, verificando-se a atuação (ou a falta) das nervuras do dielétrico.

A variação abrupta da tensão no *stub* imprime um aumento do campo, sendo mais evidente nos 33,4mm, local em que se dá uma elevação quase vertical da tensão para os 11kV, como é visível na Figura 6.13. No que respeita ao Campo Elétrico os picos estão localizados, como referido anteriormente, nos pontos de maior variação.

O estudo do campo elétrico, apesar de ser possível de ser realizado no *software* FEMM®, como apresentado em 6.1.1.2 e 6.1.2.2, não é objeto deste trabalho, e por esse motivo não vai estar presente nas restantes simulações.

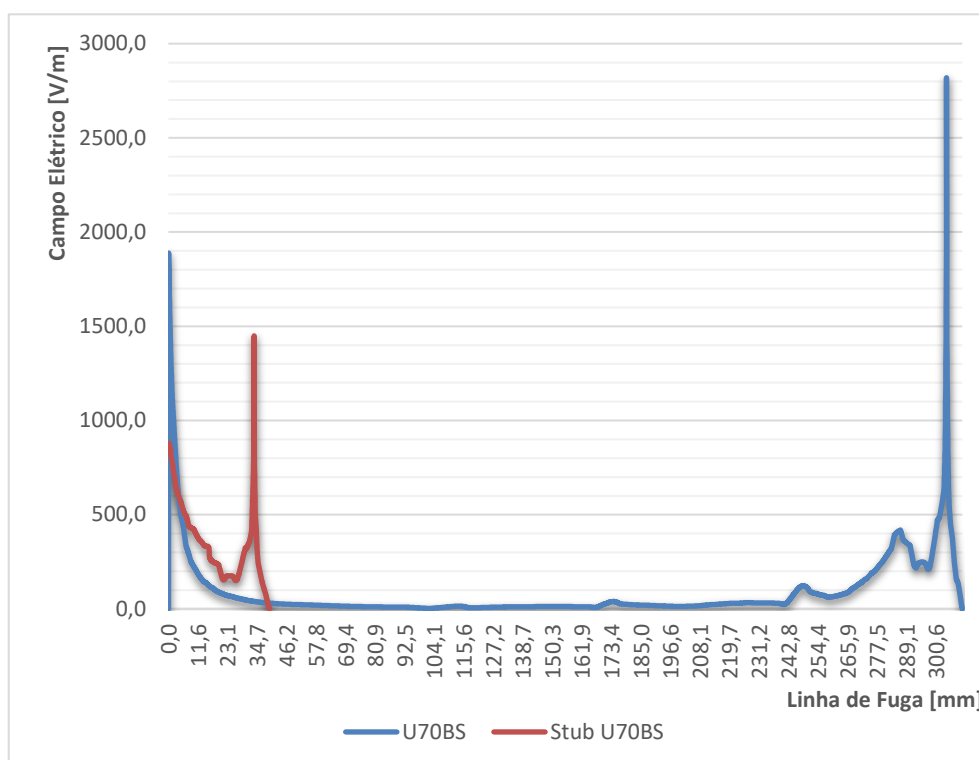


Figura 6.13 - U70BS vs. *stub* U70BS: Campo elétrico

## 6.2. Isolador U160BS e *stub* U160BS

A mesma análise que referida em 6.1, realizou-se para o conjunto U160BS / *Stub* U160BS. No entanto, e dado que as conclusões da análise para este conjunto foram idênticas ao do U70BS, para não tornar este trabalho demasiado exaustivo, os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras do Anexo A.

## 6.3. Isolador U70BS poluído

Tendo em consideração as premissas definidas em 5.2.3.2, para os valores de condutividade e permitividade elétrica, bem como a espessura da camada uniforme de poluição, foram realizadas, para o isolador do tipo U70BS, duas simulações. Uma das simulações considerando uma camada

uniforme de poluição em todo o dielétrico (Total) e outra com uma camada uniforme de poluição apenas na zona inferior (Parcial). As malhas, para ambas as simulações, têm as mesmas configurações que as indicadas em 5.2.6, diferindo apenas na zona onde está presente a camada de poluição (Total ou Parcial), em que os resultados se encontram apresentados nas Figuras 6.14 e 6.15.

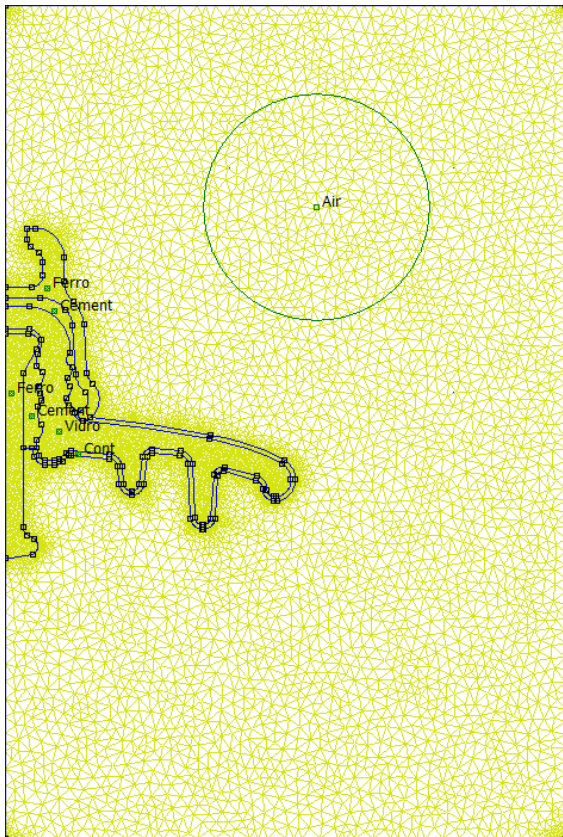


Figura 6.14 - U70BS: Mesh de cálculo para Poluição Total

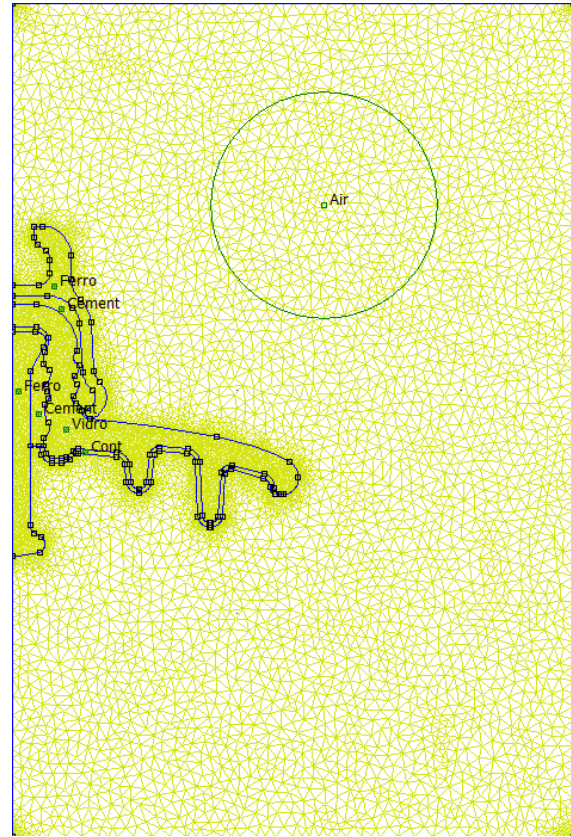


Figura 6.15 - U70BS: Mesh de cálculo para Poluição Parcial

### 6.3.1. Poluição total

Com a introdução de uma camada de poluição, a envolver todo o dielétrico, salienta-se a presença de linhas equipotenciais no interior do dielétrico, que não existiam no caso do isolador limpo (Ver 6.1.1.1), conforme apresentado na Figura 6.17. Este efeito tem a sua raiz na condutividade e permitividade elétrica da camada de poluição. A distribuição de tensão ao longo da linha de fuga, conforme exibido na Figura 6.16 até à zona do cimento tem o formato de uma função linear, inferindo-se desse fato que a distribuição

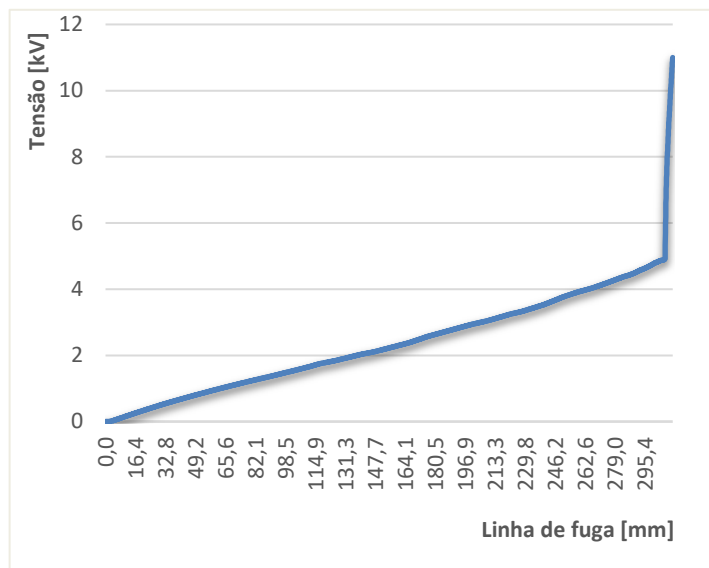


Figura 6.16 - U70BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga - poluição total

de tensão tem uma influência predominantemente resistiva (Ilhan et al, 2012b).

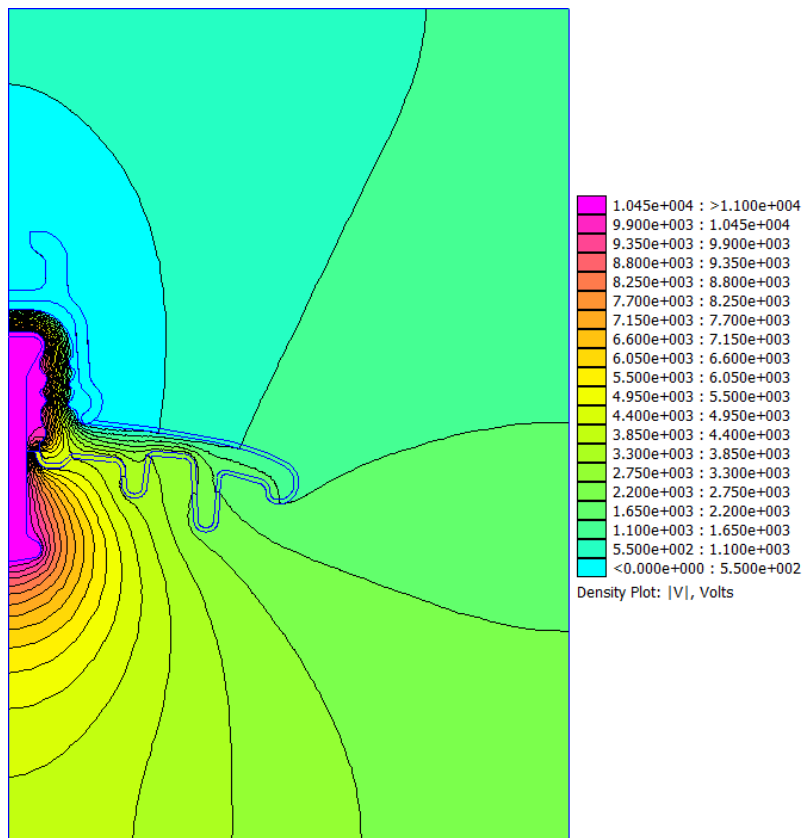


Figura 6.17 - U70BS: Distribuição de tensão no modelo - poluição total

### 6.3.2. Poluição parcial

Analisando-se o gráfico da Figura 6.18, evidencia-se que a evolução da tensão é logarítmica no primeiro terço da linha de fuga, sendo praticamente constante à tensão aplicada no restante contorno. De forma análoga a 6.3.1.1 conclui-se que a existência de poluição apenas na zona inferior do dielétrico produz um efeito não linear na tensão, sendo predominantemente capacitivo (Ilhan et al, 2012b).

Visualizando-se a distribuição de tensão no modelo, apresentado na Figura 6.19 verifica-se o já analisado no parágrafo anterior.

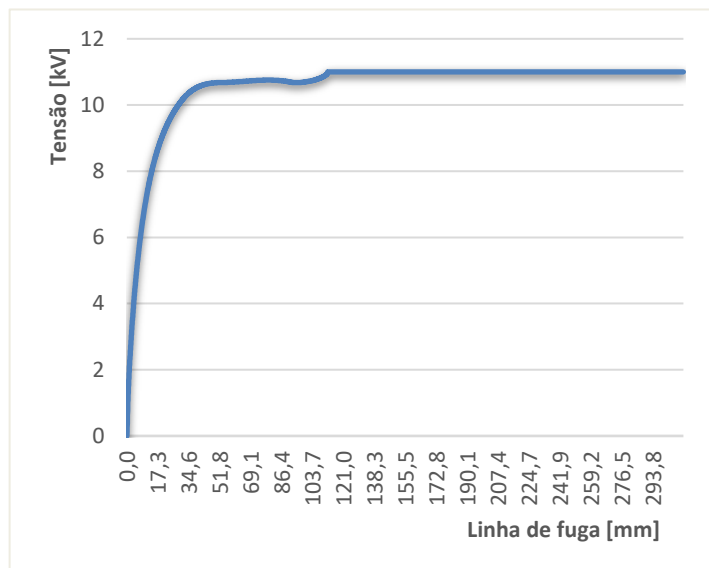


Figura 6.18 - U70BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga - poluição parcial

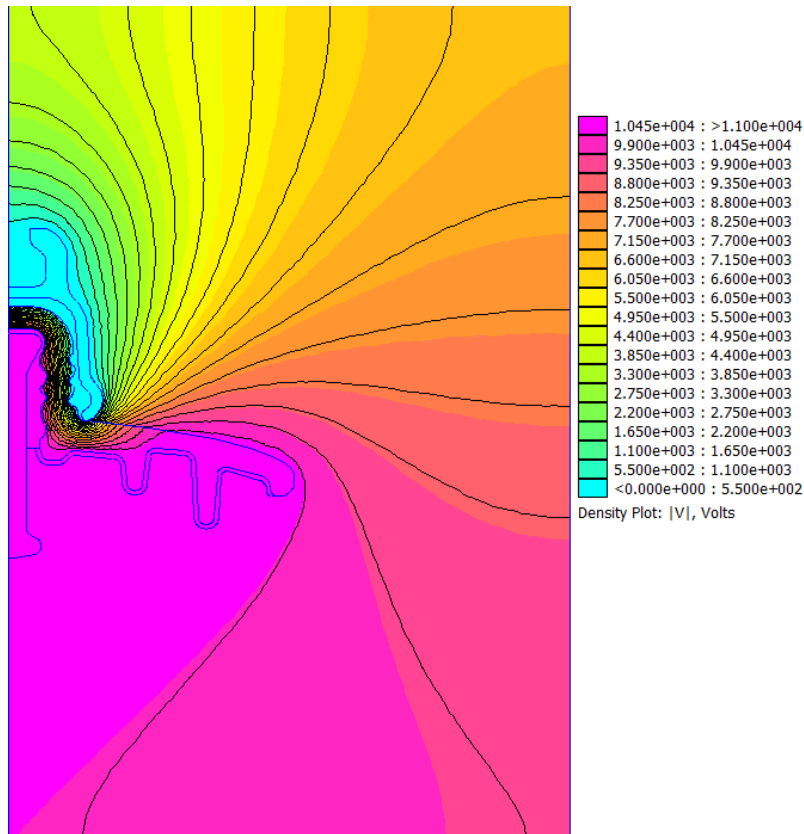


Figura 6.19 - U70BS: Distribuição de tensão no modelo - Poluição parcial

### 6.3.3. Isolador limpo vs. isolador poluído

Tendo se caracterizado um isolador limpo em 6.1.1 e um isolador poluído (com duas configurações de distribuição da poluição) em 6.3 importa, nesta fase, comparar as duas situações. Importa ainda salientar que os valores simulados de distribuição de tensão são coerentes com os documentos de referência, já identificados em 5.2.3.2.

Comparando as três distribuições de tensão ao longo da linha de fuga (limpo, poluição total e poluição parcial), observa-se na Figura 6.20 diferenças assinaláveis no que respeita à evolução da tensão. A evolução da tensão, característica de um isolador, dita de normal, é transformada numa componente maioritariamente resistiva, com poluição total, e maioritariamente capacitiva, com poluição parcial.

Tomando em consideração a localização da linha de fuga e onde a tensão mais elevada (11 kV) está localizada, apura-se que, tanto para o isolador limpo como para o isolador com poluição total, essa localização é sensivelmente no mesmo ponto, a cerca dos 300 mm (sentido campânula-*pin*). No entanto, a evolução da tensão do isolador poluído total é linear, tendo valores de tensão superiores ao isolador limpo a partir dos 189 mm.

No caso do isolador com poluição parcial o máximo de tensão localiza-se aos 111 mm, concluindo-se que, do ponto de vista do isolamento, esta é a pior das duas situações estudadas devido à maior inibição do efeito do isolamento devida ao dielétrico.

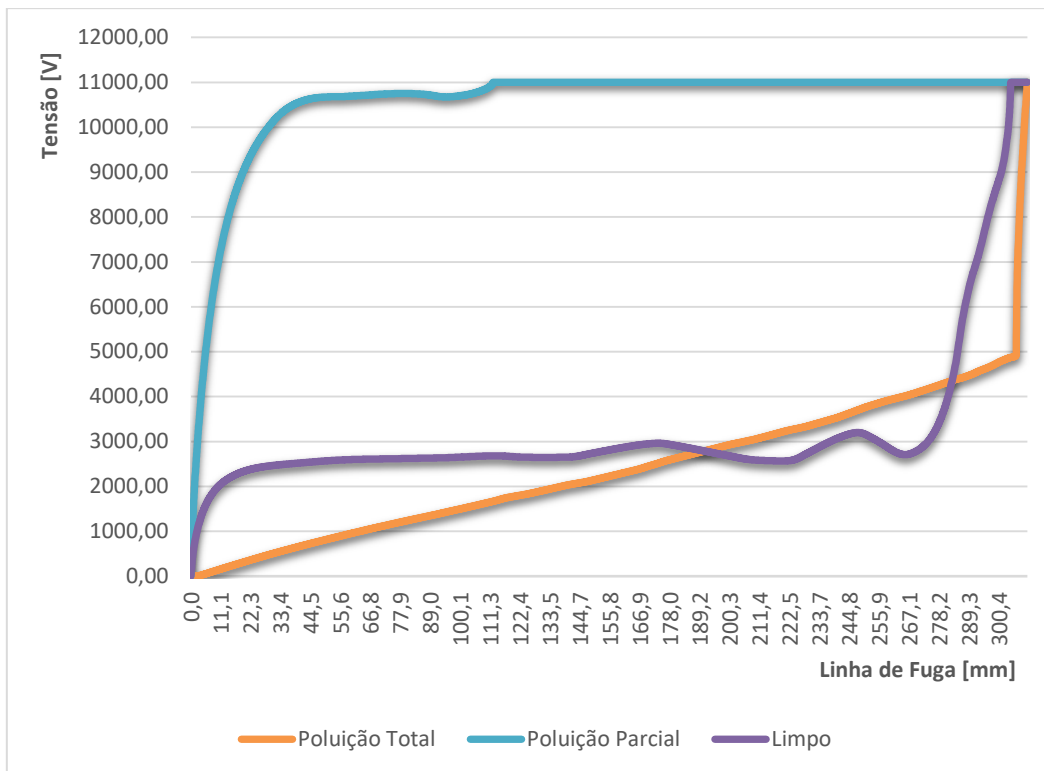


Figura 6.20 - U70BS: Comparação da distribuição de tensão entre tipos de poluição

#### 6.4. Isolador U160BS poluído

Como mencionado em 6.2 para os resultados das simulações realizadas, de forma análoga às realizadas para o Isolador do tipo U70BS Poluído, obtiveram-se as mesmas conclusões apresentadas em 6.3. As figuras relativas a essas simulações encontram-se no Anexo A.

#### 6.5. Cadeias de isoladores

Caracterizado que está um isolador único com uma tensão aplicada, nas diversas configurações (Perfeito, *stub*, Limpo e Poluído), na fase seguinte deste trabalho será feita a mesma análise, mas para cadeias de isoladores. Esta análise terá como variáveis, para cada nível de tensão MAT em uso em Portugal,  $U_c = 150, 220$  e  $400$  kV:

- Cadeia perfeita (isoladores perfeitos) limpa;
- Cadeia com *stubs* limpa;
- Cadeia completa poluída parcialmente;
- Cadeia completa poluída totalmente;
- Cadeia com *stubs* poluída parcialmente;
- Cadeia com *stubs* poluída totalmente.

## 6.5.1. 10xU70BS (150 kV)

### 6.5.1.1. Cadeia limpa e perfeita

Esta cadeia, típica para linhas de 150 kV, possuirá uma *mesh* de cálculo, conforme a Figura 6.21, com as configurações de materiais e de *mesh* em 5.2.3.1 e 5.2.6, respetivamente, possuindo 123330 nós e 244901 elementos.

Visualizando-se a Figura 6.22 verifica-se uma distribuição uniforme, idêntica à obtida em *Effect of Broken Skirts on Voltage Distribution along Insulator Strings* (Othman, Piah, & Adzis, 2016).

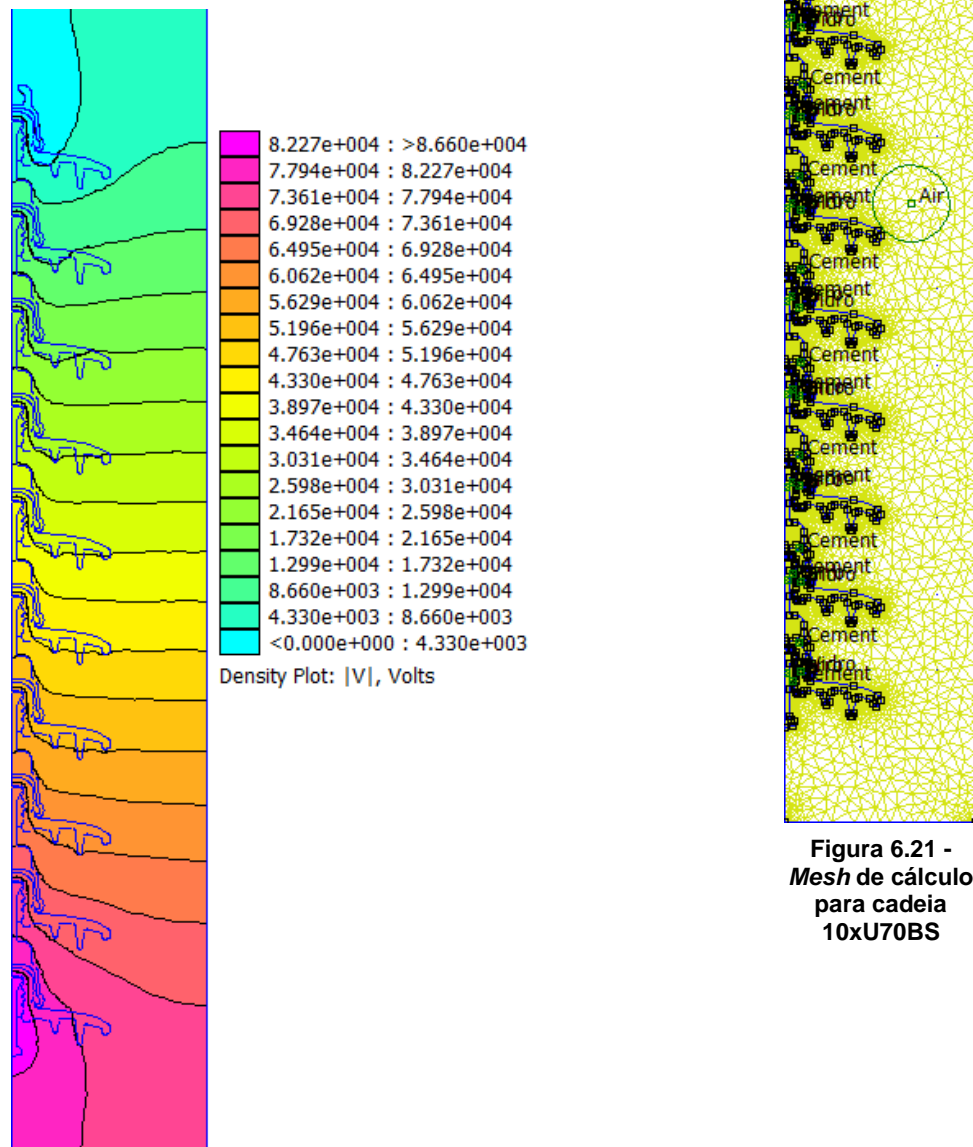


Figura 6.22 – 10xU70BS: Distribuição de tensão no modelo (Cadeia perfeita)

No gráfico associado a esta distribuição, apresentado na Figura 6.23, verifica-se a mesma conclusão já vista anteriormente. De facto uma regressão linear apresenta uma melhor aproximação a esta distribuição, traduzindo-se numa função afim. Conclui-se também que, cada isolador, numa

cadeia, realiza a sua função de forma cumulativa. De salientar que os valores apresentados referem a uma tensão aplicada de 86,6 kV, como referido em 5.2.4.

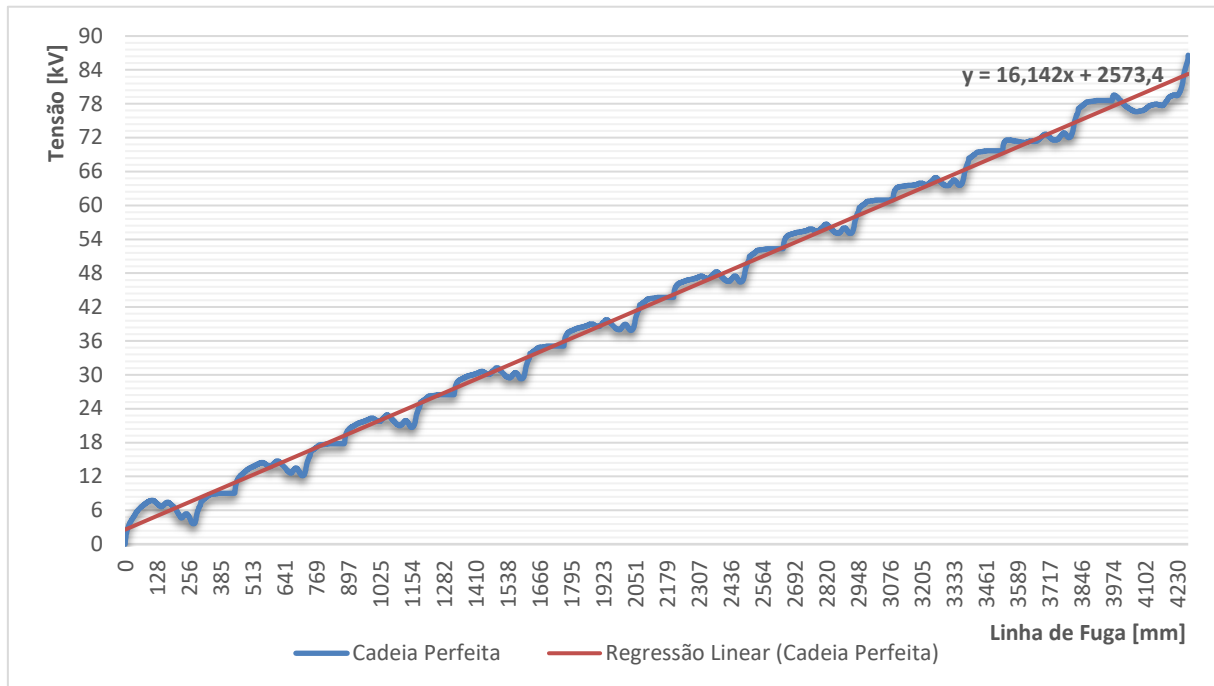


Figura 6.23 - 10xU70BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga (Cadeia perfeita)

### 6.5.1.2. Cadeia limpa com *stubs*

Exemplificando de forma mais sucinta a comparação da perda de isoladores numa cadeia, optou-se pela visualização conjunta do efeito da perda de um, dois ou três isoladores, no início da cadeia.

Estas três *mesh* de cálculo, expostas na Figura 6.24, possuem:

- a) 118258 nós e 234714 elementos;
- b) 96196 nós e 190886 elementos;
- c) 111479 nós e 221160 elementos.

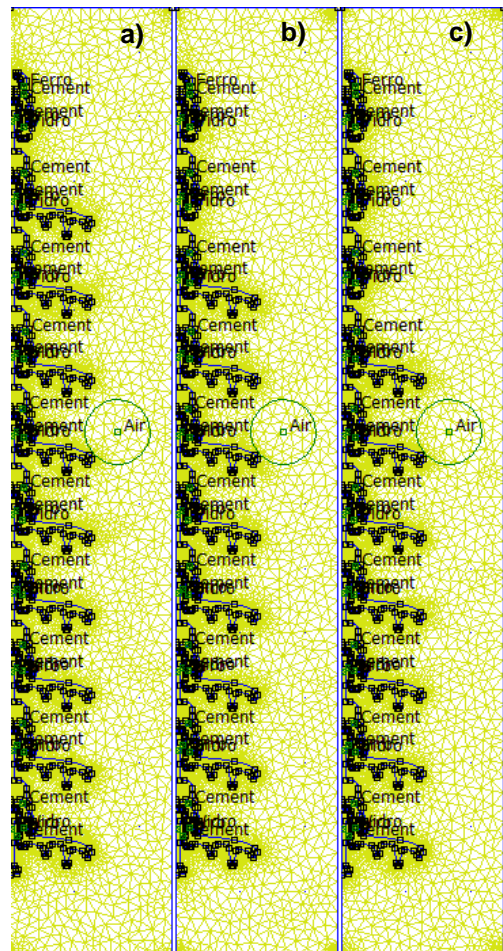


Figura 6.24 - 10xU70BS: *Mesh* de cálculo para a) 1 *stub*, b) 2 *stubs* e c) 3 *stubs*

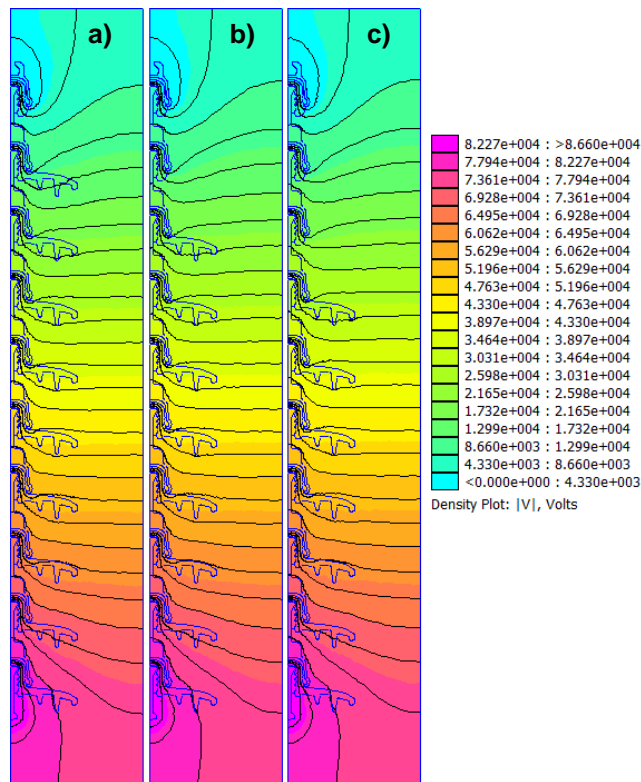


Figura 6.25 – 10xU70BS: Distribuição de tensão no modelo em cadeia com a) 1 stub, b) 2 stub e c) 3 stub

Apesar de visualmente não ser perceptível no intervalo de cores da Figura 6.25, verifica-se uma alteração na disposição das isolinhas, que corresponde, cada uma delas, a um valor de 2,9 kV.

No entanto, na Figura 6.26, é notória a alteração na distribuição da tensão verificando-se a cada stub um aumento da distribuição, de forma linear, de cerca de 7 kV, de simulação para simulação.

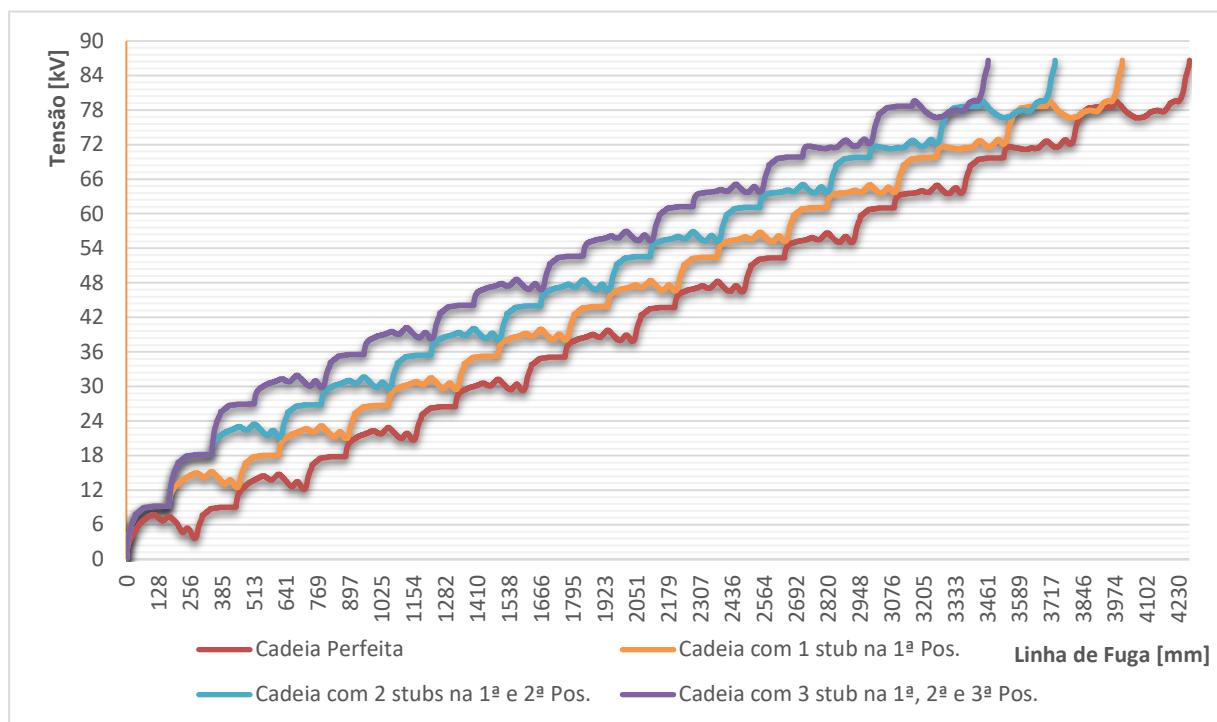


Figura 6.26 – 10xU70BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga em cadeias com stubs

Tendo em consideração que a possibilidade de existirem três *stub* numa cadeia é remota, e que o mais usual é a presença de um *stub* numa cadeia, para a comparação da distribuição de tensão, variando a localização dos *stubs* realizou-se a análise tendo em conta a presença de dois *stubs* consecutivos na cadeia, sendo os resultados os que se apresentam na Figura 6.27.

Da análise verifica-se que a alteração da posição dos *stubs* influencia a distribuição de tensão ao longo da cadeia, na medida em que, a jusante dos *stubs*, existe uma elevação da tensão, concluindo-se que a capacidade de isolamento fica deteriorada, pela perda de grande parte do dielétrico. Após os *stubs* a cadeia volta à curva de distribuição de tensão perfeita, inferindo-se também que a queda de tensão que não é realizada pelos *stubs* é suportada pelos isoladores seguintes, daí o aumento de tensão mencionada.

Conclui-se ainda que a pior situação se verifica quando os *stubs* estão mais próximos do início da cadeia, indo de encontro ao já concluído por Leite & Yanaguizawa, já exposto em 4.6. Esta situação é devida ao fato de se ter uma maior tensão junto do apoio dando origem a maior *stress* para o *stub*, podendo, em condições de precipitação ou sobretensão potenciar o arco elétrico

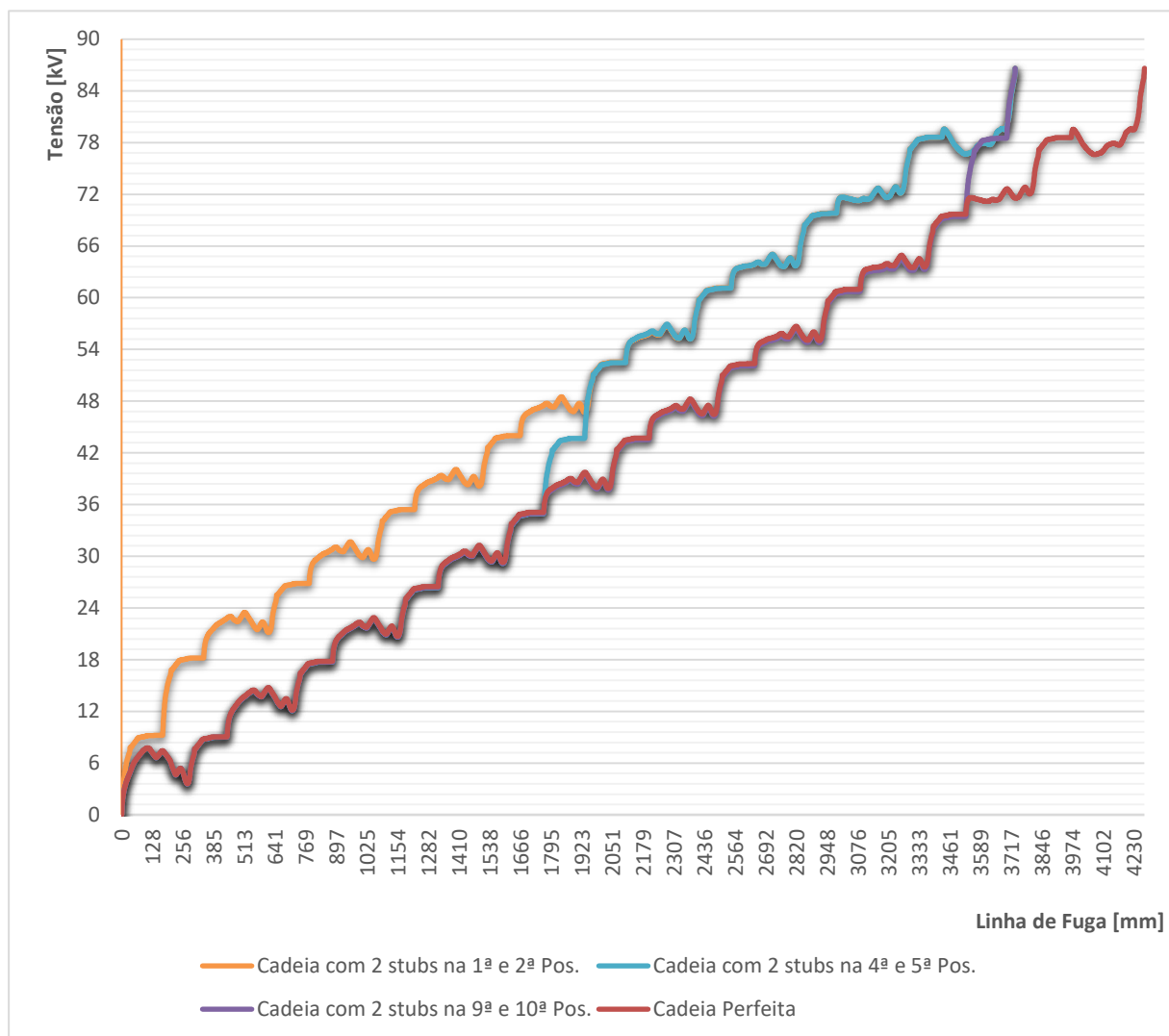


Figura 6.27 - 10xU70BS: Distribuição de tensão com diferentes posições de dois *stubs* consecutivos

### 6.5.1.3. Cadeia perfeita com poluição

Para a análise da simulação de uma cadeia com poluição foi assumido, nesta fase, que a cadeia se encontrava completa, sem *stubs*, e seria analisado, da mesma forma que em 6.3, uma cadeia com poluição total, parcial e conseqüente comparação com uma cadeia limpa. As variáveis de condutividade, permitividade e espessura da camada de poluição são as já mencionadas em 5.2.3.2, com as *mesh* de cálculo expostas na Figura 6.28 e com as características:

- a) 142111 nós e 282470 elementos;
- b) 155593 nós e 309405 elementos.

Analisando as Figuras 6.29 e 6.30 observa-se a alteração na distribuição de tensão tanto no modelo como ao longo da linha de fuga.

O nível de tensão sofre um deslocamento vertical em todas as cadeias, impondo mais *stress* no último isolador, exceto na cadeia com poluição total. Este fenómeno é causado pela condutividade da camada de poluição que impõe o valor “0” no dielétrico do isolador nº1.

De igual forma o isolador na posição nº10 mantém o valor da tensão da linha em todo o seu contorno, concluindo-se que a distribuição de tensão, ao longo da cadeia, fica *comprimada* entre o 2º e o 9º isolador.

Realça-se ainda que, para a cadeia afetada por “poluição parcial”, após a zona com a camada de poluição em cada isolador, a distribuição de tensão apresenta valores semelhantes à da cadeia limpa, em que se verifica o efeito da lavagem dos isoladores por ação da chuva.

Das duas configurações com poluição analisadas verifica-se que o pior caso, do ponto de vista da distribuição de tensão e *stress* para a cadeia, é a situação de “poluição total”, pois os isoladores nº1 e nº10 aparentam uma aparente inibição da sua função, dado que apresentam uma queda de tensão (8 kV, aproximadamente) num curto espaço de linha de fuga, sendo resultado da condutividade e permitividade elétrica da camada de poluição.

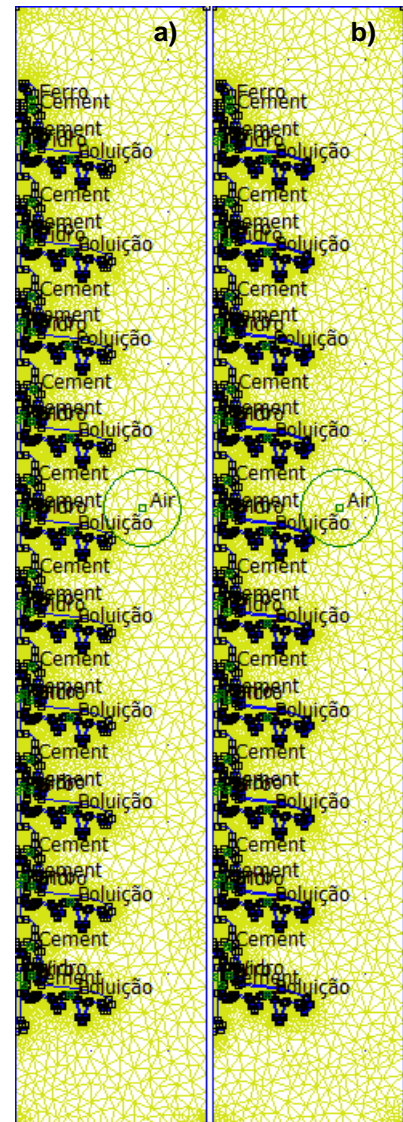


Figura 6.28 - 10xU70BS: *Mesh* de cálculo a) Poluição parcial e b) Poluição total

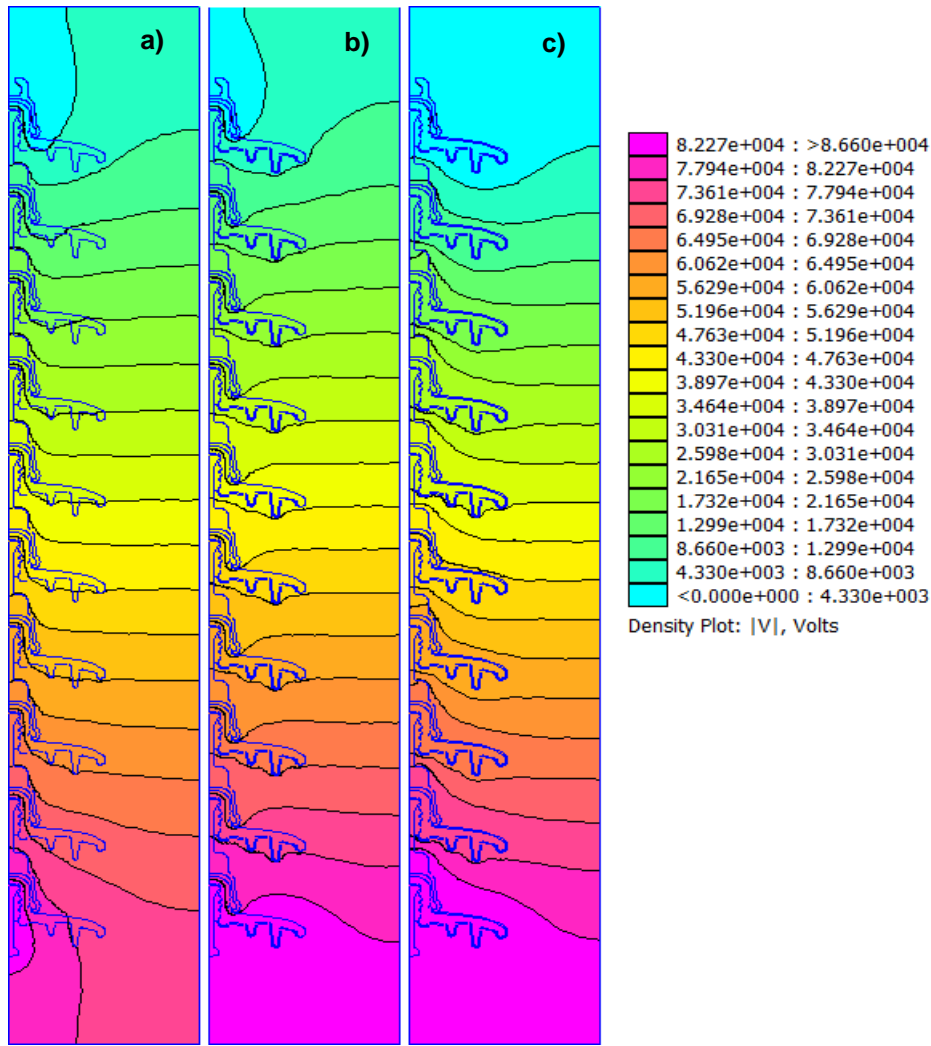


Figura 6.29 - 10xU70BS: Distribuição de tensão no modelo com a) Limpa, b) Poluição parcial e c) Poluição total

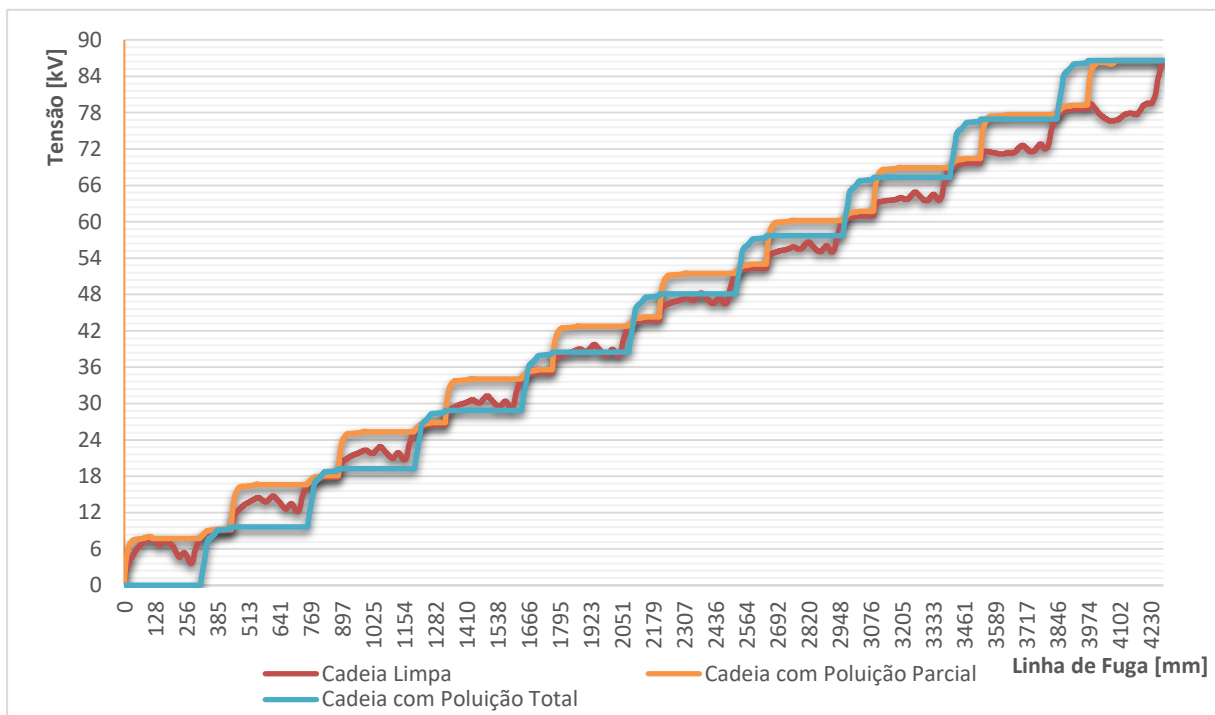


Figura 6.30 - 10xU70BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga

#### 6.5.1.4. Cadeia com poluição e *stubs*

Para esta análise considerou-se os dois tipos de poluição já referidos anteriormente, numa cadeia com dois *stubs* consecutivos, na 1ª e 2ª posição, em comparação com uma cadeia limpa perfeita e uma cadeia limpa com dois *stubs* consecutivos.

As *mesh* de cálculo, apresentadas na Figura 6.31 possuem a seguinte configuração:

- a) 142304 nós e 282858 elementos;
- b) 142111 nós e 282470 elementos.

Analisando a distribuição de tensão nos quatro casos em comparação e apresentados na Figura 6.32 (perfeita e limpa, 2 *stubs* e limpa, 2 *stubs* e poluição parcial e 2 *stubs* e poluição total) verifica-se uma variação da cadeia b) para a cadeia c) em que esta apresenta um ligeiro aumento do nível de tensão motivado, em grande parte, pelo facto do dielétrico do isolador na posição nº10 apresentar valores de Tensão acima dos 82 kV, obrigando a um *shift* vertical das tensões.

No caso da comparação da cadeia b) com a d) a diferença é notória; agregado ao aumento da tensão na presença dos *stubs*, está também presente o efeito da continuidade da parte superior do dielétrico devido a poluição, já referido em 6.5.1.3. Neste caso existe uma diferença de potencial entre o 10º e o 3º isolador de cerca de 32 kV (30%), sendo os restantes 54 kV (70%) repartidos pelos dois *stubs*.

Estas conclusões são, novamente, confirmadas pela distribuição ao longo da linha de fuga e em que se verifica o *stress* imputado à cadeia para este caso, estando os resultados fixados na Figura 6.33.

Salienta-se ainda a diferença de tensão numa cadeia perfeita e limpa no *pin* do 2º isolador para uma cadeia com dois *stubs* e poluição no *pin* do 2º *stub*: 18 kV e 54 kV, respetivamente, correspondendo a um aumento de 300% do valor de tensão para o mesmo local relativo.

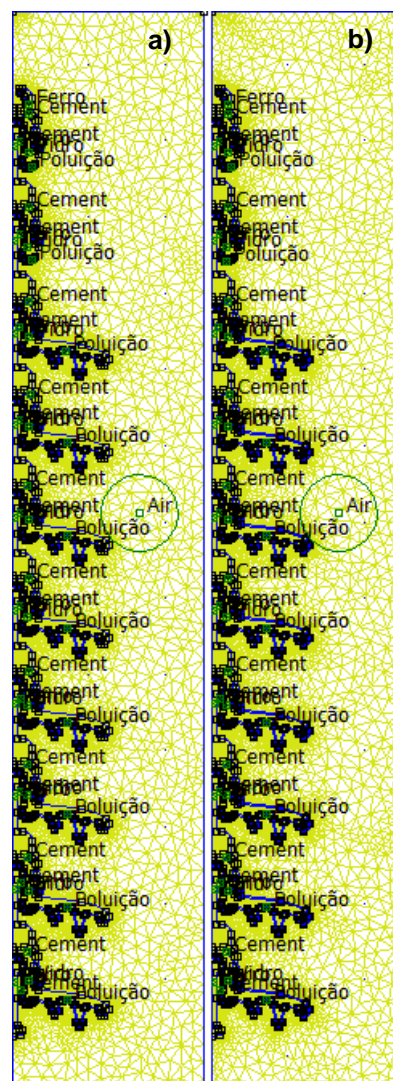


Figura 6.31 - 10xU70BS: *Mesh* de cálculo para cadeia com 2 *stubs*: a) Poluição Parcial e b) Poluição Total

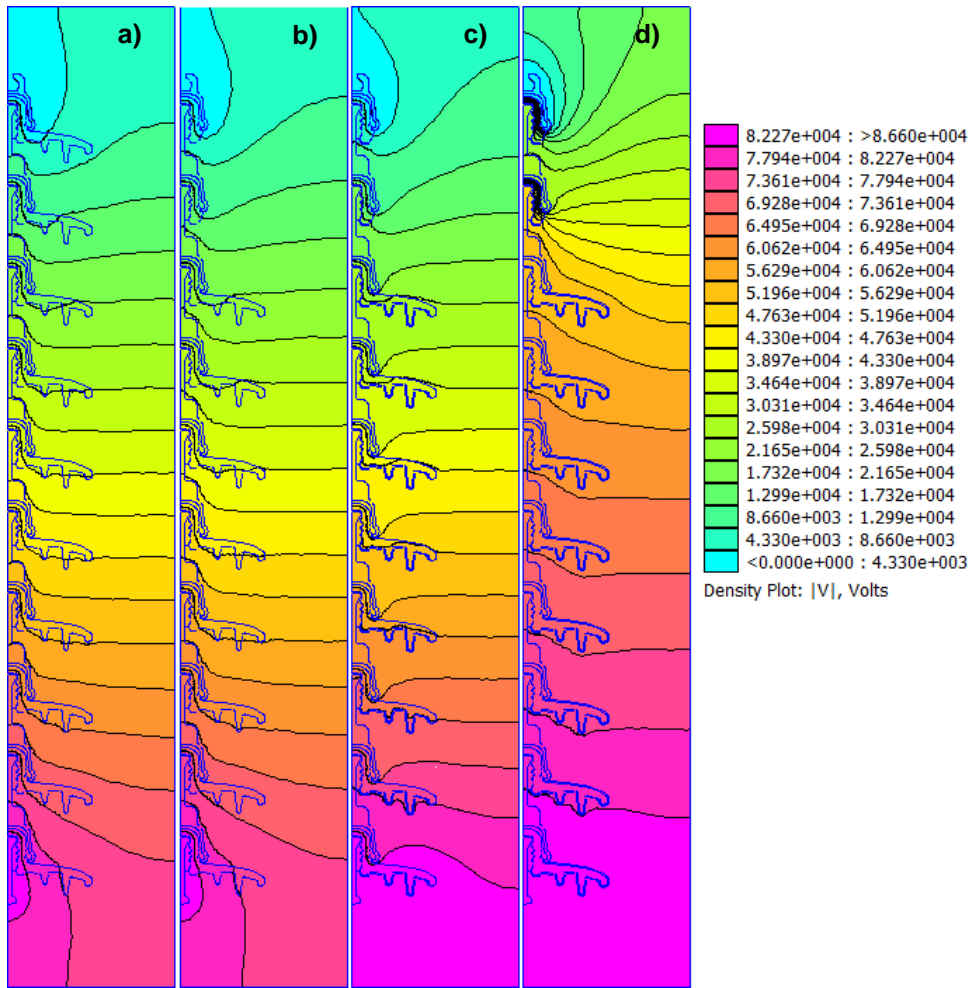


Figura 6.32 - 10xU70BS: Distribuição de Tensão no modelo: a) Limpa, b) Limpa com dois stubs b) Poluição parcial com dois stubs e c) Poluição total com dois stubs

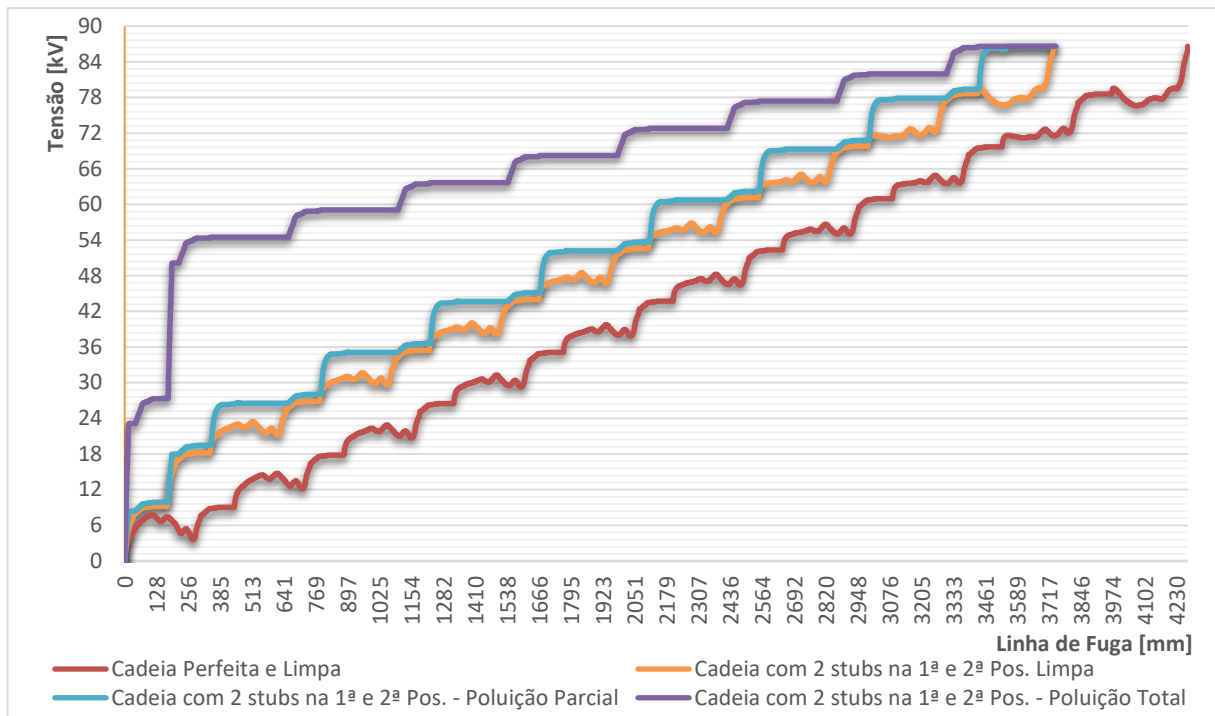


Figura 6.33 - 10xU70BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga

### **6.5.2. 14xU160BS (220kV)**

A análise em 6.5.1 foi também realizada para esta cadeia, típica de 220kV. No entanto, pelas razões descritas em 6.2 e em 6.4, as conclusões relativas à análise para a cadeia 10xU70BS são idênticas às obtidas para esta cadeia. As figuras relativas à distribuição de tensão no modelo e ao longo da linha de fuga estão no Anexo B.

### **6.5.3. 23xU160BS (400kV)**

Da mesma forma que em 6.5.2 as conclusões relativas à análise para a cadeia 10xU70BS são idênticas às obtidas para esta cadeia. As figuras relativas à distribuição de tensão no modelo e ao longo da linha de fuga encontram-se no Anexo C.

## **6.6. Conclusões do capítulo**

Ao longo deste capítulo foram apresentadas as diversas simulações realizadas para compreender o efeito da existência de *stubs* e de poluição na distribuição de tensão num isolador de vidro e numa cadeia.

Pese embora a perda de grande parte da linha de fuga que um isolador possui, aquando do dano do dielétrico, verifica-se que a cada *stub* corresponde um aumento de tensão, a jusante do(s) *stub(s)*, distribuída de forma uniforme pelos isoladores. Esta conclusão é idêntica aos documentos de referência em uso neste estudo, deixando também inferir que se existe aumento de tensão devido à presença de *stubs*, então, em consequência, as tensões que a cadeia pode suportar (regime permanente à frequência industrial, seco e sob chuva; impulso), vão diminuir. Foi também visualizado que a posição dos *stubs* altera a distribuição de tensão, tendo-se concluído que o pior caso será na eventualidade de existirem dois *stubs* consecutivos na 1ª e 2ª posições.

Realizou-se também a análise para o comportamento na presença de poluição, utilizando-se o valor de condutividade elétrica e permitividade elétrica relativa da água do mar, em que se conjugou duas possibilidades: Uma com a cadeia de isoladores contaminada, de forma uniforme ao longo da linha de fuga do dielétrico (Poluição total) e outra supondo que apenas a parte superior do dielétrico foi limpa de forma natural, por ação de precipitação sob a forma de chuva (Poluição parcial). Para as duas situações estudadas concluiu-se que a contaminação favorece o aumento de tensão, dado que existe uma continuidade entre os dielétricos com condutividade diferente de 0 S/m, sendo o pior caso a poluição total, com contaminação ao longo de todo o dielétrico.

Por último, conjugando-se a análise realizada para os *stubs* e a análise realizada para a poluição efetuou-se o estudo de poluição com dois *stubs*. Neste estudo, em que se consideraram os dois ambientes de poluição, verificou-se que o cenário que imprime maior *stress* para a cadeia será o “Poluição total com dois *stubs*”, com uma diferença de potencial de cerca de 70% da tensão aplicada imposta aos dois *stubs*.

No próximo capítulo serão apresentadas as conclusões finais deste trabalho.

## 7. Conclusões e trabalhos futuros

### 7.1. Conclusões

Ao longo deste trabalho foram apresentadas diversas temáticas conducentes ao objetivo de caracterizar a distribuição de Tensão numa cadeia de isoladores e quais os fatores que afetam o seu normal funcionamento.

Introduziu-se o tema “Linhas Aéreas de Muito Alta Tensão”, apresentando de forma sucinta a história da evolução da Rede de Transporte e caracterizando os componentes que compõem as linhas aéreas de MAT, pois constituem um sistema que está exposto a fatores externos. Estes fatores (vento, água, calor) impõem condições que favorecem a degradação dos componentes obrigando a que estes sejam dimensionados e desenhados para resistir a essas condições durante o tempo de vida, alargado, de uma linha de MAT.

A sustentação de uma rede de transporte passa obrigatoriamente pela manutenção dessas linhas que devido à multiplicidade de componentes existentes, os pontos suscetíveis de falha são inúmeros. Neste contexto o operador da RNT promove inspeções às linhas, de forma a priorizar e planear eventuais ações de manutenção corretiva decorrentes das anomalias encontradas. A Inspeção a linhas aéreas, por via aérea, permite abarcar uma variedade de verificações desde a inspeção visual até à inspeção de ninhos de cegonha, passando pela termografia e medição de distâncias, esta última de especial relevância no cumprimento dos limites mínimos de distância a obstáculos exigidos por Lei, permitindo planear a desflorestação na faixa de serviço da linha aérea de MAT.

Tendo em consideração a função desempenhada pelas cadeias de isoladores, atendendo ao defeito “Isolador partido”, encontrado no decorrer da inspeção visual, bem como a quantidade de isoladores existentes numa linha de MAT, introduziu-se o componente “Isolador”, caracterizando os seus elementos constituintes e o seu comportamento espetável face a alterações de temperatura, forças mecânicas a que está sujeito e *stress* elétrico. Neste último caracterizou-se ainda a curva de distribuição de tensão específica e respetivo circuito equivalente.

Caracterizou-se ainda um isolador partido ou *stub*, apresentando o seu circuito equivalente e referenciado, tendo por base outros trabalhos nesta temática, evidenciou-se os efeitos da sua existência no comportamento elétrico numa cadeia, no âmbito das tensões de disrupção e em regime permanente em ambientes secos e molhados (queda de precipitação), à frequência industrial. Verificou-se que não só a existência de *stubs*, mas também as suas posições relativas numa cadeia afetam o seu desempenho, degradando a sua capacidade de isolamento, tendo-se identificado como pior caso a disposição em que os *stubs* estão dispostos consecutivamente e localizados junto ao apoio (primeiras posições da cadeia).

De forma a permitir uma base experimental foram realizados ensaios, no Laboratório de alta tensão da Labelec, em que de facto foi visível a alteração de distribuição de tensão com a existência de *stubs*. Indispensável por motivos de segurança, foi interposta uma grade metálica, conectada à terra

de proteção, que alterou os resultados, devido à alteração do campo elétrico envolvente. No entanto, verificou-se uma alteração da distribuição da tensão aquando da substituição do 10º isolador por um *stub*.

Após confirmação das premissas iniciais deu-se início ao estudo por elementos finitos, caracterizando esse mesmo estudo e as áreas onde intervém. Foi elaborado o problema, definindo-se o tipo de estudo aplicável ao problema e caracterizando a formulação matemática que permite a sua solução.

Para uma maior precisão do estudo por elementos finitos concorrem a geometria, as características elétricas dos materiais usados, as condições-fronteira e a configuração da malha de cálculo. Desta forma foram devidamente definidas as constantes elétricas dos elementos que constituem um isolador, bem como uma hipótese de contaminação, com referência a estudos feitos anteriormente. Para o objeto deste trabalho, os isoladores, foram utilizados tipos de isoladores tipicamente usados, U70BS e U160BS, bem como as cadeias típicas para os três níveis de tensão MAT em uso em Portugal.

O estudo, no entanto, foi dividido em isolador e cadeia permitindo obter, numa primeira fase, a distribuição de tensão num isolador unitário, e conseqüente comparação com a distribuição de Tensão num *stub*.

No que concerne à análise isolador vs. *stub*, além da notória perda de linha de fuga foi verificada uma diferença na distribuição de tensão, em que no isolador a tensão mantém-se estável, entre os 2 e os 3 kV até à última nervura, e após este local a tensão evolui linearmente, com grande declive, até à tensão aplicada (11 kV). No caso do *stub* a tensão evolui linearmente, com declive idêntico ao anterior. Desta forma concluiu-se que as nervuras realizam um efeito “tampão” na distribuição de tensão mantendo, ao longo delas, uma tensão quase constante.

Neste aspeto foi também analisada a presença de poluição, tendo-se caracterizado dois cenários: um com uma camada de poluição uniforme ao longo do dielétrico, denominada de “Poluição total” e outra simulando a limpeza natural por ação de precipitação sob a forma de chuva, em que a camada de poluição uniforme apenas estaria presente na parte inferior do dielétrico, denominada de “Poluição parcial”. Nesta análise verificou-se que consoante o cenário aplicado a curva de distribuição varia. No cenário “Poluição total”, existe uma continuidade afeta à permitividade e condutividade elétrica da camada de poluição, que favorece uma corrente elétrica. Verificou-se que a curva de distribuição da tensão ao longo do isolador era maioritariamente linear, concluindo-se que, neste cenário, a tensão era influenciada maioritariamente por uma componente resistiva.

Contudo, no cenário “Poluição parcial”, a componente condutora existe apenas na parte inferior, sendo que a parte superior do dielétrico encontra-se limpa. Neste caso, verificou-se uma elevação de tensão superior à do anterior cenário devido, uma vez mais, à continuidade existente obrigando o dielétrico remanescente limpo a um maior fator de *stress*. No que respeita à distribuição de tensão verificou-se ainda que seguia uma curva logarítmica, concluindo-se que a tensão era influenciada

maioritariamente por uma componente capacitiva, em virtude da parte superior do dielétrico se encontrar limpa.

A comparação entre os cenários (limpo, poluição total e poluição parcial) revelou que o pior cenário, tendo em conta o nível de tensão mais elevado na campânula (0V) seria o cenário de poluição parcial, pois o máximo de tensão é atingido aos 111mm da linha de fuga face aos 300mm das outras duas situações.

Relativamente à análise em cadeia foram desenvolvidos quatro cenários, com diversas simulações, que pretendiam conjugar as conclusões obtidas em situações de cadeia limpa e perfeita, limpa com *stubs*, poluída e perfeita e poluída com *stubs*.

Relativamente ao cenário inicial (cadeia limpa e perfeita) verificou-se que a distribuição de tensão segue uma forma linear, em que cada isolador da cadeia contribui de forma linear para a queda de tensão ao longo da cadeia. Este cenário revelou-se idêntico ao já verificado nas referências bibliográficas utilizadas ao longo deste trabalho, permitindo confiança face aos resultados obtidos.

No segundo cenário, cadeia limpa com *stubs*, foram introduzidos, a cada simulação um, dois e três *stubs* ocupando a 1ª, 2ª e 3ª posição, respetivamente. Foi verificado, a cada simulação que a distribuição de tensão aumenta cerca de 7 kV a cada *stub* presente na cadeia, medidos no *pin* do isolador a seguir ao último *stub*. Esta constatação permite concluir o já verificado anteriormente relativamente à função de isolamento de cada isolador presente numa cadeia, e confirma os resultados de outros estudos em que a presença de *stubs* influencia o comportamento elétrico, em regime permanente à frequência industrial (seco e sob chuva) e em impulso. Esta conclusão decorre da premissa que em caso de escorvamento vai ocorrer uma corrente que percorrer a superfície dos dielétricos. Se a linha de fuga é menor devido à existência de *stubs* então a tensão em regime permanente é superior (isolamento degradado) face a uma cadeia perfeita, piorando o comportamento elétrico da cadeia.

Tendo-se verificado que a presença de *stubs* influencia a distribuição de tensão ao longo de uma cadeia de isoladores o passo seguinte foi alterar dentro da cadeia a posição dos isoladores partidos. Foram realizadas três simulações em cadeias com dois *stubs*: no início (1ª e 2ª pos.), no meio (5ª e 6ª pos.) e no fim da cadeia (9ª e 10ª pos.). Conjugando os três cenários verificou-se que a jusante dos *stubs* ocorria uma elevação de tensão, e que o pior caso seria dois *stubs* na 1ª e 2ª posição, e o melhor caso na 9ª e 10ª, pois a distribuição de Tensão a montante do *stub* regressava a valores idênticos para uma cadeia perfeita, concluindo-se que a tensão que deveria ter sido reduzida pelos isoladores (que foram partidos) é repartida pelos seguintes.

Introduziu-se seguidamente a contaminação por poluição a uma cadeia perfeita, em que se realizaram duas simulações: uma com poluição total e outra com poluição parcial.

Na simulação de poluição total verifica-se uma notória alteração da distribuição face a uma cadeia limpa. A continuidade existente em toda a superfície do dielétrico causa a imposição do valor "0V" no 1º isolador e do valor da tensão nominal da linha no 10º isolador. Conclui-se que a queda de

tensão que era repartida por dez isoladores fica circunscrita a oito isoladores, imprimindo um maior *stress* à cadeia.

Na segunda simulação (“Poluição parcial”) verificou-se um aumento de tensão ao longo do 10º isolador, em comparação como uma cadeia limpa, que resulta da condução afeta à camada de poluição na parte inferior do dielétrico. No entanto, aquando da passagem da linha de fuga para a zona superior desse dielétrico, os valores de tensão seguem sensivelmente os mesmos valores que numa cadeia limpa para a mesma zona do dielétrico, voltando a subir, quando a linha de fuga volta à zona inferior no dielétrico do isolador seguinte.

Com estas duas simulações representou-se o “antes” e o “depois” da limpeza natural dos isoladores por ação da queda de precipitação, concluindo-se que a introdução de poluição numa cadeia aumenta a condutividade ao longo do dielétrico (condutividade superficial) traduzindo-se num aumento da queda de Tensão a cada isolador.

Por fim realizou-se uma conjunção de cenários, em que aliando a existência de dois *stubs*, na 1ª e 2ª posição, com a presença de uma camada de poluição, para os dois cenários de poluição.

Considerando-se a simulação “Poluição parcial” verificou-se o já referido aumento de tensão na zona poluída do dielétrico, reduzindo para os valores já conhecidos para uma cadeia de isoladores com dois *stubs* nas posições iniciais, na zona não poluída do dielétrico.

Na simulação “Poluição total”, contudo, o efeito foi de sobremaneira evidente; a conjunção da elevação de Tensão adstrita à existência de *stubs* com a continuidade afeta à poluição em toda a superfície do dielétrico verificou uma diferença de potencial de cerca de 30% da tensão aplicada nos oito isoladores poluídos contrastando com 70% nos dois *stubs*. Conclui-se que este cenário, o mais nefasto tendo em conta o nível de tensão mais próximo do apoio, que não só a limpeza dos isoladores é importante, mas quando conjugado com a existência de *stubs*, aumenta substancialmente o risco de contornamento, podendo implicar indisponibilidades na rede.

Foram ainda realizadas simulações, com a mesma metodologia, para cadeias típicas de 220kV (14xU160BS) e 400kV (23xU160BS), tendo-se obtido as mesmas conclusões.

## **7.2. Recomendações e trabalhos futuros**

Este trabalho, que se constitui como um primeiro passo, assentou em referências externas a Portugal, dado a pouca informação disponível nesta temática, nomeadamente parâmetros geométricos e parâmetros elétricos dos constituintes dos isoladores, bem como ensaios experimentais já realizados conducentes às conclusões obtidas.

Sugere-se a continuação do estudo desta temática, nomeadamente simulação em ambiente húmido e na procura de valores mais precisos de condutividade e permitividade, bem como a correlação entre os níveis de poluição existentes e as camadas de poluição a modelizar. Para o cálculo e a análise

sugere-se a sua realização via cálculo por elementos finitos, pois constitui-se como uma ferramenta poderosa para este tipo de análise.

Sugere-se ainda a evolução deste estudo para os isoladores rígidos de compósito, de forma a entender e prever o seu comportamento face a alterações das bainhas e/ou poluição, bem como cadeias duplas.

PÁGINA INTENCIONALMENTE DEIXADA EM BRANCO

## **Anexos**

PÁGINA INTENCIONALMENTE DEIXADA EM BRANCO

## A. Resultados obtidos isolador/*stub* U160BS

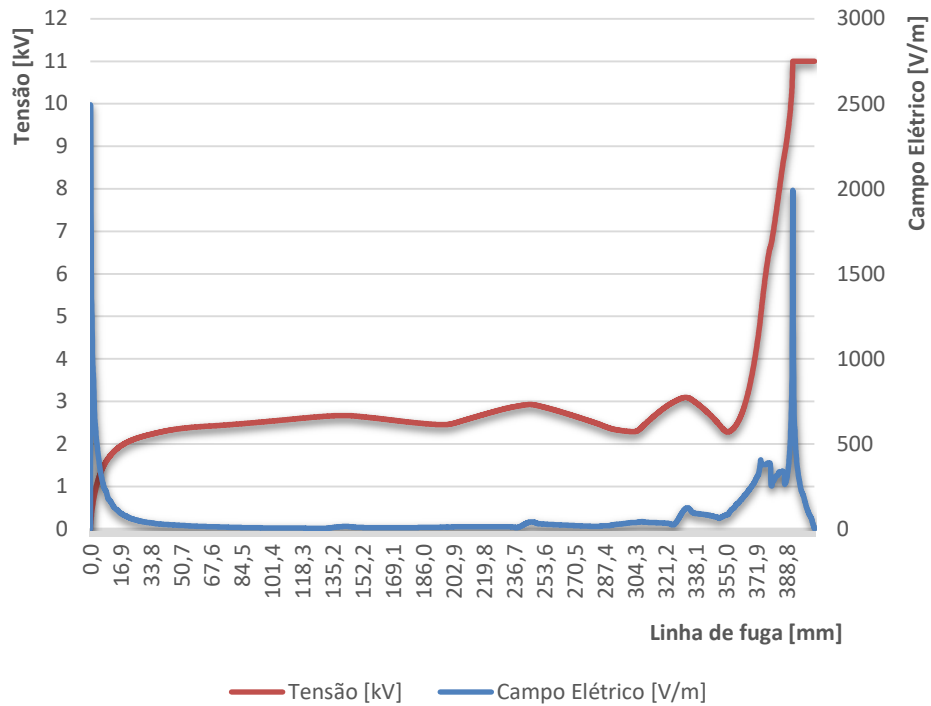


Figura A-1 – U160BS: Tensão vs campo elétrico ao longo da linha de fuga

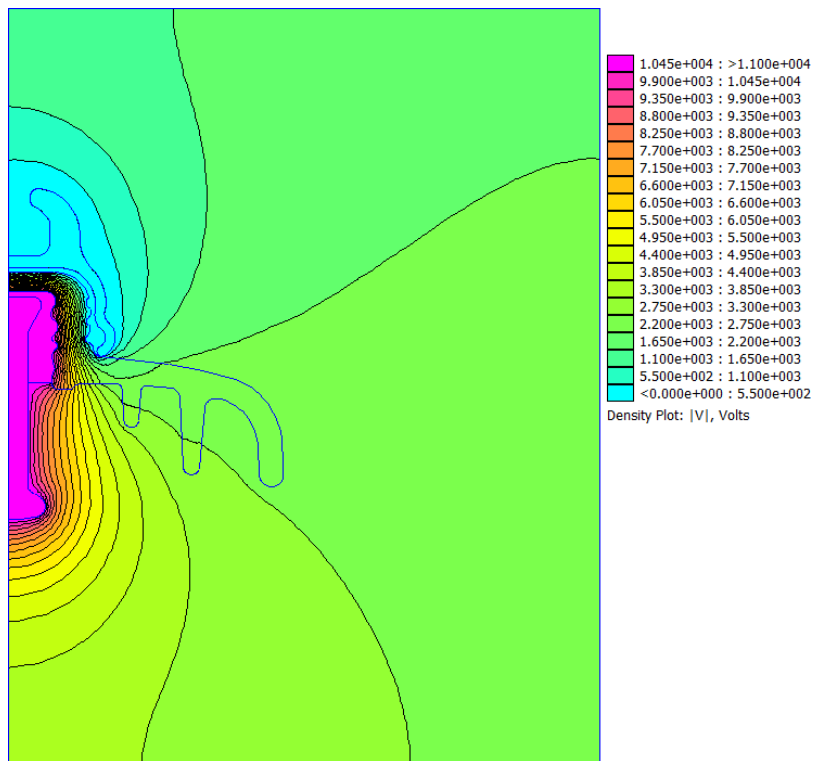


Figura A-2 - U160BS: Distribuição de tensão no modelo

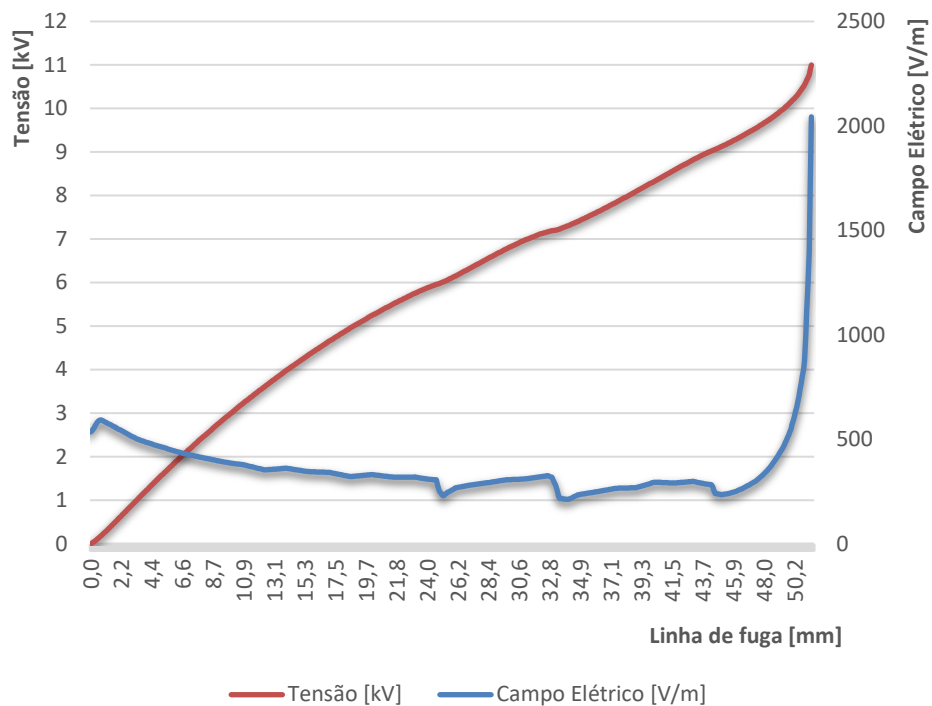


Figura A-3 – Stub U160BS: Tensão vs campo elétrico ao longo da linha de fuga

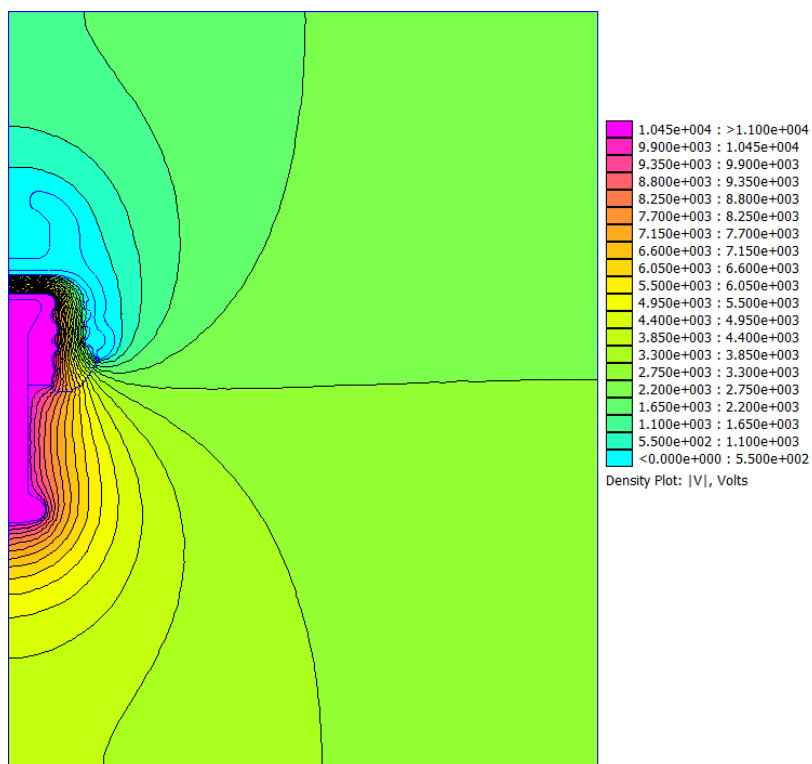


Figura A-4 - Stub U160BS: Distribuição de tensão no modelo

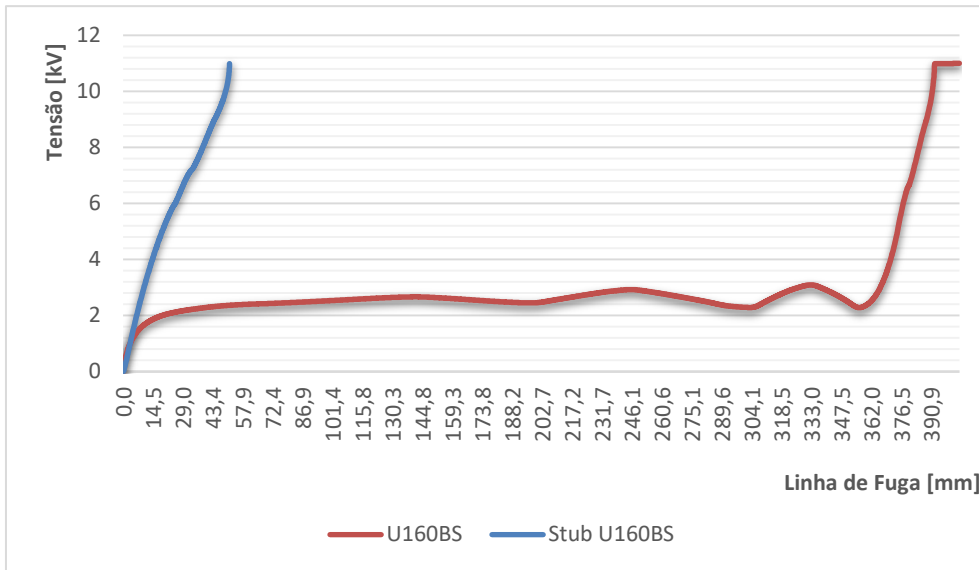


Figura A-5 – U160BS vs. stub U160BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga

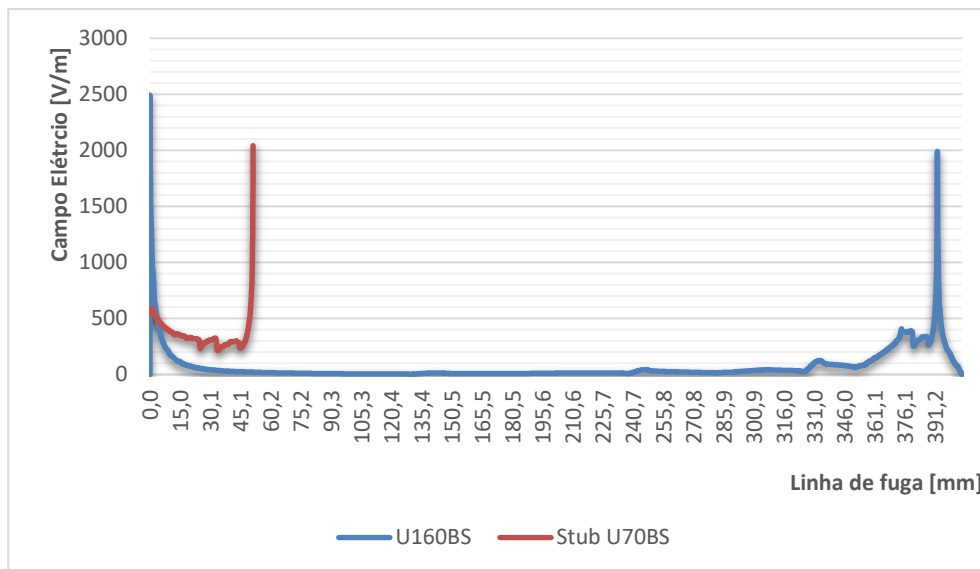


Figura A-6 – U160BS vs. stub U160BS: Campo elétrico

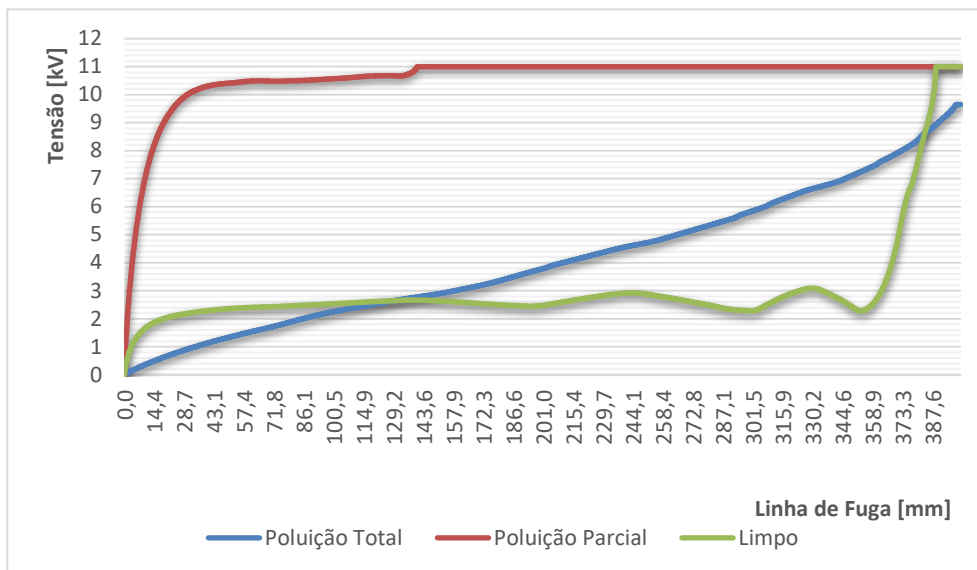


Figura A-7 – U160BS: Comparação da distribuição de tensão entre tipos de poluição

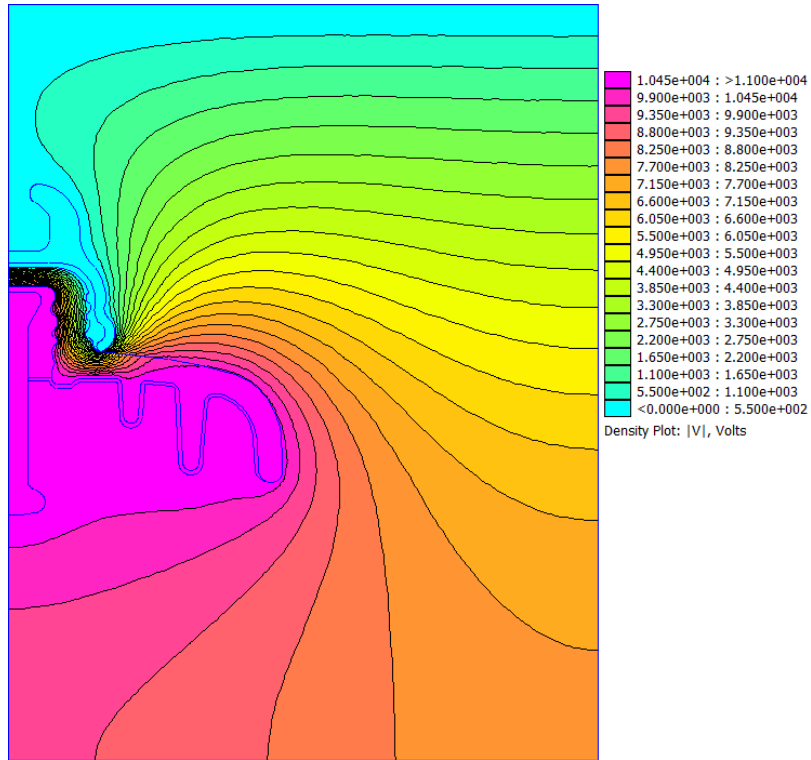


Figura A-7 – U160BS: Distribuição de tensão no modelo - Poluição parcial

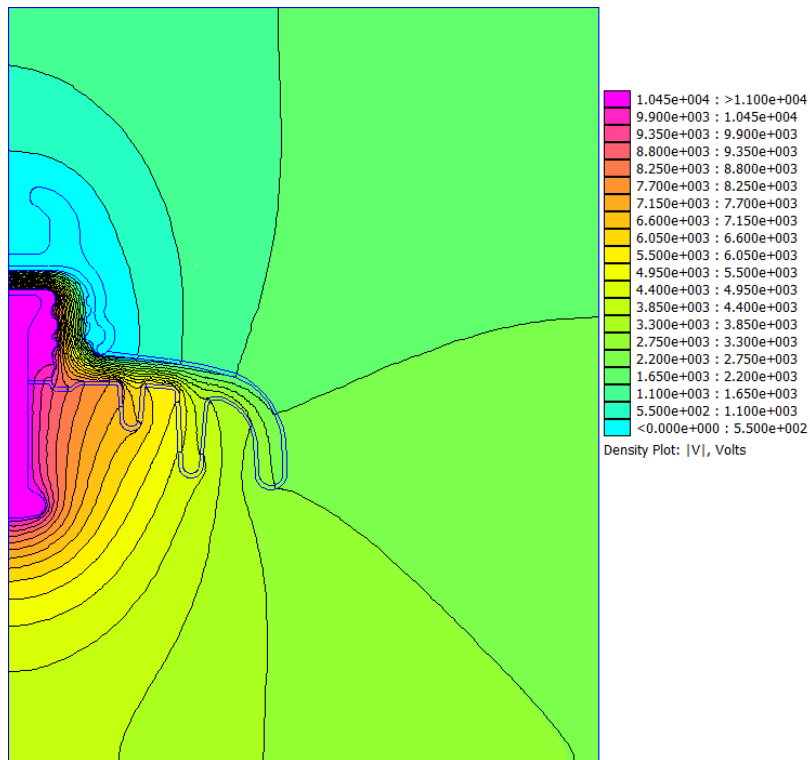


Figura A-8 - U160BS: Distribuição de tensão no modelo – Poluição total

## B. Resultados obtidos cadeia 14xU160BS (220kV)

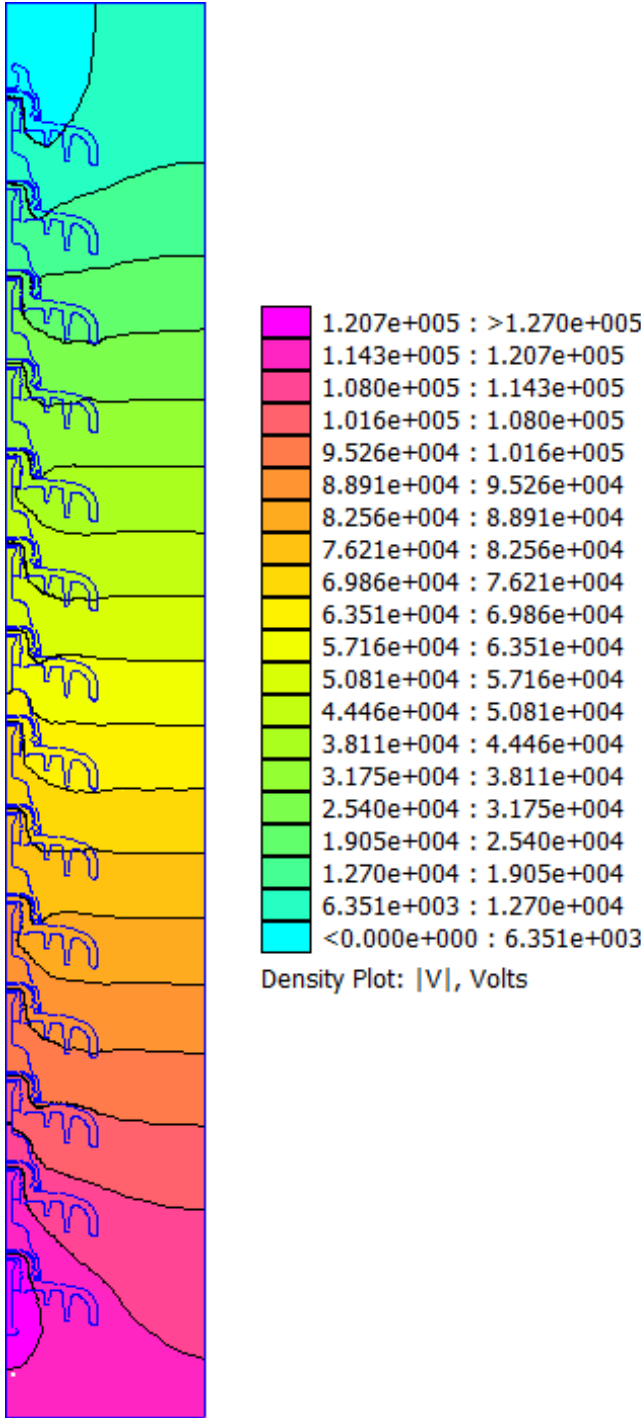


Figura B-1 - 14xU160BS: Distribuição de tensão no modelo (Cadeia perfeita)

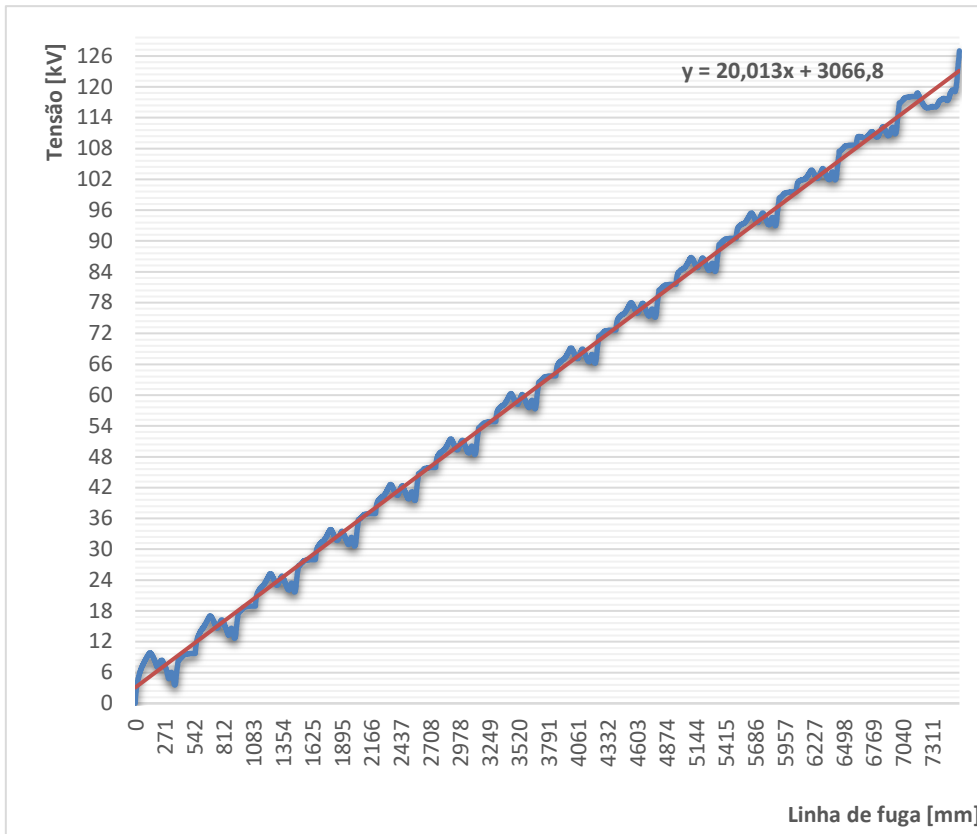


Figura B-2 - 14xU160BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga (Cadeia perfeita)

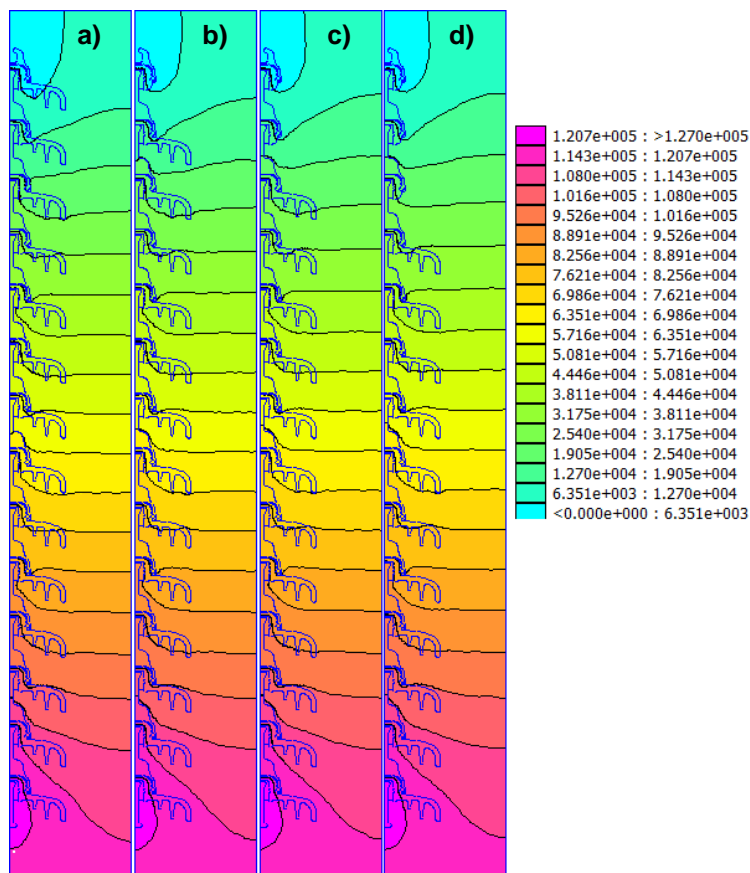


Figura B-3 - 14xU160BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga: a) Cadeia perfeita, b) Cadeia com um stub, c) Cadeia com dois stubs e d) Cadeia com três stubs

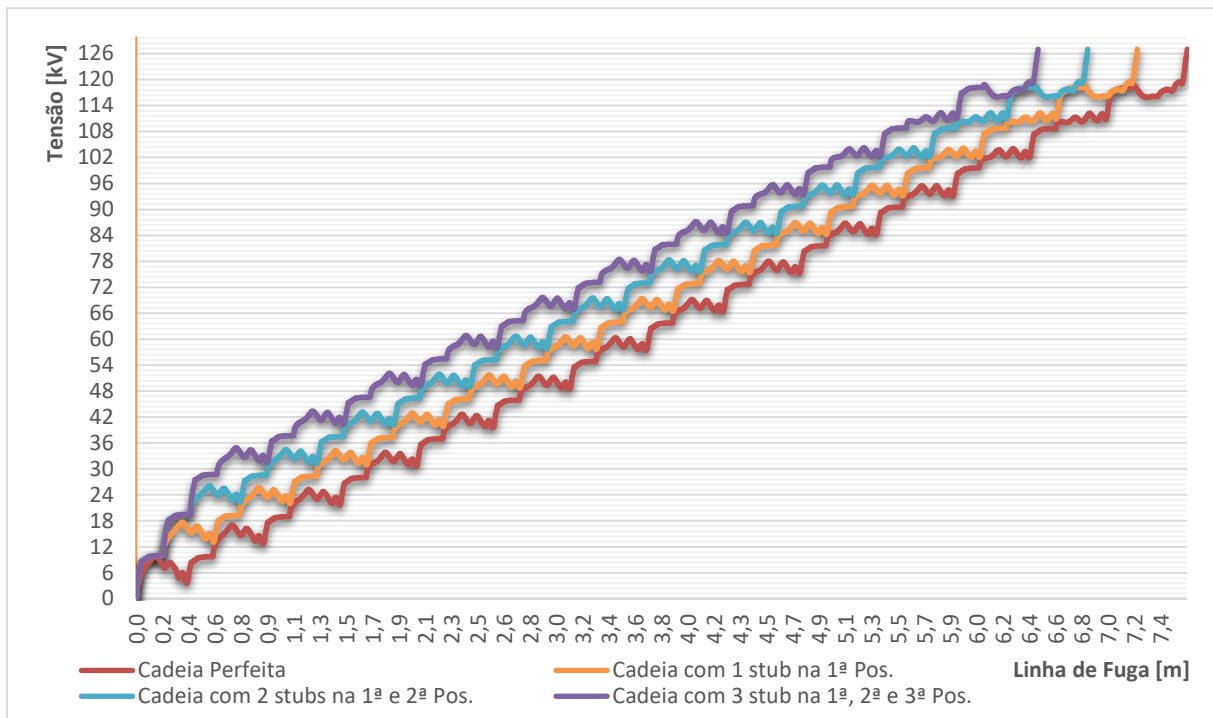


Figura B-4 - 14xU160BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga em cadeias com stubs

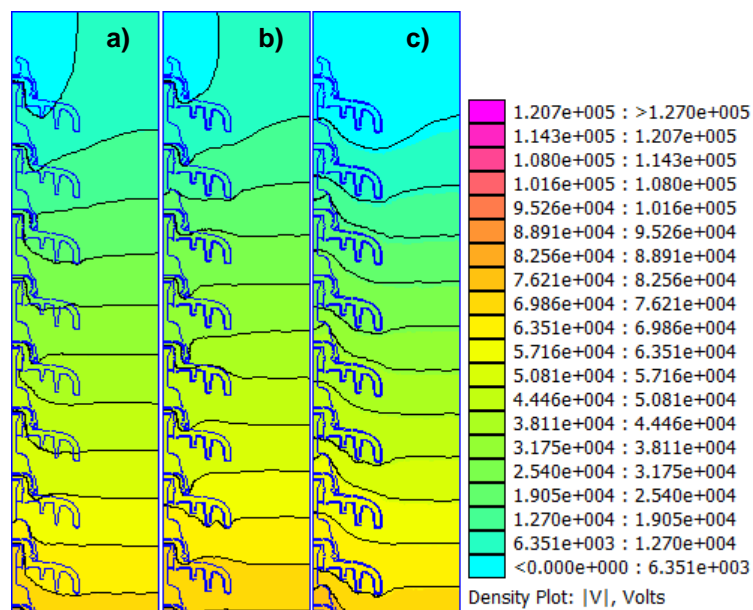


Figura B-5 - 14xU160BS: Distribuição de Tensão no modelo com a) Limpa, b) Poluição parcial e c) Poluição total

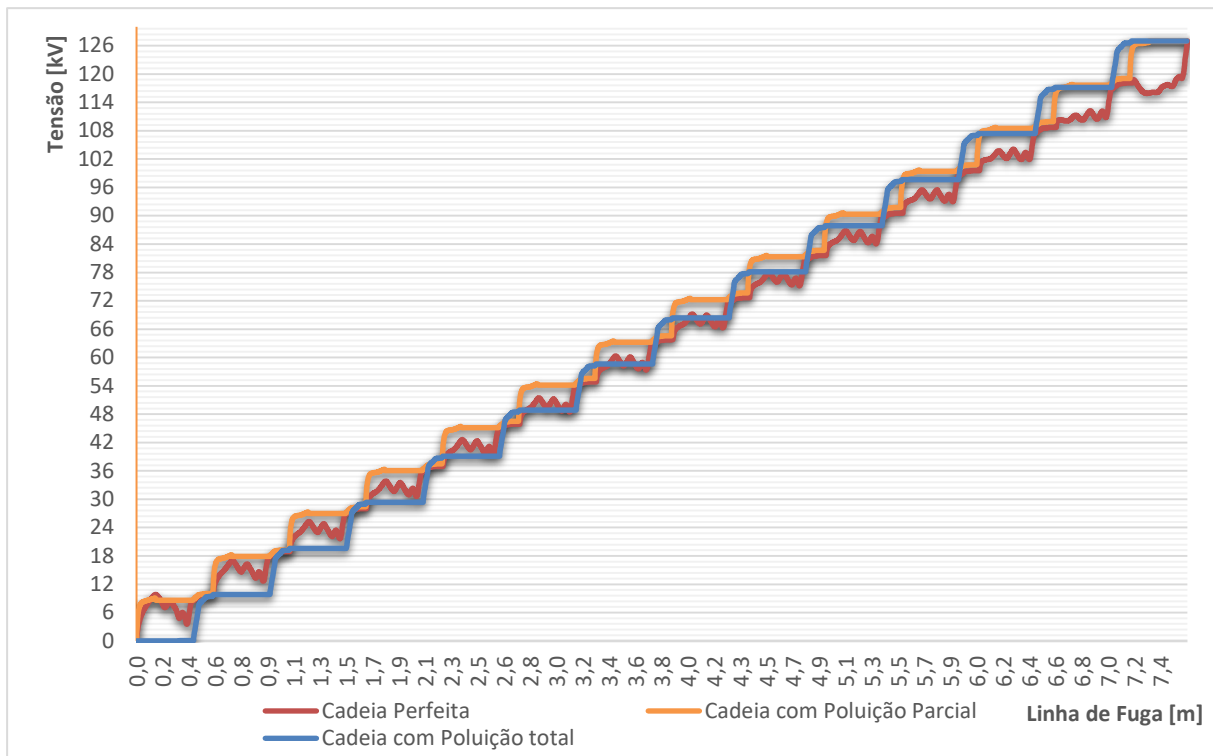


Figura B-6 - 14xU160BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga

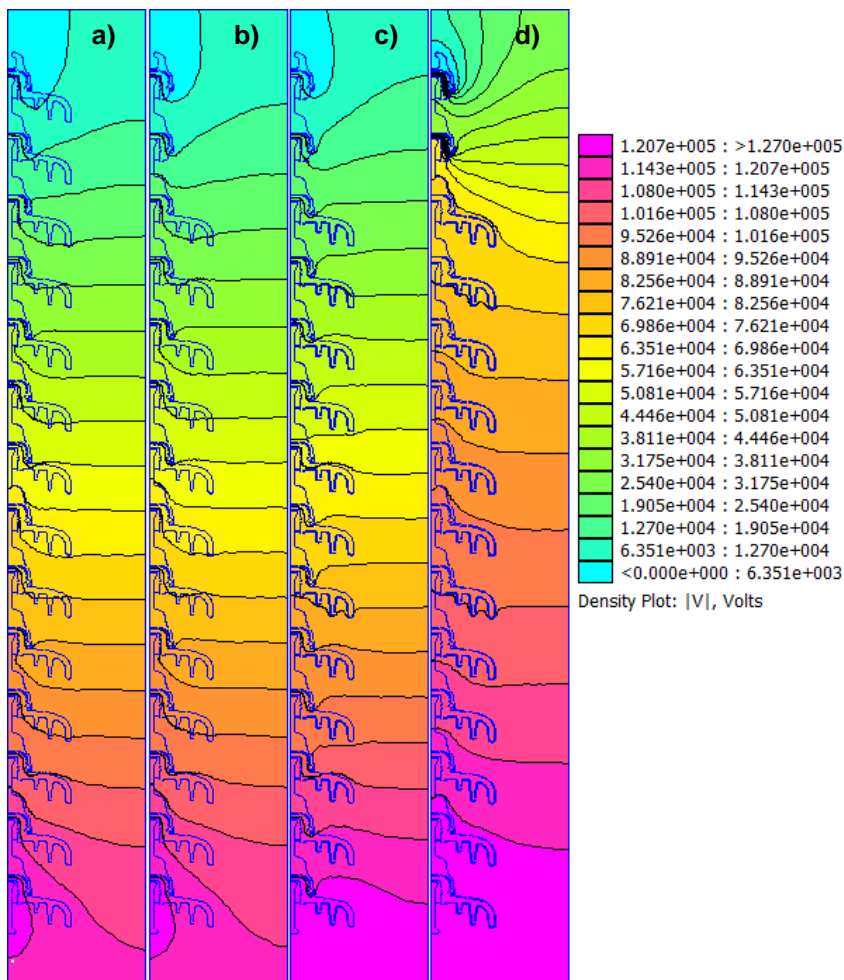


Figura B-7 - 14xU160BS: Distribuição de Tensão no modelo com a) Limpa, b) Limpa com dois stubs, c) Poluição parcial com dois stubs e d) Poluição total com dois stubs

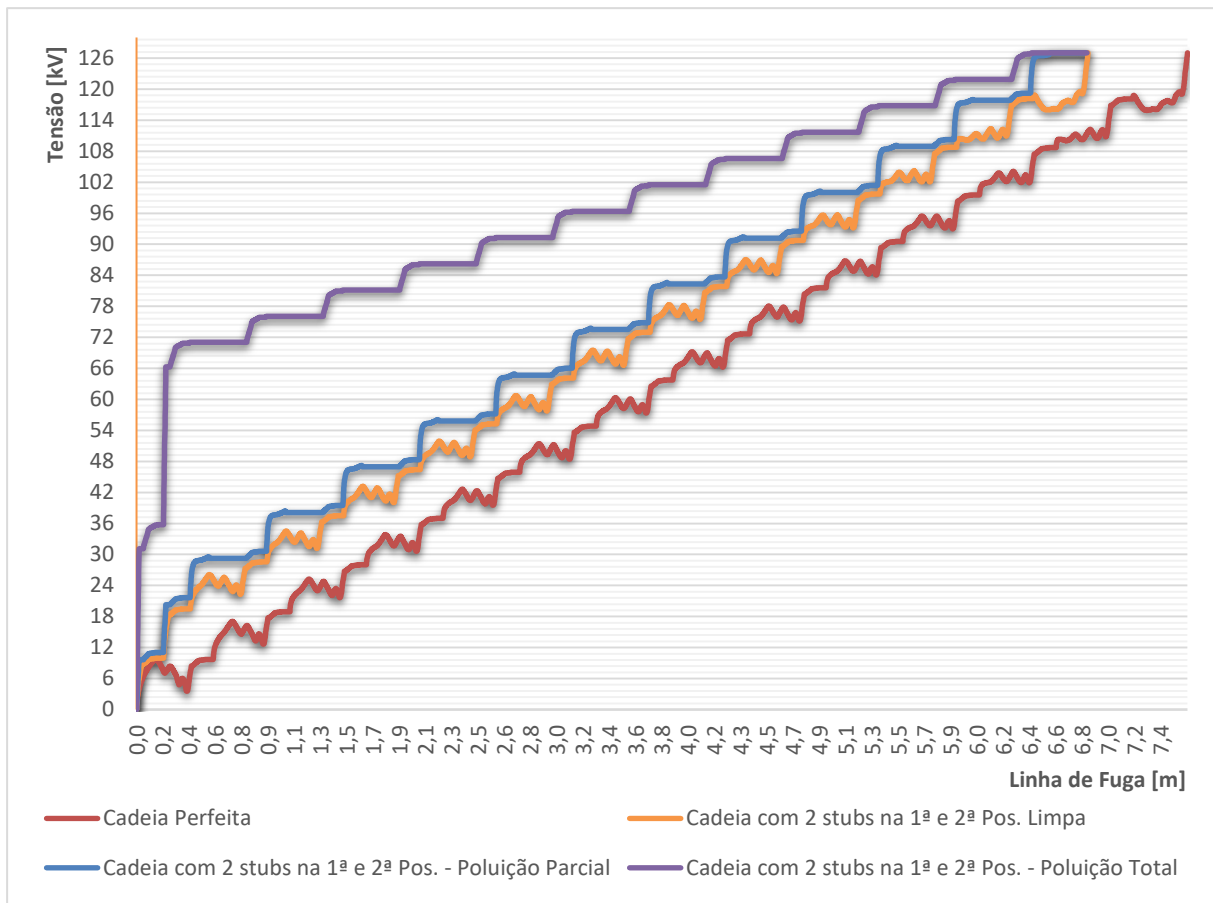


Figura B-8 - 14xU160BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga

PÁGINA INTENCIONALMENTE DEIXADA EM BRANCO

## C. Resultados obtidos cadeia 23xU160BS (400kV)

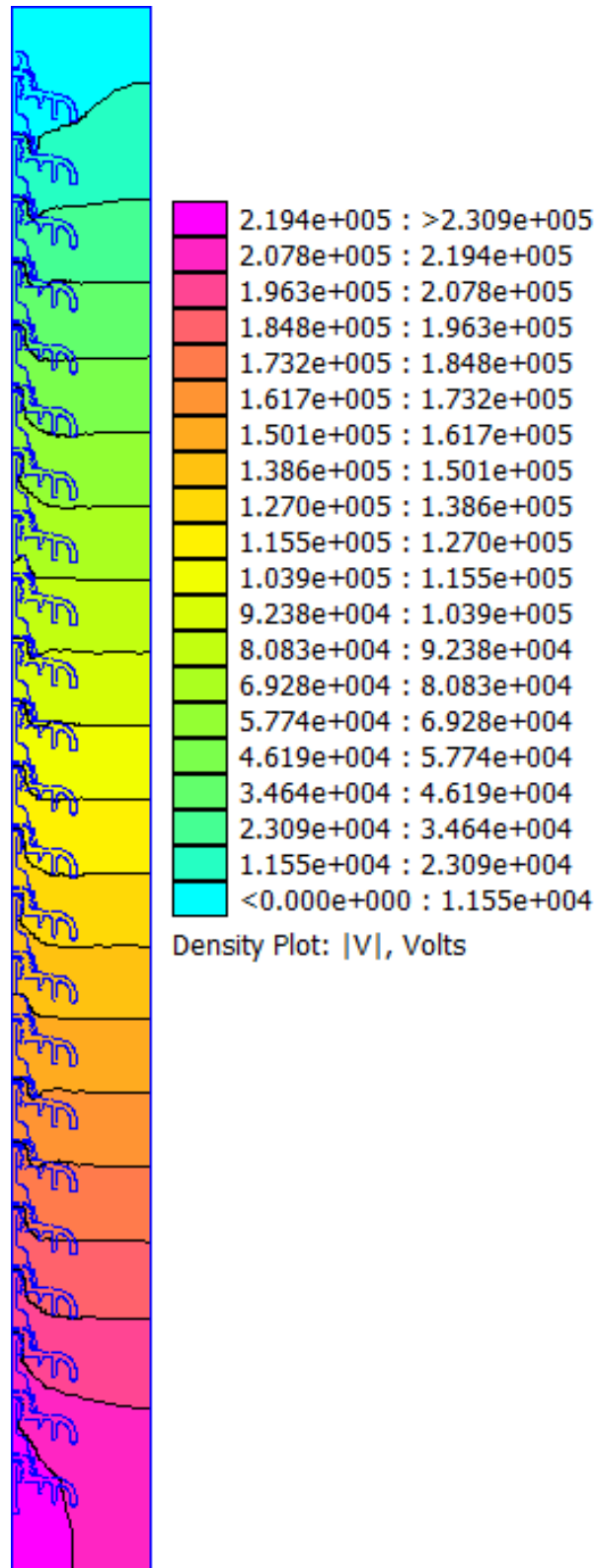


Figura C-1 - 23xU160BS: Distribuição de tensão no modelo (Cadeia perfeita)

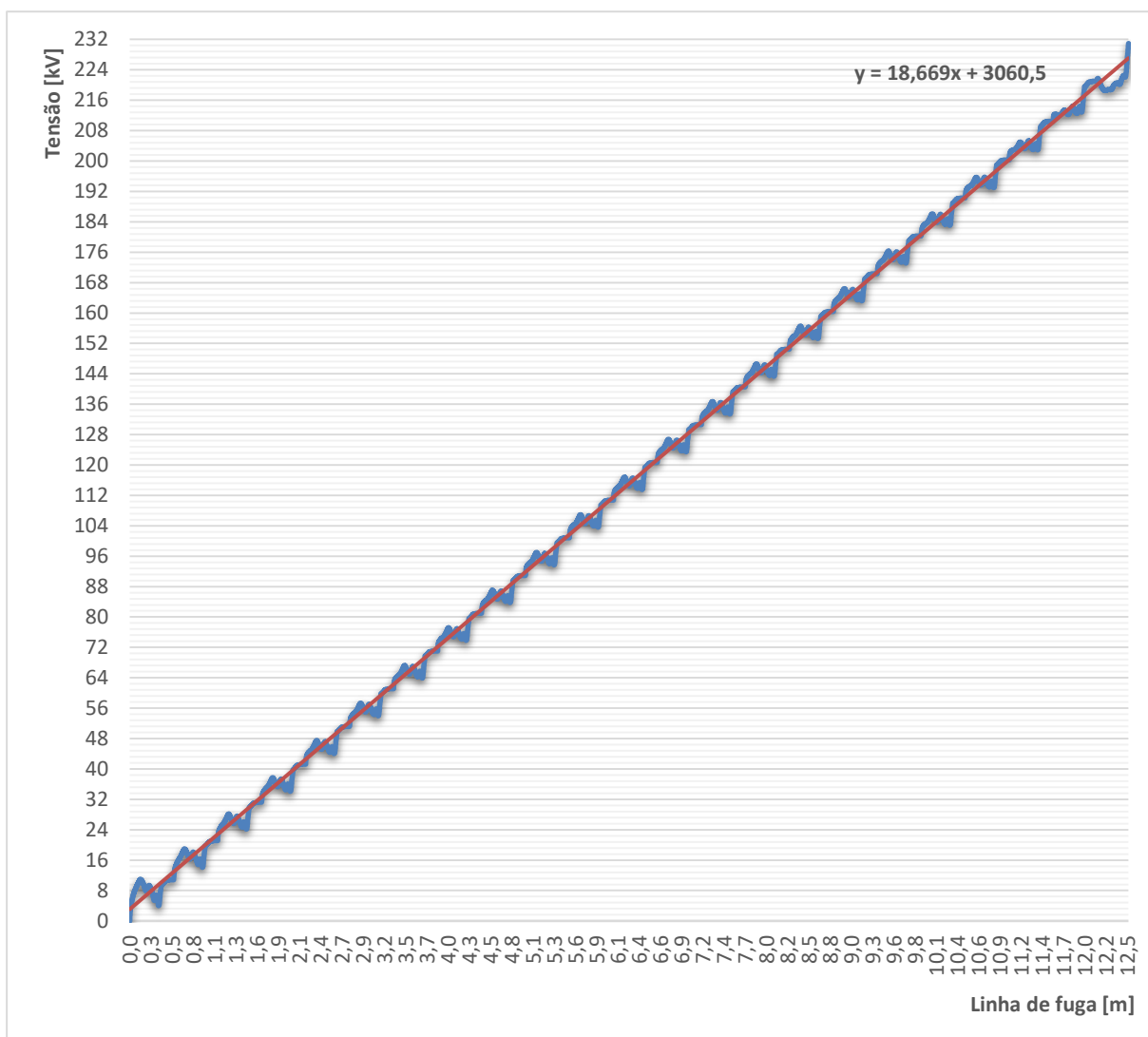


Figura C-2 - 23xU160BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga (Cadeia perfeita)

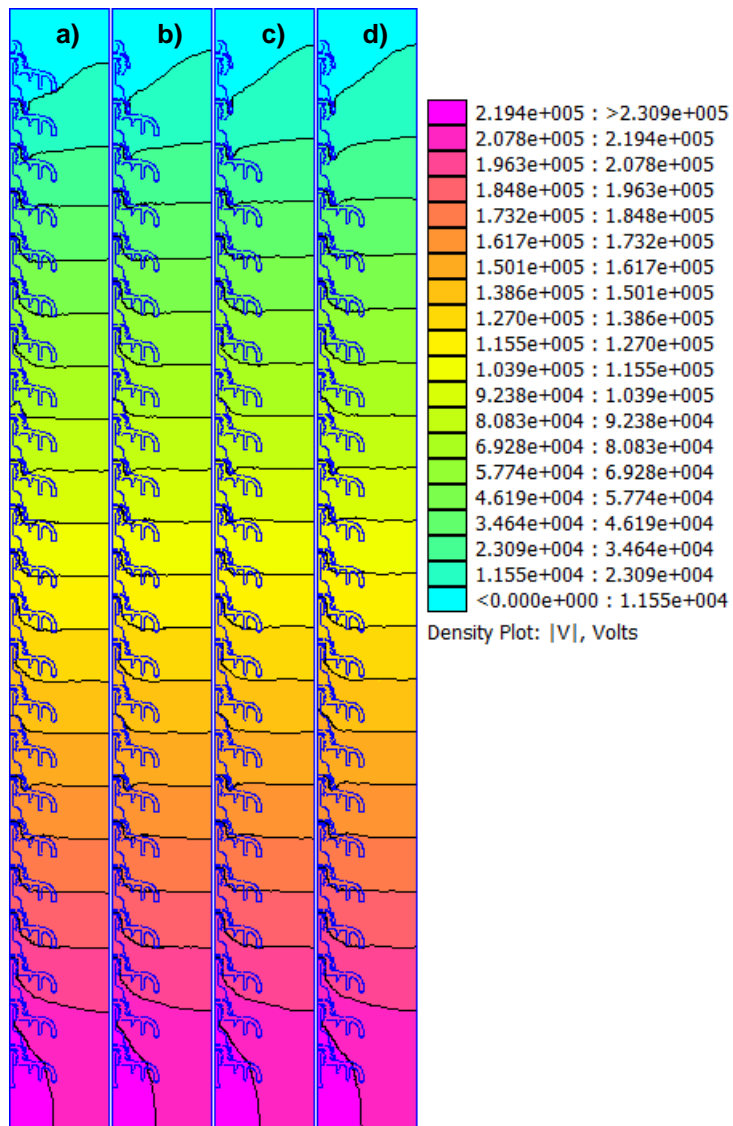


Figura C-3 - 23xU160BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga: a) Cadeia perfeita, b) Cadeia com um stub, c) Cadeia com dois stubs e d) Cadeia com três stubs

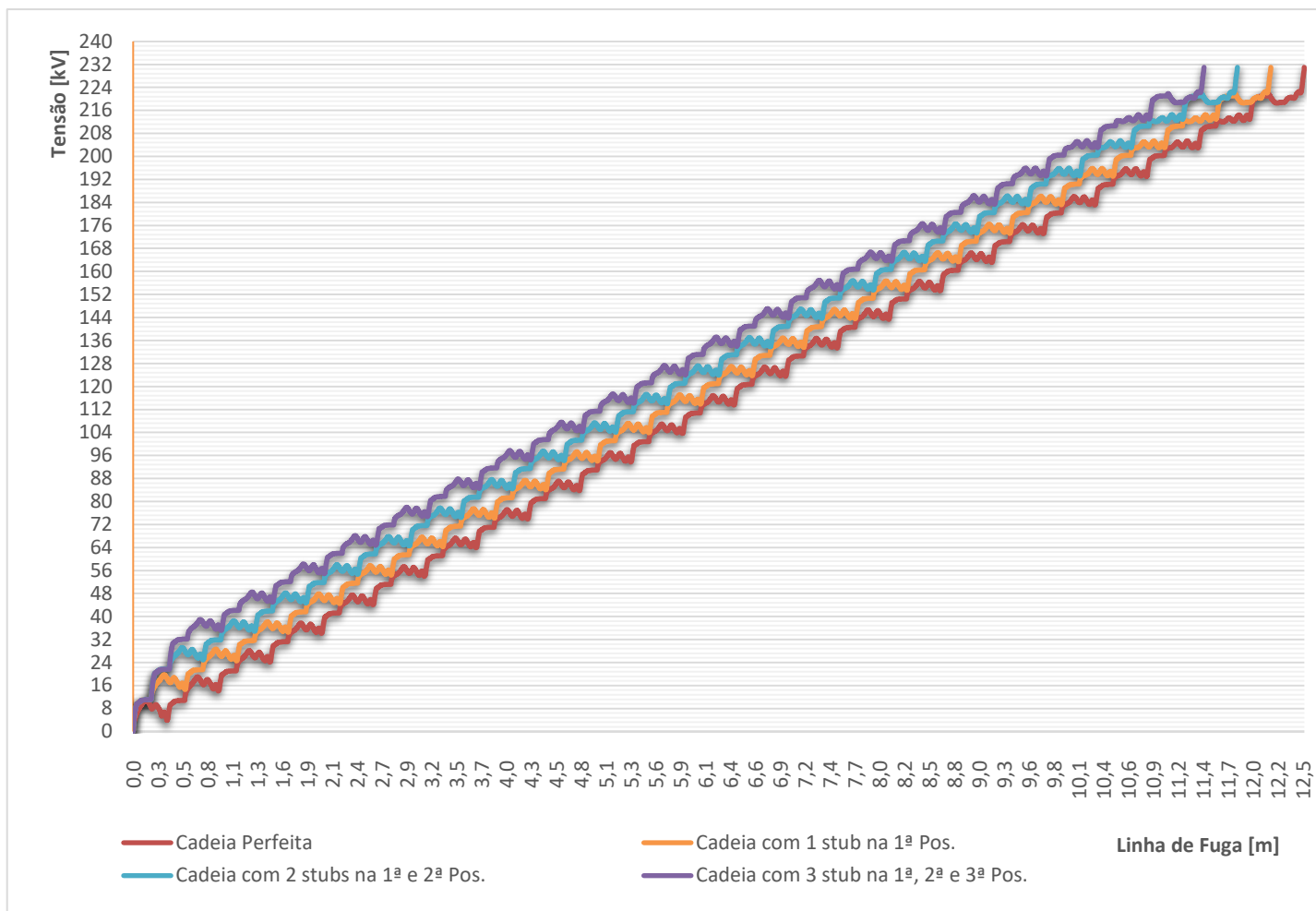


Figura C-4 - 23xU160BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga em cadeias com stubs

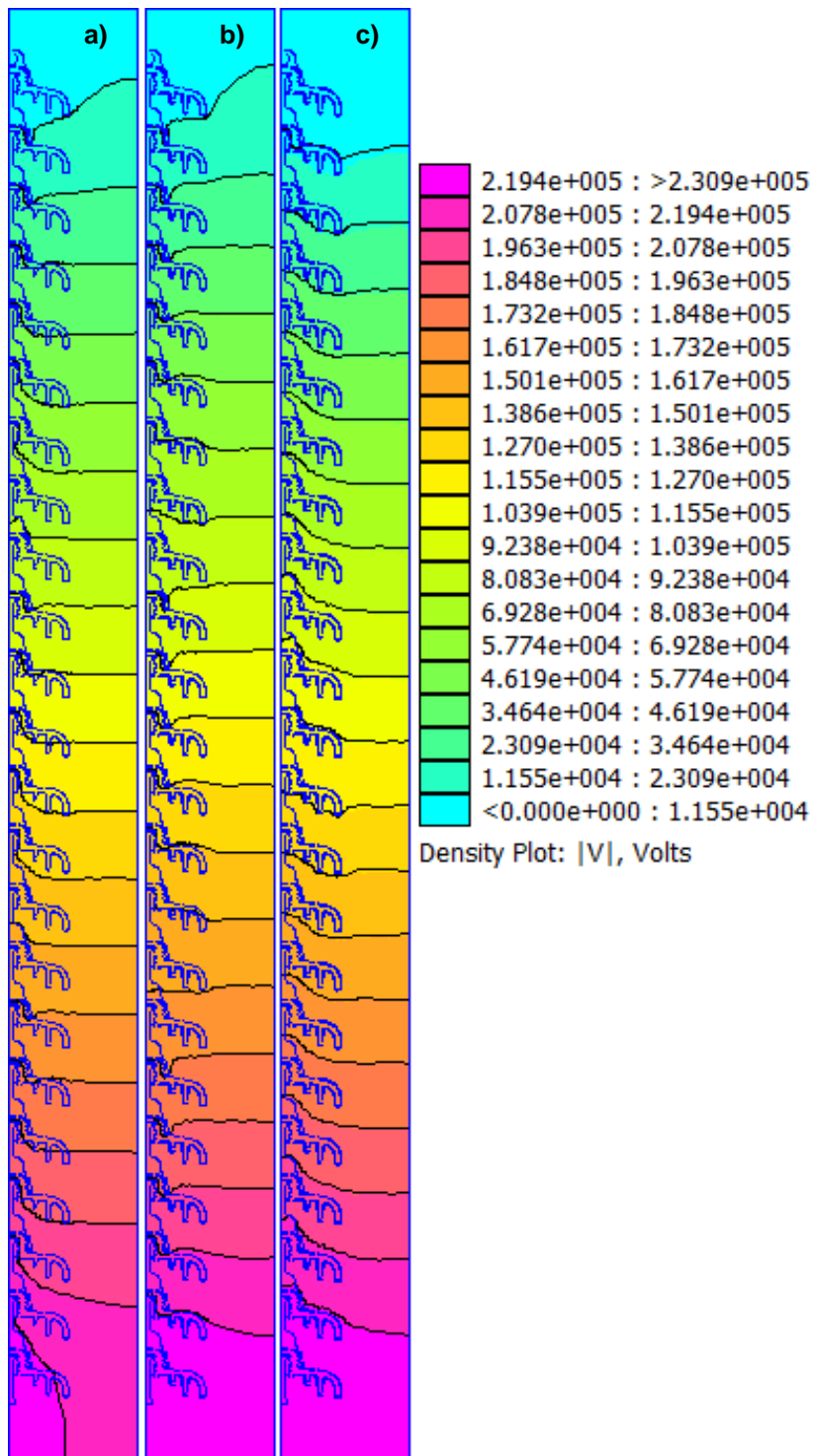


Figura C-5 - 23xU160BS: Distribuição de tensão no modelo com a) Limpa, b) Poluição parcial e c) Poluição total

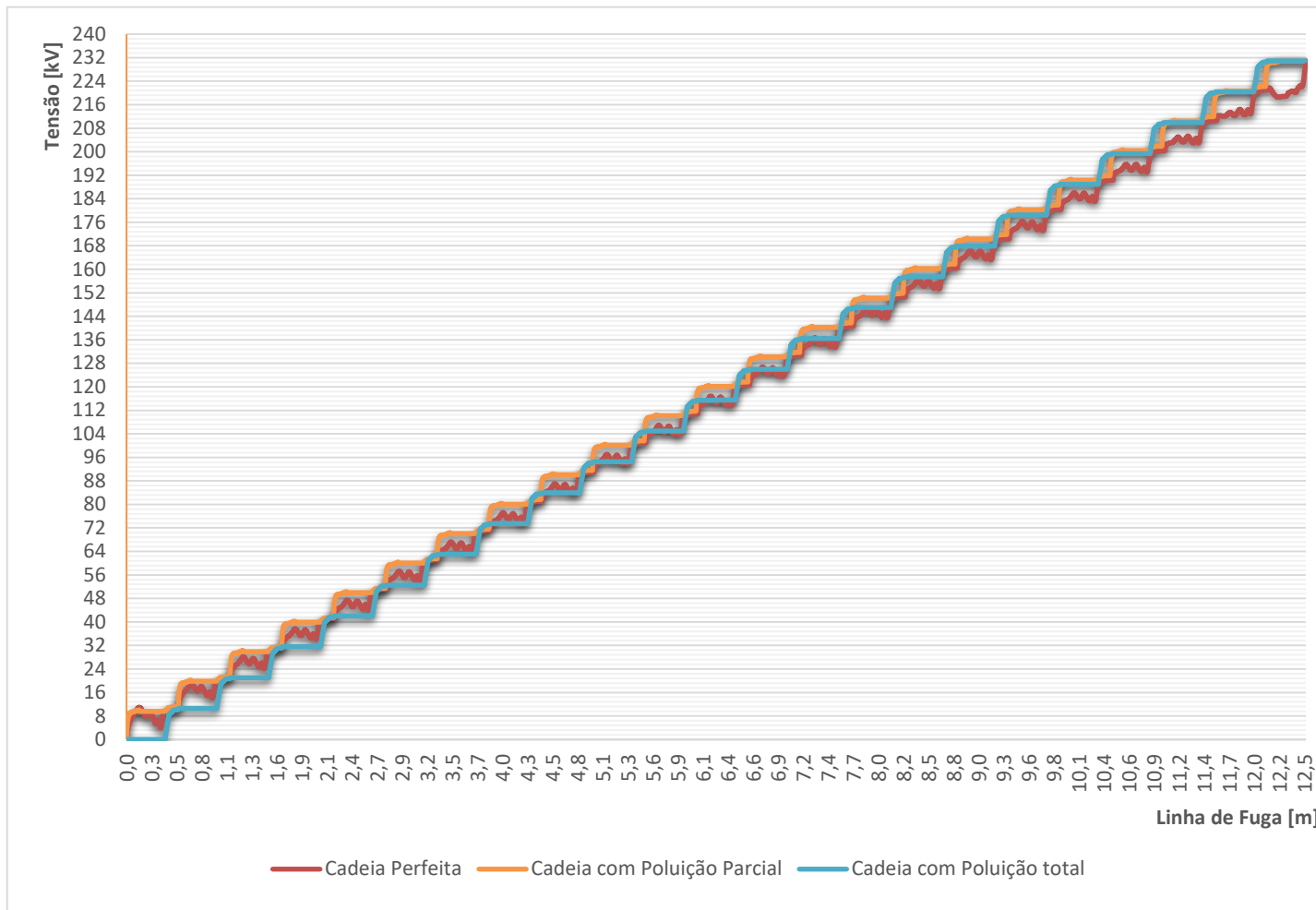


Figura C-6 - 23xU160BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga

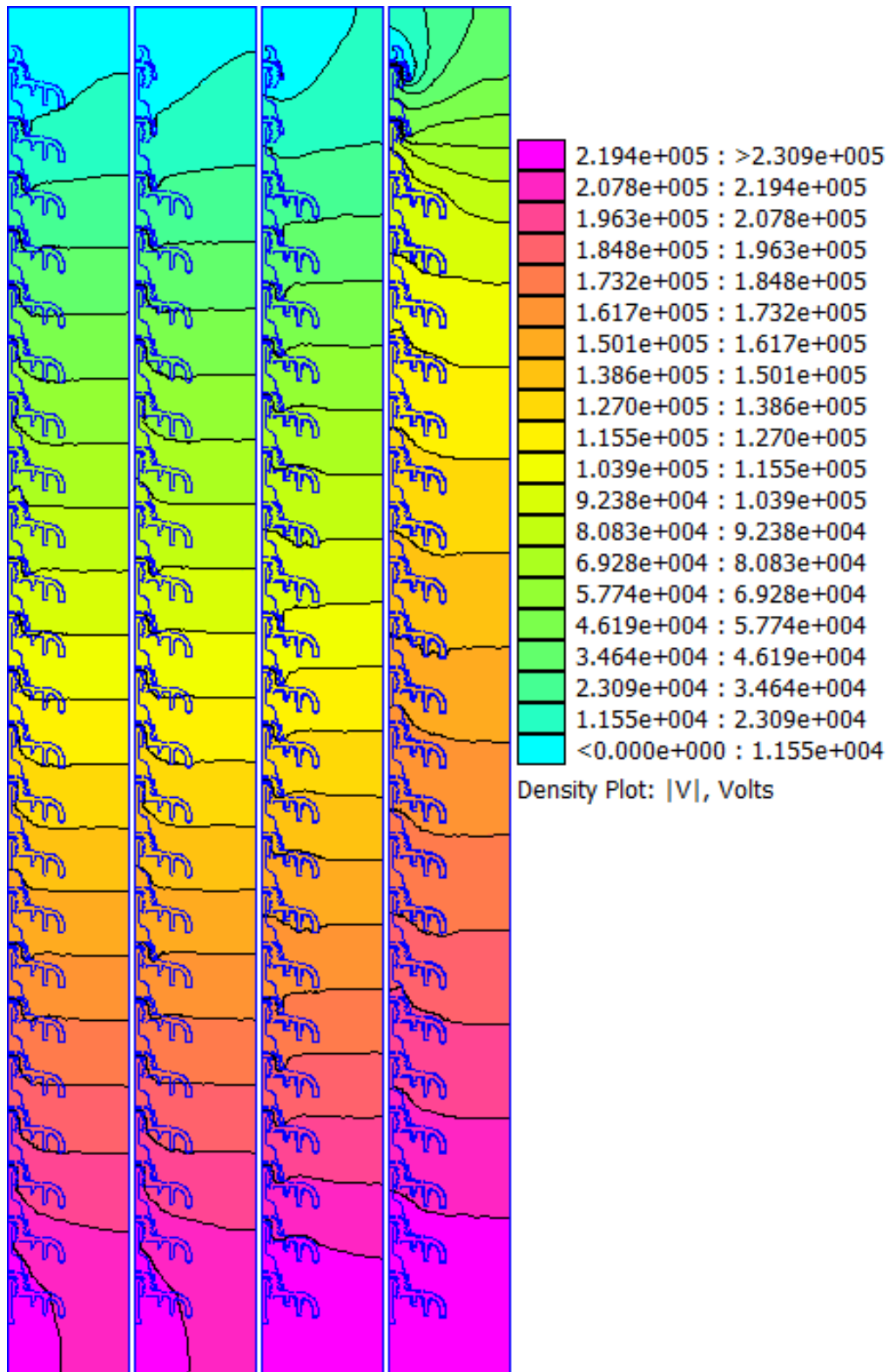


Figura C-7 - 23xU160BS: Distribuição de tensão no modelo com a) Limpa, b) Limpa com dois stubs, c) Poluição parcial com dois stubs e d) Poluição total com dois stubs

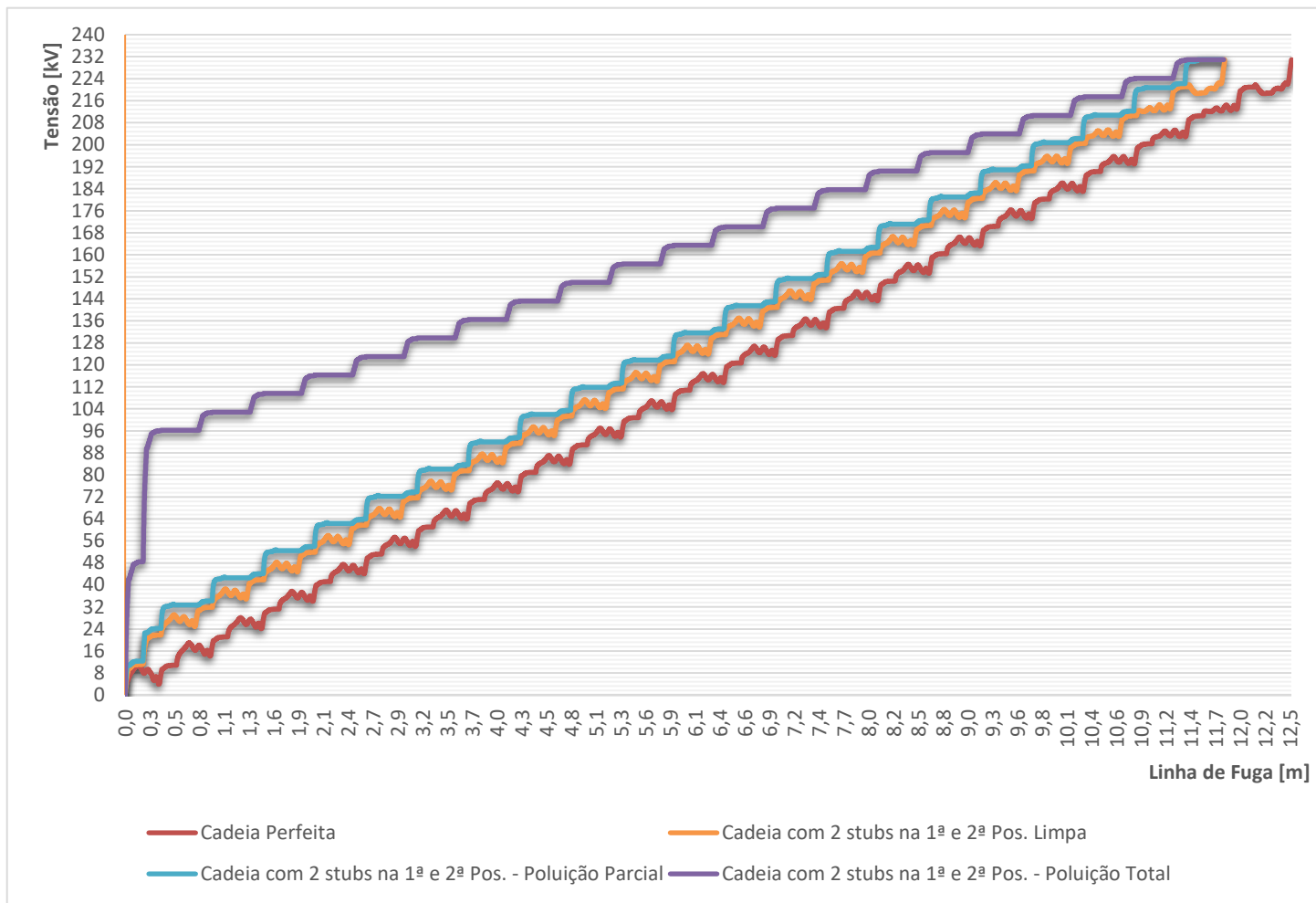


Figura C-8 - 23xU160BS: Distribuição de tensão ao longo da linha de fuga

## Bibliografia

Almeida, V. D. (2013). *Coordenação de Isolamentos em Linhas Aéreas de AT e MAT*. Dissertação de Tese de Mestrado, Porto.

Amorim, P. S. (2003). *A Rede de Transporte e a sua História Evolutiva*. Porto.

Bargallo, R. (2003). *Finite Elements for Electrical Engineering*. Universitat Politècnica de Catalunya, Electrical Engineering Department. Universitat Politècnica de Catalunya.

DECRETO-LEI nº29/2006. (s.d.). *D.R. I Série*. 33 (06-02-15) 1189-1203.

DECRETO-REGULAMENTAR nº1/92. (s.d.). *D.R I Série*. 41 (92-02-18) 960-984.

EDP Distribuição - Energia S.A. (2008). *DMA-C66-140N - Materiais para Linhas Aéreas: Elementos de Cadeias de Isoladores*. Lisboa.

George, J., Prat, S., Tartier, S., & Lodi, Z. (2013). Electrical Characteristics and Properties of a Stub (Damaged Toughened Glass Insulator). *18th International Symposium on High Voltage Engineering*, (pp. 1154 - 1159).

Ilhan, S., Ozdemir, A., Jayaram, S. H., & Cherney, E. A. (2012b). *Ac and Transient Electric Field Distributions along a 380 kV V-String Insulator*, pp. 399-403. doi:978-1-4673-0487-0/12/\$31.00

Ilhan, S., Ozdemir, A., Jayaram, S. H., & Cherney, E. A. (2012a). Simulations of Pollution and their effects on the Electrical Performance of Glass Suspension Insulators. pp. 803-806. doi:978-1-4673-1252-3/12

International Electrotechnical Commission. (1995). Insulators for overhead lines with a nominal voltage above 1000V - Ceramic or glass insulator units for A.C. systems - Characteristics of insulator units of the cap and pin type. *International Standard*. Genève, Suisse.

Kontargyri, V., Gonos, I., Stathopoulos, I., & Michaelides, A. (2003). Calculation of the electric field on an insulator string using the Finite Elements Method.

Kothari, D. P., & Nagrath, I. J. (2008). *Power System Engineering* (2ª ed.). New Delhi, India: Tata McGraw Hill.

Leite, L., & Yanaguizawa, J. (2008). Experimental Study of Electrical Breakdown Voltage of a Glass Insulator Strings with Different Numbers of Broken Units. pp. 291-294.

Luis, R. (2018). *Sebenta de Projecto de Máquinas Eléctricas*. Sebenta, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.

Meeker, D. (2018). *Finite Element Method Magnetics: Version 4.2*. User's Manual.

Moreira, J. d. (Setembro de 2005). *Aplicação do método RCM às Linhas de Muito Alta Tensão da REN*. Dissertação de Mestrado, Porto. Obtido em 10 de novembro de 2018, de <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/12339/2/Texto%20integral.pdf>

Othman, N., Piah, M. A., Adzis, Z., Ahmad, H., & Ahmad, N. (2013). Simulation of Voltage and Electric Field Distribution for Contaminated Glass Insulator. Em IEEE (Ed.), *2013 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORed)*, 16 -17 December 2013, Putrajaya, Malaysia, (pp. 116-120). doi:978-1-4799-2656-5/13/\$31.00

Othman, N., Piah, M., & Adzis, Z. (2016). *Effect of Broken Skirts on Voltage Distribution along Insulator Strings*, pp. 16.1 - 16.4. doi:10.5013/IJSSST.a.17.41.16

PORTARIA 596/2010. (s.d.). *D.R. I Série*. 147 (10-07-30) 2923-2954.

Queirós, J. P. (2013). *Análise comparativa do comportamento dielétrico dos isoladores compósitos com isoladores em materiais convencionais*. Dissertação de Tese de Mestrado, Porto.

REN – Rede Eléctrica Nacional, S.A. (2019). *Relatório da Qualidade de Serviço 2018*. Obtido em 01 de 06 de 2019, de [https://www.ren.pt/files/2019-06/2019-06-03094310\\_7a820a40-3b49-417f-a962-6c4d7f037353\\$\\$7319a1b4-3b92-4c81-98d7-fea4bfefafcd\\$\\$535d8b69-ca83-4058-9786-d60b82b45ead\\$\\$File\\$\\$pt\\$\\$1.pdf](https://www.ren.pt/files/2019-06/2019-06-03094310_7a820a40-3b49-417f-a962-6c4d7f037353$$7319a1b4-3b92-4c81-98d7-fea4bfefafcd$$535d8b69-ca83-4058-9786-d60b82b45ead$$File$$pt$$1.pdf)

REN - Rede Energéticas Nacionais, SGPS, S.A. (2018). *Caracterização das Interligações*. Lisboa. Obtido em 05 de novembro de 2018, de <http://www.mercado.ren.pt/PT/Electr/ActServ/AcessoRedes/CaractRNT//BibRelAnoInter/CIRel2017.pdf>

REN - Redes Energéticas Nacionais, SGPS, S.A. (2011). *Plano de Desenvolvimento e Investimento da Rede de Transporte de Electricidade 2012-2017 (2022)*. Lisboa. Obtido em 10 de novembro de 2018, de [http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/publicacoes/PlanoInvestimentoRNT/PDIRT%202012-2017%20\(2022\)/PDIRT%202012-2017%20\(2022\)%20-%20Julho%202011.pdf](http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/publicacoes/PlanoInvestimentoRNT/PDIRT%202012-2017%20(2022)/PDIRT%202012-2017%20(2022)%20-%20Julho%202011.pdf)

REN - Redes Energéticas Nacionais, SGPS, S.A. (2018). *Caracterização da Rede Nacional de Transporte para Efeitos de Acesso à Rede*. Lisboa. Obtido em 4 de novembro de 2018, de <http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/publicacoes/CaracterizacaoRNT/Caracteriza%C3%A7%C3%A3o%20da%20RNT%2031-12-2017.pdf>

REN - Redes Energéticas Nacionais, SGPS, SA. (2009). *Seis Décadas de Transporte de Electricidade*. Lisboa: REN - Redes Energéticas Nacionais, SGPS, SA.

REN - Redes Energéticas Nacionais, SGPS, SA. (2016). *Inspeção de Linhas Aéreas*. Divisão de Exploração. Porto: REN.

REN, Redes Energéticas Nacionais, SGPS, S.A. (2017). *Dados Técnicos 2017*. Lisboa: REN. Obtido em 4 de novembro de 2018, de

<http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/InformacaoTecnica/DadosTecnicos/REN%20Dados%20T%C3%A9cnicos%20-%202017.pdf>

Rocha, L. F. (2014). *Projeto de Linha Aérea de Alta Tensão – Estudo sobre a utilização de Cabo de Guarda*. Relatório de Projecto, Porto.

Rosário, M. C. (2011). *Coordenação de isolamento em linhas aéreas*. Dissertação de Mestrado, Lisboa.

Sediver. (2007). Sediver toughened glass suspension insulators: IEC / BS / ANSI. Obtido em 25 de 11 de 2018, de <https://www.richardsonsl.com/images/Richardson%20Projects-%20Product%20Details/Sediver/Catalogue.pdf>

Sousa, P. E. (2006). *Problemática do Isolamento nas Linhas de Muito Alta Tensão nas Zonas Poluídas*. Dissertação de Mestrado, Porto.

Távora, F. N. (s.d.). *Linhas de Transmissão de Energia Elétrica*. Leiria, Leiria.