

# VERIFICAÇÃO LABORATORIAL DA INFLUÊNCIA DA CHUVA NO COMPORTAMENTO DIELECTRICO DE ISOLADORES MT

**CARLOS MIGUEL DA MOTA REIS**

novembro de 2017

# VERIFICAÇÃO LABORATORIAL DA INFLUÊNCIA DA CHUVA NO COMPORTAMENTO DIELÉTRICO DE ISOLADORES MT

Carlos Miguel da Mota Reis



Departamento de Engenharia Eletrotécnica  
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

**2017**



Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE -  
Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: Carlos Miguel da Mota Reis, Nº 1100332, 1100332@isep.ipp.pt  
Orientação científica: Prof. Doutor Custódio João Pais Dias, cpd@isep.ipp.pt

Laboratório de Ensaios: Laboratório de Alta Tensão - Feup

Supervisão: Prof. Doutor António Machado e Moura, mmoura@fe.up.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica  
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

**2017**



Aos meus Pais, irmão e namorada Inês Rodrigues...



## *Agradecimentos*

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador Professor Custódio Pais Dias por me ter proporcionado esta oportunidade e, pela ajuda disponibilizada durante todo o período de dissertação.

Gostava de deixar um agradecimento especial ao Professor António Machado e Moura por disponibilizar o Laboratório de Alta Tensão da FEUP para a realização dos ensaios experimentais desta dissertação e, especialmente, pelo apoio e incentivo dado durante a realização da dissertação. Ao Sr. Eng. Vasques de Carvalho pela sua ajuda fundamental, pela experiência de muitos anos em Ensaio de Alta Tensão, ao nível laboratorial. Ao Tomás Sapage pela sua disponibilidade e ajuda durante os ensaios experimentais que decorreram no Laboratório de Alta Tensão.

A todos os meus amigos e colegas de curso que participaram nesta caminhada comigo.

Aos meus pais, pelo enorme esforço efetuado durante a minha formação académica e pela educação que me proporcionaram.

Por fim, um agradecimento especial à Inês Rodrigues, minha namorada, pela paciência, apoio e incentivo durante a elaboração deste trabalho.



## *Resumo*

Perante o sucessivo crescimento do consumo de energia elétrica é necessária a ampliação do sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica mundial. Em função do maior número de linhas de fornecimento, a possibilidade da interrupção torna-se cada vez maior, o que faz com que as companhias de energia elétrica adotem medidas para reduzir estas inconveniências. Um dos fatores que contribuem para a interrupção no fornecimento de energia elétrica é a falha no isolamento das linhas de transmissão, que pode ser causada pela diminuição da hidrofobicidade nos isoladores elétricos.

Anualmente surgem inúmeros casos de rotura da cadeia de isoladores cerâmicos de que resultam incidentes de máxima gravidade, que se prendem muitas vezes com o nível de poluição dos locais e à goticulação de água na superfície da cadeia de isoladores, permitindo o fácil contornamento da cadeia de isoladores, o que leva a efeitos indesejados nas instalações de utilização da energia elétrica. No âmbito desta dissertação é feito um estudo experimental aplicando uma tinta de silicone sobre a superfície do isolador para este poder vir a ter maior rigidez dielétrica e ser mais resistente ao desgaste dos agentes atmosféricos.

Na dissertação é analisado o comportamento dielétrico de isoladores sob chuva, sendo feita uma comparação do comportamento dielétrico de um isolador cerâmico do mesmo tipo com e sem o revestimento de silicone. É também elaborado um estudo aprofundado sobre os fatores que contribuem para um melhoramento do comportamento dielétrico dos isoladores.

Tendo em conta estudos e artigos da revisão bibliográfica efetuada, procede-se a estudos experimentais (em laboratório) de acordo com as especificações técnicas do produto e das normas de ensaio, que envolvem a realização de ensaios em laboratório à frequência industrial, por forma a comparar a rigidez dielétrica entre isoladores uns face aos outros. São simulados cenários e efetuada uma análise comportamental face ao agente atmosférico chuva, abordando também situações ocorrentes em operação das linhas elétricas.

*Palavras-Chave*

Comportamento Dielétrico; Isoladores Elétricos; Ensaio à Frequência Industrial, Efeito Disruptivo.

## *Abstract*

With the successive growing of the consumption of electric energy, it is necessary expand the system for the generation, transmission and distribution of electric energy worldwide. Due to the greater number of supply lines, the possibility of the interruption becomes more susceptible to fail. The electric power companies have adopted measures to reduce these inconveniences. One of the factors that contribute to the interruption in the electric power supply is the failure in the electric insulation of the transmission lines, which can be caused by the decrease of the hydrophobicity.

Annually there are numerous cases of breakage of the chain of ceramic insulators in which result incidents of maximum severity that are often linked to the high level of local pollution and the water droplet on the surface of the chain of insulators allowing the easy contouring the insulators, which leads to undesirable effects. In this context, an experimental study is done applying a silicone paint on the surface of the insulator in order to be able to have greater dielectric strength and to be more resistant to the atmospheric agents.

In this dissertation, the dielectric behaviour of rain insulators is analysed, comparing the dielectric behavior of a ceramic insulator of the same type with and without the silicone coating. An in-depth study on the factors that contribute to an improvement in the dielectric behaviour of the insulators is also elaborated.

In the light of the studies and articles bibliographic, experimental studies (in the laboratory) are carried out in accordance with the technical specifications of the product and the test standards involving laboratory tests at industrial frequencies in order to compare the dielectric strength between Insulators against each other. Scenarios are simulated and a behavior analysis is performed in relation to atmospheric agent, rain, also addressing situations that occur in the operation of the power lines.

***Keywords***

Dielectric Behaviour; Electrical Insulators; Industrial Frequency Tests, Disruptive Effect.

# Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ACRÓNIMOS</b> .....	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO.....	2
1.2.OBJETIVOS .....	3
1.3.ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO .....	4
<b>2. ISOLADORES ELÉTRICOS</b> .....	<b>5</b>
2.1.CLASSIFICAÇÃO DE ISOLADORES .....	5
2.2.TIPO DE MATERIAL ISOLANTE .....	6
2.3.TIPO DE APLICAÇÃO DO ISOLADOR.....	7
2.4.COMPORTAMENTO DO ISOLADOR .....	9
2.5.ISOLADORES “CAP AND PIN” .....	11
2.6.ISOLADORES RÍGIDOS DE PORCELANA.....	14
2.7.IMPORTÂNCIA DA ESCOLHA DOS ISOLADORES PARA A FIABILIDADE DO SISTEMA ELÉTRICO .....	15
2.8.ISOLADORES E A HIDROFOBICIDADE NO SETOR ELÉTRICO .....	16
2.9.VANTAGENS DA SILICONAGEM NA SUPERFÍCIE DO ISOLADOR .....	17
<b>3. INFLUÊNCIA DOS FATORES AMBIENTAIS</b> .....	<b>19</b>
3.1.POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA .....	19
3.2.GELO E NEVE.....	24
3.3.NEVOEIRO SALINO.....	26
3.4.PRECIPITAÇÃO .....	27
<b>4. LABORATÓRIO DE ENSAIOS</b> .....	<b>33</b>
4.1.CONSTITUIÇÃO DO LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO .....	33
4.2.EQUIPAMENTOS .....	35
<b>5. ENSAIOS ELÉTRICOS</b> .....	<b>49</b>
5.1.OBJETOS DE ESTUDO .....	49
5.2.MONTAGENS REALIZADAS.....	51
5.3.PROCEDIMENTO DE ENSAIO .....	53

5.4.MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA ENSAIOS ELÉTRICOS .....	63
5.5.VERIFICAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DOS APARELHOS DE ENSAIO .....	64
5.6.APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS .....	66
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>71</b>
6.1.CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
6.2.TRABALHOS FUTUROS.....	73
<b>REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....</b>	<b>75</b>
<b>ANEXO A. CALIBRAÇÃO DOS APARELHOS DE ENSAIO.....</b>	<b>78</b>
<b>ANEXO B. FATORES DE CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DA TENSÃO CONTORNAMENTO</b>	<b>81</b>

## *Índice de Figuras*

Figura 1 Isolador de linha cerâmico	8
Figura 2 Isolador de suporte	8
Figura 3 Esforços mecânicos a que estão sujeitos os isoladores	9
Figura 4 Constituição do isolador “Cap and Pin”	11
Figura 5 Desenhos do dielétrico “Cap and Pin” para aplicação em diferentes cenários	12
Figura 6 Distância de arco num isolador “Cap and Pin”	14
Figura 7 Isolador rígido de porcelana	15
Figura 8 Lavagem da cadeia de isoladores com recurso a helicóptero	23
Figura 9 Pormenor das pontes de gelo formadas entre as abas do isolador	25
Figura 10 Composição salina da água do mar	26
Figura 11 Classificação do índice SPI para períodos secos e períodos chuvosos e correspondente probabilidade de ocorrência	29
Figura 12 Classe de SPI para Portugal continental Nov 2016	30
Figura 13 Precipitação em Portugal continental 2014	31
Figura 14 Precipitação em Portugal Continental para o ano de 2015	31
Figura 15 Planta em Autocad da Laboratório de Alta Tensão FEUP	34
Figura 16 Espirómetro de esferas presente no LAT	36
Figura 17 Representação gráfica do espirómetro de esferas	37
Figura 18 Esquema de um gerador de impulso de Marx	39

Figura 19 Gerador de impulso presente no LAT	41
Figura 20 Forma de onda para impulsos atmosféricos	42
Figura 21 Esquema unifilar do sistema de ensaio à frequência industrial	44
Figura 22 Gerador à frequência industrial e divisor de tensão	46
Figura 23 Controlador do sistema de ensaio à frequência industrial	46
Figura 24 LCR Bridge para medição da resistividade da água	47
Figura 25 Isolador cerâmico H2 307 normalizado (esquerda) e com revestimento de tinta de silicone com fibras (direita)	50
Figura 26 Isolador cerâmico R 2115 C normalizado (direita) e revestido com tinta de silicone (esquerda)	51
Figura 27 Montagem de ensaio de um isolador de suporte	53
Figura 28 Gráfico de correlação do fator k com a massa volúmica do ar atmosférico	56
Figura 29 Valores dos coeficientes “m” e “w” em função do factor g	57
Figura 30 Humidade absoluta em função da temperatura e humidade relativa	58
Figura 31 Sistema de chuva artificial para ensaios elétricos	59
Figura 32 Sistema de armazenamento de água para o abastecimento do sistema de chuva	60
Figura 33 Cortinas de proteção para ensaios elétricos sob chuva	61
Figura 34 Representação gráfica do método de stress progressivo	64
Figura 35 Comparação gráfica da tensão de contornamento num ensaio a seco de um isolador R2115C cerâmico e um isolador R2115 C coberto com tinta de silicone	67
Figura 36 Comparação gráfica da tensão de contornamento num ensaio sob chuva de um isolador R2115C cerâmico e um isolador R2115 C coberto com tinta de silicone	67

Figura 37 Hidrofobicidade do isolador cerâmico pintado com tinta de silicone 68

Figura 38 Comparação gráfica da tensão de contornamento num ensaio a seco de um isolador H2 307 cerâmico e um isolador H2 307 coberto com uma tinta fibrada de silicone 69

Figura 39 Comparação gráfica da tensão de contornamento num ensaio sob chuva de um isolador H2 307 cerâmico e um isolador H2 307 coberto com uma tinta fibrada de silicone 70



## *Índice de Tabelas*

Tabela 1 Vantagens e Limitações dos diferentes tipos de isoladores	16
Tabela 2 Solubilidade e dissolução dos sais presentes na atmosfera	21
Tabela 3 Níveis de poluição	22
Tabela 4 Características elétricas e mecânicas do isolador H2 307	50
Tabela 5 Características elétricas e mecânicas do isolador R2115 C	51
Tabela 6 Condições standard para ensaios elétricos sob chuva	61
Tabela 7 Erro da tensão de escorvamento mediante as distâncias entre esferas do espirómetro	66
Tabela 8 Erro associado à tensão medida para a distância entre esferas de 4,5 cm	78
Tabela 9 Erro associado à tensão medida para a distância entre esferas de 6,5 cm	79
Tabela 10 Erro associado à tensão medida para a distância entre esferas de 11 cm	80
Tabela 11 Fatores de correção atmosférica da tensão contornamento do Isolador R2115C cerâmico, a seco	81
Tabela 12 Fatores de correção atmosférica da tensão contornamento do Isolador R2115C siliconagem, a seco	82
Tabela 13 Fatores de correção atmosférica da tensão contornamento do Isolador R2115C cerâmico, sob chuva	83
Tabela 14 Fatores de correção atmosférica da tensão contornamento do Isolador R2115C Siliconagem, sob chuva	84
Tabela 15 Fatores de correção atmosférica da tensão contornamento do Isolador H2 307 cerâmico, a seco	85

Tabela 16 Fatores de correção atmosférica da tensão contornamento do Isolador H2 307 Siliconagem, a seco	86
Tabela 17 Fatores de correção atmosférica da tensão contornamento do Isolador H2 307 cerâmico, sob chuva	87
Tabela 18 Fatores de correção atmosférica da tensão contornamento do Isolador H2 307 Siliconagem, sob chuva	88

## *Acrónimos*

LAT – Laboratório de Alta Tensão

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

IEC – International Electrotechnical Commission

SPI – Standardized Precipitation Index

DIAS – Digital Impulse Analysis System



# 1. INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica são frequentemente sujeitas a sobretensões e descargas atmosféricas que contribuem para a interrupção no fornecimento de energia elétrica.

Muitas vezes a falha no isolamento das linhas de transmissão pode ser causada pela poluição presente no local das linhas elétricas, ou pelas condições atmosféricas nomeadamente o nevoeiro salino, o gelo, a neve e a chuva.

Surgem anualmente inúmeros incidentes com as cadeias de isoladores cerâmicos da qual resultam ocorrências graves que se prendem muitas vezes com as condições do próprio local onde a linha de energia está instalada, permitindo o fácil contornamento da cadeia de isoladores, o que leva a efeitos indesejados nas instalações de utilização da energia elétrica.

O conhecimento das características dos materiais é fundamental para efetuar dimensionamentos em concordância com as condições esperadas em serviço. A determinação da rigidez dielétrica dos isoladores, através de ensaios elétricos em ambiente laboratorial, permite elucidar sobre o comportamento dos mesmos em condições representativas das enfrentadas em serviço. As experiências elétricas a elaborar pretendem comprovar que a capacidade dielétrica dos isoladores cerâmicos é fortemente afetada pela condensação de água na sua superfície. Como tal, criar hidrofobia na superfície dos isoladores, com uma tinta de silicone, é uma mais-valia para a fiabilidade do sistema elétrico.

Espera-se que o comportamento do isolador cerâmico com revestimento a tinta de silicone possibilite um comportamento extraordinário quanto à aderência da água, tornando a superfície do isolador altamente hidrofóbica e com excelente atuação face à poluição, logo mais resistente a contornamento em situações de chuva.

## **1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO**

Existe uma tendência natural que, muitas vezes, leva os técnicos do setor elétrico de energia a não priorizarem a importância que os isoladores elétricos têm na performance dos sistemas de energia. Afinal de contas, quando falamos de isoladores estes são usados nas diversas instalações do sistema elétrico, tais como linhas de transporte e distribuição de energia, subestações, centrais de produção, entre outras. Os isoladores elétricos são componentes cujos processos de engenharia, produção, testes e aplicação em campo são muito mais complexos do que se pode julgar à primeira vista. Os isoladores atuam como suportes mecânicos e, ao mesmo tempo, atuam no isolamento das principais estruturas e equipamentos elétricos de qualquer instalação, muitas vezes sujeitos a cargas mecânicas. Em paralelo, devem ser capazes de suportar continuamente os campos elétricos aos quais estão expostos e suas perturbações pré-definidas. Da mesma forma, devem suportar distúrbios meteorológicos (chuvas, gelo, nevoeiro, granizo), dentro de seus limites de projeto, ataques por contaminantes (sal, maresia, poluição) e, ainda, estão expostos a vandalismo.

As demandas e o nível de isolamento dos sistemas elétricos estão em constante desenvolvimento e, provavelmente, continuarão a mudar. Com isto, surgem no mercado novas soluções e novos materiais condutores e isolantes que são fruto da investigação da indústria do setor elétrico com vista ao melhoramento da confiabilidade das linhas de transporte de energia. Por isso há a necessidade de atualizar regularmente os vários parâmetros de projeto, implementando as novas soluções encontradas pela indústria nas novas redes de energia ou nas redes já existentes, para que os equipamentos instalados tenham um bom nível de confiabilidade na zona geográfica onde estão inseridos, sendo estes sujeitos a perturbações de sistema ou de ambiente, que por vezes não foram

expectadas na folha de projeto da linha de energia e que podem incidir numa interrupção do serviço de transporte ou distribuição de energia.

O clima está em constante mudança e a industrialização está cada vez a poluir mais. A indústria, em parceria com as grandes concessionárias de energia e alguns grandes fabricantes de equipamentos, têm tentado responder a estes desafios através do desenvolvimento de processos de melhoria na fabricação dos dielétricos e na busca de novas soluções. E, para atender a estas aplicações que exijam diferentes graus de suportabilidade a diferentes características (chuva, contaminação), vários fabricantes têm desenvolvido novos produtos para aplicação em redes de energia como isoladores híbridos, isoladores recobertos com camadas de silicone, isoladores de composto polimérico e outras variações. No entanto, os isoladores de porcelana ainda são os mais usados atualmente e têm um historial de mais de 100 anos com resultados e durabilidade comprovadas. Certamente, a confiabilidade de todos os sistemas elétricos passa pela dinâmica e correta aplicação dos isoladores, dado que o seu valor não pode ser menorizado só porque são robustos, parecem simples e representam muito pouco a nível monetário quando comparado ao valor total do investimento de uma linha de transporte ou distribuição de energia.

## **1.2. OBJETIVOS**

O objetivo deste projeto é dotar o Laboratório da Alta Tensão da FEUP com um sistema de ensaio de equipamentos elétricos sob chuva, cumprindo estritamente os requisitos normativos nacionais e internacionais para ensaios de alta tensão de aparelhagem elétrica. Para isso, é necessário criar e montar uma infraestrutura para o procedimento desses ensaios.

Além disso, pretende-se fazer um estudo e caracterização dos isoladores cerâmicos na qual são realizados ensaios experimentais com isoladores sob chuva e verificar as vantagens técnicas da implementação de isoladores de superfície pintada a tinta de silicone, nos sistemas elétricos, ao nível da sua rigidez dielétrica.

### **1.3. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO**

A organização do trabalho foi planejada com o intuito de responder aos objetivos propostos e segue a estrutura descrita nos próximos parágrafos. Excluindo o capítulo inicial referente à introdução, o trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos.

O Capítulo 2 diz respeito à revisão bibliográfica, sendo descritos os diversos tipos de isoladores existentes, a sua constituição e a importância dos isoladores na fiabilidade dos sistemas elétricos.

Por sua vez, o Capítulo 3 apresenta uma visão geral das influências dos fatores atmosféricos no comportamento dielétrico dos isoladores cerâmicos, nomeadamente a poluição atmosférica, e as condições atmosféricas (chuva gelo, neve e nevoeiro salino)

No Capítulo 4 é feita uma descrição sucinta da constituição do laboratório de ensaios onde foram realizados os ensaios experimentais, os equipamentos que constituem o laboratório e o seu princípio de funcionamento.

No Capítulo 5 são apresentados os objetos de estudo, montagens realizadas, procedimentos operativos e normativos e os resultados obtidos com a aplicação do método de ensaio escolhido e discutidos os resultados.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. ISOLADORES ELÉTRICOS

Um isolador é um sistema constituído por vários componentes, compreendendo o dielétrico e as ferragens terminais, bem como os elementos de ligação, que ajudam a ligar o dielétrico às terminações. Usualmente os isoladores são identificados pelo tipo de dielétrico de que são compostos. Os principais tipos de classes de dielétrico são: **porcelana, vidro e polímeros**. Estes materiais originam as nomenclaturas de isoladores de porcelana ou cerâmicos, isoladores de vidro e isoladores poliméricos. Os isoladores poliméricos são também conhecidos por isoladores compósitos. Os isoladores com maior uso neste momento são os de porcelana e os de vidro.

### 2.1. CLASSIFICAÇÃO DE ISOLADORES

Os isoladores são estruturados a partir de metais e materiais isolantes. Existem diferentes formas de classificá-los. Três parâmetros principais são normalmente considerados:

- Tipo de Material Isolante
  - Cerâmica (vidro e porcelana)
  - Polimérico (compósito)
- Tipo de Aplicação

- Centrais, subestações e postos de transformação de energia
- Suporte de Linhas de transporte e distribuição de energia
- Comportamento do Isolador
  - Mecânico
  - Elétrico

## **2.2. TIPO DE MATERIAL ISOLANTE**

Há dois materiais básicos para sistemas de isoladores de cerâmica (porcelana e vidro) e polímeros (isoladores compósitos).

Os materiais cerâmicos contam com fortes ligações polares químicas entre silício e oxigênio, obtendo-se materiais estáveis a alta temperatura, fortes, e altamente resistentes. Este tipo de composto apresenta grande solidez, robustez à compressão, resistência a ataques químicos, e geralmente são quebradiços. Possuem grande energia superficial devido à quantidade de minerais ionizados, sendo esses químicos compensados por um valor alto da energia livre de superfície, o que faz com que as superfícies de cerâmica possam ser facilmente humedecidas e, como consequência, facilmente poluídas em ambientes ao ar livre. (Queirós, 2013)

Tal como os isoladores cerâmicos, os polímeros são compostos por átomos com quatro ligações de valência, sobretudo silício e carbono, capazes de formar estruturas longas com diferentes propriedades. Estes tipos de materiais podem decompor-se a temperaturas de centenas de graus centígrados (300-500°C) devido às ligações de baixa energia que estabelecem entre si. As desvantagens, de ligações de baixa energia que estabelecem entre si e decomposição a baixa temperatura, são compensadas por uma estabilidade energética superficial permitindo um comportamento extraordinário quanto à aderência da água, tornando-a altamente hidrofóbica e com excelente desempenho face à poluição, logo, mais resistente a contornamento em situações de chuva. Esta propriedade será tanto maior, quanto maior for a difusão das cadeias de baixo peso molecular. Neste ponto destacam-se as cadeias formadas por silicone e oxigênio, muito usado como polímero base. (Queirós, 2013)

A ausência de uma estrutura cristalina permite às cadeias de polímeros alguma liberdade de movimento ao longo de todo o volume. Ainda que possa ocorrer uma perda temporária da hidrofobia por influência de condições severas, a mobilidade das cadeias permite alcançar novamente esse comportamento após um período suficiente com menores solicitações físicas, nomeadamente de descargas elétricas. (Queirós, 2013)

### **2.3. TIPO DE APLICAÇÃO DO ISOLADOR**

Os isoladores de linha estão sujeitos às mais diversas solicitações, entre as quais tensões mecânicas, elétricas e ambientais. Normalmente estas atuam todas ao mesmo tempo. A natureza e amplitude das tensões varia significativamente e depende dos pormenores de desenho, localização e aplicação dos isoladores. No caso dos isoladores de suspensão e de amarração, estes encontram uma carga que depende do peso e tensão do condutor, podendo o vento, chuva e gelo imporem cargas adicionais. Isoladores rígidos têm uma carga mecânica dada pelo peso do objeto colocado por cima. Adicionalmente podem aparecer cargas transitórias como seja: torção, vibrações, movimentos, impactos ou vandalismo. (Sousa, 2006)

As tensões elétricas incluem o regime estacionário e as tensões impulsivas são geradas por descargas atmosféricas ou por manobras. Quando há contornamento, o isolador é sujeito a uma grande corrente sob a forma de arco denominada por arco de potência. Este só é extinguido após os dispositivos de proteção isolarem o defeito. (Sousa, 2006)

As condições climatéricas e ambientais variam muito de zona para zona e as propriedades de isolamento de todos os materiais sofrem com estas alterações, porque com o aumento de temperatura aumenta também a condutividade. Para os isoladores compósitos, que são materiais orgânicos, a radiação ultravioleta vinda do sol pode quebrar certas ligações químicas resultando na degradação da superfície. Na presença de nevoeiro, chuva, neve ou gelo, a resistência de isolamento é bastante mais baixa em comparação com o estado seco. Com a existência de contaminação, a resistência de isolamento é drasticamente reduzida. Com o aumento de altitude as propriedades de isolamento são afetadas, porque diminuindo a densidade do ar diminui também o valor da rigidez dielétrica.



**Figura 1 Isolador de linha cerâmico [4]**

Nas centrais, subestações e postos de transformação aplicam-se os denominados isoladores de suporte, os quais se podem revestir de formas variadas conforme os fins a que se destinam. Tal como o seu nome indica, o isolador de suporte tem como missão suportar os condutores dos barramentos. Apresentam diversas formas, conforme a sua aplicação específica e a tensão de serviço da instalação. (EDP, 2007) Na parte superior dos isoladores de apoio, isto é, na respetiva cabeça, são aplicadas peças metálicas fixadas aos isoladores por meio de substâncias apropriadas e que se destinam à montagem dos condutores. Quer em espaços interiores ou exteriores é corrente a utilização de isoladores de porcelana ou de vidro destacando-se o facto de estes terem diferentes formatos dependendo do local de aplicação, visto que os isoladores exteriores são dotados de saias assimétricas destinadas a aumentar o comprimento da linha de fuga, procurando assim conseguir um melhor comportamento dielétrico face às condições ambientais. (Aluno FEUP, 2008)



**Figura 2 Isolador de suporte [6]**

## 2.4. COMPORTAMENTO DO ISOLADOR

### 2.4.1. MECÂNICO

Todos os isoladores têm uma função mecânica de suporte das linhas e fixação às estruturas de apoio entre os condutores e as partes ligadas à terra.

Dependendo do tipo de aplicação que desempenham estão sujeitos a esforços mecânicos de tração, compressão, flexão e torção ou até, por vezes, mais que um esforço em simultâneo.



**Figura 3 Esforços mecânicos a que estão sujeitos os isoladores [22]**

Para cada aplicação, uma série de discos ou um isolador rígido será selecionado de acordo com a natureza das cargas mecânicas. As denominadas cadeias de isoladores são constituídas por vários isoladores de campânula de porcelana ou vidro, interligados por componentes metálicos e pelo material ligante que as justapõe. Os isoladores encontram-se fixados na armação do apoio, garantindo por si só as condições de isolamento do condutor. São normalmente utilizadas em apoios de alinhamento em que os comprimentos dos vãos adjacentes não sejam muito grandes, nem a diferença entre eles muito significativa. Os isoladores em cadeia são fixados de forma articulada à armação do apoio, garantindo, por si só, ou associados a outros idênticos em forma de cadeia, as condições de isolamento do condutor. As cadeias de isoladores são constituídas por vários isoladores de campânula de porcelana, vidro ou resina artificial, por componentes metálicos e pelo material ligante que as justapõe podendo constituir cadeias de amarração ou cadeias de suspensão. (Silva, 2011)

As cadeias de suspensão correspondem a cadeias verticais ou em V, onde os condutores das linhas se encontram suspensos. As cadeias de amarração correspondem a cadeias horizontais usadas em postes de amarração, de ângulo ou fim de linha.

As cadeias de amarração devem ser usadas nas situações seguintes:

- No início e fim de linhas;
- Aquando da existência de ângulos não reduzidos.

Relativamente às cadeias de suspensão, estas podem ser usadas em:

- Apoios de alinhamento, desde que a armação seja em galhardete;
- Apoios em que a armação seja em triângulo.

O comportamento mecânico dos isoladores é determinado por todas as componentes que constituem o isolador, incluindo o dielétrico, as terminações e as ligações entre o dielétrico e as terminações metálicas. A falha mecânica dos isoladores provoca a queda dos condutores, o que não é de todo aceitável e provoca uma interrupção prolongada com possíveis danos agravados e avarias. (Silva, 2011)

#### **2.4.2. ELÉTRICO**

O comportamento elétrico dos isoladores é influenciado unicamente pelo dielétrico dos isoladores. Quando um material isolante separa dois condutores sob influência de uma diferença de potencial, aparecem correntes de fuga. A resistência de isolamento corresponde à resistência que o isolante oferece à passagem dessa corrente de fuga, a qual pode circular através da massa isolante ou pela sua superfície. À primeira corresponde a resistência de isolamento volumétrica e à segunda a resistência de isolamento superficial. O comportamento da massa isolante é determinado por defeitos sob a forma de bolhas e impurezas. Estes defeitos causam a concentração de zonas com grande stress elétrico, o que pode levar à formação de defeitos permanentes dentro do dielétrico. Um parâmetro que indica o estado do dielétrico é a resistividade volúmica (interior) e apresenta valores superiores a  $10^{10} \Omega\text{m}$ . (Sousa, 2006)

O comportamento da superfície é função dos depósitos de poluição e humidade superficiais. Os valores da resistividade superficial a seco são relativamente idênticos aos da resistividade volúmica. Quando há presença de humidade, os valores da resistividade superficial são mais baixos do que quando a seco, e mais baixos ainda no caso de existir contaminantes iónicos. Para materiais dielétricos de boa qualidade, isto é, sem presença de bolhas ou impurezas, a perfuração é muito mais difícil de acontecer do que o

contornamento. A ocorrência de contornamento ou de perfuração do isolador dependerá da amplitude e da duração do stress elétrico aplicado. (Sousa, 2006)

## 2.5. ISOLADORES “CAP AND PIN”

Os isoladores “Cap and Pin” ou de Campânula como são vulgarmente denominados têm diferentes desenhos e funcionalidades perante o tipo de aplicação predestinada. Caracteriza-se por o acoplamento de várias unidades em série distribuindo a força a que estão sujeitos pelos dielétricos formando uma cadeia de isoladores.



**Figura 4** Constituição do isolador “*Cap and Pin*”

A vantagem deste tipo de isolador é que torna possível a formação de cadeias de isoladores com diferentes tensões de degradação, para uso com diferentes tensões de linha, podendo a cadeia ser construída usando diferentes números de unidades. Além disso, se uma das unidades isolantes quebrar pode ser substituída sem descartar a cadeia completa.

Cada unidade é constituída por um dielétrico com uma campânula e pino de metal cimentado para lados opostos. O dielétrico sendo constituído por porcelana ou vidro, não condutor, dificulta a circulação de correntes de fuga ao longo da sua superfície e assegura a transferência de carga mecânica a que está sujeito pelo espigão ao distribuí-la pelo seu volume. O espigão fixado por cimentação na saia do dielétrico faz a ligação entre a campânula e o material dielétrico. A campânula abraça a parte superior do material dielétrico através de uma ferragem metálica cimentada na superfície. A qualidade da

ligação da campânula e do espigão ao dielétrico deve ser o mais perfeita possível de forma a garantir a resistência mecânica da cadeia. (Queirós, 2013)

A interligação entre as peças é feita por cimento do tipo Portland, onde, por vezes, são colados materiais rugosos no material dielétrico para garantir maior fixação entre o dielétrico e o cimento. (Queirós, 2013)

Na figura 5 estão representados vários tipos de desenhos de isoladores, para diferentes zonas geográficas.



**Figura 5** Desenhos do dielétrico “Cap and Pin” para aplicação em diferentes cenários [5]

Mediante o local geográfico e tipo de trabalho a que o isolador vai ser submetido, pode-se jogar com algumas variáveis. O tipo de desenho do dielétrico é variável perante diversas situações, como presença acentuada de poluição ou nevoeiro. O aumento do diâmetro da saia do dielétrico permite obter uma maior linha de fuga para cada unidade e, por sua vez, o aumento do diâmetro do espigão leva a maiores capacidades mecânicas por unidade. (Queirós, 2013)

Este tipo de configuração de isoladores permite que a sua aplicação em sistemas de amarração e de suspensão de condutores apresentando as seguintes vantagens:

- Flexibilidade do tamanho da cadeia de isoladores, sendo aplicável para diferentes tipos de tensão.
- Permite a substituição de parte da cadeia em caso de quebra ou defeito.
- Grande resistência mecânica de cada unidade.

O contornamento originado por descargas impulsivas é determinado pela menor distância em ar entre os elétrodos do isolador (distância de arco, representada na figura 6). Neste tipo de configuração quantos mais discos adicionados maior a distância de arco. Em condições de contaminação o contornamento depende da linha de fuga.

Se o material dielétrico não é alterado durante o serviço, as características elétricas, como a tensão suportável a seco à frequência industrial ou tensão de contornamento, por descarga atmosférica ou por onda de manobra, são definidas pela distância de arco. A forma e o desenho dos isoladores (linha de fuga) são importantes para o comportamento do isolador.

O aumento da linha de fuga é obtido pelo desenho mais alongado das saias do isolador e das suas reentrâncias inferiores (nervuras), bem como pela colocação de várias unidades formando assim as cadeias de isoladores. (Queirós, 2013)

O número de isoladores necessários numa cadeia é determinado pelo nível de tensão e pelo comprimento da linha de fuga necessário para que o isolamento seja eficaz.



**Figura 6** Distância de arco num isolador “*Cap and Pin*” [5]

A linha de fuga corresponde à distância que a corrente teria de percorrer pela superfície do isolador, entre as duas extremidades metálicas deste, correspondendo, por isso, à distância de isolamento para uma frequência de 50Hz. A implementação de hastes de descarga nos extremos da cadeia de isoladores tem por função a uniformização do campo elétrico ao longo da cadeia de isoladores e confere à cadeia uma proteção contra os efeitos do próprio arco facilitando o escoamento da descarga elétrica para a terra pelos apoios, pois não existe uma ligação elétrica dos cabos aos apoios, como acontece nos cabos de guarda onde ocorre um bom escoamento para a terra destas correntes de defeito.

## **2.6. ISOLADORES RÍGIDOS DE PORCELANA**

A porcelana é, sem dúvida, o tipo de material dielétrico mais usado para os diversos cenários nos sistemas elétricos. A maturidade da tecnologia adquirida após várias décadas de experiência técnica, o conhecimento da sua atuação e a resistência a ataques químicos por partes dos elementos naturais e de origem humana levam a um domínio significativo do mercado dos isoladores. No entanto, em ambientes com poluição elevada, a superfície é facilmente coberta por contaminantes que diminuem a resistividade superficial do isolador.

A porcelana é constituída por materiais inorgânicos que são conhecidos por terem uma alta resistência ao aquecimento provocado pelas descargas elétricas em serviço, como é o caso do efeito coroa e dos arcos. A sua grande estabilidade está relacionada com as fortes cadeias electrostáticas entre os vários átomos do material.

Estes isoladores, sendo feitos de materiais densos, são pesados e frágeis. Mas apesar disso são isoladores que têm um elevado período de vida útil e conferem uma grande fiabilidade ao sistema em que estão inseridos.



**Figura 7 Isolador rígido de porcelana [15]**

## **2.7. IMPORTÂNCIA DA ESCOLHA DOS ISOLADORES PARA A FIABILIDADE DO SISTEMA ELÉTRICO**

As linhas de transmissão são normalmente construídas em zonas de difícil acesso, pelo que é aconselhável que, depois de construída, a linha funcione de uma forma satisfatória, minimizando todo o tipo de manutenção para o tempo de vida esperado. Geralmente, um tempo de vida que vá para além dos 30 anos é considerado aceitável. Verifica-se que com alguns tipos de porcelana e vidro a expectativa ultrapassa os 30 anos. Contudo, este fato não se aplica a todas as porcelanas e vidros visto que, é importante ter em atenção a qualidade da matéria-prima, o processamento e o controlo de qualidade. Na Tabela 1 é apresentado um resumo das principais vantagens e limitações dos diferentes tipos de isoladores existentes. (Queirós, 2013)

Mediante a zona geográfica onde o isolador ou cadeia de isoladores vai ser instalada deve-se ter em conta estes factos acima referidos porque mais tarde, no período de manutenção do sistema isto vai fazer toda a diferença quer, a nível económico, quer a nível da fiabilidade do sistema.

**Tabela 1 Vantagens e Limitações dos diferentes tipos de isoladores [19]**

Material	Vantagens	Limitações
Porcelana	Longo histórico de uso; Performance conhecida; Fácil intercambiabilidade; Redução com as desapropriações em isoladores pilares;	Peso; Defeitos ocultos; Susceptível ao vandalismo; Técnicas de detecção de falhas nas linhas ainda não são 100% confiáveis.
Vidro	Longo histórico de uso; Desempenho conhecido; Fácil Intercambiabilidade; Defeitos facilmente visualizáveis.	Percepção negativa quanto à fragilidade; Peso; Atrativo para o vandalismo.
Polimérico	Redução com as desapropriações em isoladores pilares; Bom desempenho sob contaminação; Leveza; Facilidade de instalação; Pouco atrativo ao vandalismo.	Fratura frágil do núcleo; Efeito das intempéries no processo de envelhecimento; Menor intercambiabilidade; Defeitos ocultos; Técnicas de detecção de falhas em linhas energizadas ainda não totalmente desenvolvidas.

## **2.8. ISOLADORES E A HIDROFOBICIDADE NO SETOR ELÉTRICO**

Um dos fatores que contribuem para a interrupção no fornecimento de energia elétrica é a falha no isolamento das linhas de transmissão, que pode ser causada pela diminuição da hidrofobicidade nos isoladores elétricos. A hidrofobicidade é definida como repulsão de um “filme” de água sobre uma superfície. Quando uma superfície hidrofóbica é molhada, a água tende a formar gotas discretas, não se espalhando pela superfície. Quando uma superfície hidrofílica é molhada, a água não é repelida por ela sendo formado um filme que a recobre. No caso de um dispositivo elétrico, deseja-se uma superfície hidrofóbica, para

que a água não seja um caminho de baixa resistência elétrica que provoque a ocorrência de descargas disruptivas. A hidrofobicidade dos polímeros confere aos isoladores maiores níveis de suportabilidade. Assim, podem ser produzidos dispositivos mais compactos e mais baratos, ao contrário de isolantes confeccionados com materiais hidrofílicos, como vidro ou porcelana. Desta forma, os polímeros têm sido a solução de maior interesse em isoladores elétricos de alta tensão para ambientes externos, nomeadamente em ambientes com elevado grau de poluição. Apesar destas vantagens, os materiais poliméricos são suscetíveis ao envelhecimento causado pelas influências climáticas, ao contrário do vidro e da porcelana. Ainda que os isoladores apresentem superfície hidrofóbica, com o decorrer do tempo esta propriedade altera-se parcialmente, ou totalmente. Assim, os isoladores são projetados para aplicações em casos extremos. Isso mostra que as vantagens do uso de isoladores poliméricos, ao contrário dos de vidro e porcelana, ainda não estão bem exploradas. (Thomazini, 2009)

Pode-se dizer que o envelhecimento em isoladores elétricos causa problemas operacionais em subestações e linhas de energia que operam em altas tensões. Pelo aspeto económico é necessário que se mantenha um sistema operando sem interrupções, pois com o crescimento do sistema elétrico torna-se mais vulnerável a falhas. No caso específico de linhas de transmissão, a severidade das condições de sobretensões a que são submetidas em serviço é intensificada por fatores externos como chuva, nevoeiro, poeira, maresia, e isso pode provocar a interrupção do fornecimento de energia elétrica. O conjunto destes fatores, associado à redução dos níveis de hidrofobicidade, causam o aumento do risco de ocorrências de interrupção no abastecimento de energia pela rutura do isolamento. Assim, uma técnica eficiente capaz de avaliar a hidrofobicidade nestes isoladores deve ser utilizada para investigar ou prever estas ocorrências. (Thomazini, 2009)

## **2.9. VANTAGENS DA SILICONAGEM NA SUPERFÍCIE DO ISOLADOR**

As propriedades hidrofóbicas da borracha de silicone causam correntes de fuga muito mais baixas, o que resulta num excelente comportamento em ambientes altamente poluídos. Assim, não há necessidade de lavagem ou de lubrificação, mesmo em locais húmidos ou poluídos, o que reduz os custos de manutenção e limpeza. O Silicone desativa a formação de caminhos condutivos, que levam a formação de arcos, as interrupções de linha e erosão do isolador. A borracha de silicone mantém a sua hidrofobicidade após a lavagem.

Os elastômeros de silicone têm excelentes propriedades e são muito superiores aos elastômeros orgânicos convencionais. Exibem excepcional resistência mecânica à temperatura e pode ser utilizado a temperaturas que variam de  $-40^{\circ}\text{C}$  a mais de  $+100^{\circ}\text{C}$ . A resistência ao envelhecimento destes elastômeros destaca as suas qualidades fundamentais, tais como o facto de serem quimicamente inertes, a sua estabilidade foto-oxidativa e a ausência de grupos reativos residuais uma vez curado. (Queirós, 2013)

Os silicones são resistentes ao ozono, à radiação ultravioleta, a produtos químicos, a combustíveis e a óleos. Os silicones apresentam um comportamento operacional estável a longo prazo, mesmo depois de muitos anos de exposição ao ar livre contra a degradação e deterioração das propriedades isolantes. (Queirós, 2013)

A excelente resistência da siliconagem evita a erosão ou o acompanhamento do material otimizado parâmetros do processo e a garantia de qualidade para uma longa vida útil e confiável extraordinária em todas as condições.

# 3. INFLUÊNCIA DOS FATORES AMBIENTAIS

Os fatores ambientais num serviço de distribuição ou transporte de energia têm que ser considerados como um fator fundamental para o bom funcionamento das linhas e da qualidade de serviço na operação da rede elétrica. No caso dos isoladores instalados em linhas de transporte e distribuição de energia, estes podem falhar a sua missão na rede de energia ao permitirem o contornamento elétrico devido aos fatores ambientais que se façam sentir na região geográfica onde os isoladores estão instalados. Durante o período de serviço os isoladores podem ser afetados pelo nível de poluição atmosférica, precipitação atmosférica, gelo, orvalho, nevoeiro e nevoeiro salino.

## 3.1. POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

Em muitos locais do mundo, a contaminação de isoladores leva a uma diminuição da qualidade de serviço na distribuição de energia, isto é, com o aumento da poluição a nível mundial torna-se cada vez maior a probabilidade de ocorrência de contornamento elétrico de isoladores. A suportabilidade dielétrica de uma superfície isolante reduz-se substancialmente quando submetida a determinadas condições climáticas como chuva ou

alta humidade. Tal redução pode tornar-se mais acentuada quando a superfície isolante está exposta a uma atmosfera poluída.

Do ponto de vista elétrico, um nível elevado de poluição, propicia a formação, sobre a superfície isolante, de uma camada constituída por substâncias que dissolvidas em água, produzem soluções condutoras. Não ocorre variação no comportamento dielétrico da superfície do isolador se a camada se mantiver seca, quando comparada com a superfície limpa. Ao ocorrer um processo de humedecimento por um dos outros fatores ambientais, em que se dissolva, mas não remova os sais contidos na camada, parcial ou totalmente, ocorre a formação de arcos sobre a superfície do isolador iniciando um processo que poderá culminar com uma descarga disruptiva.

Pode-se fazer logo à partida uma distinção entre dois tipos de poluição: Poluição Ativa e Poluição Inerte.

A **poluição ativa** subdivide-se em dois tipos:

- **Poluição condutora:** depósitos metálicos, excrementos de pássaros, chuva ácida e nevoeiro Salino;
- **Poluição solúvel:** depósito de sal seco trazidos pelo vento do mar, sal contido na areia do deserto, gesso provenientes do solo ou pedreiras, cimento, cinzas, poluição química devido à atividade industrial ou uso de fertilizantes e tratamentos na agricultura.

A condutância global da camada de poluição condutora é o elemento principal no nível de gravidade. No caso dos sais solúveis, a condutância depende da quantidade de depósito de sais e, por conseguinte, a quantidade de dispersão de água na superfície do isolador.

A solubilidade e o tempo de dissolução são dois pontos importantes. A solubilidade, porque quanto mais a poluição é solúvel e o tempo de dissolução rápido, menor é a quantidade necessária de humedecimento (da chuva, nevoeiro) e o tempo para formar uma camada altamente condutora.

Na tabela 2 faz-se uma descrição da solubilidade e dissolução dos sais mais frequentes na atmosfera.

**Tabela 2 Solubilidade e dissolução dos sais presentes na atmosfera**

	Baixa Solubilidade do Sal	Alta Solubilidade do Sal
Rápida Dissolução do Sal		MgCl <sub>2</sub> , NaCl, CaCl <sub>2</sub> , KCl
Lenta Dissolução do Sal	MgSO <sub>4</sub> , Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , CaSO <sub>4</sub>	NaNO <sub>3</sub> , Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , ZnCl <sub>2</sub>

A poluição inerte, que se caracteriza por não sofrer alterações na sua composição com o passar do tempo, não é condutora, mas pode influenciar indiretamente a tensão suportável de um isolante. Os depósitos de poluição não solúveis em materiais hidrofóbicos podem mascarar as propriedades hidrófobas das superfícies dos isoladores.

Para efeitos de normalização, o tipo de poluição classifica-se em cinco níveis definidos na norma IEC 60815-1, tendo por base os registos de deposição de contaminantes ao longo de um período no mínimo de um ano, que são: Muito Ligeira, Ligeira, Média, Elevada e Muito elevada. Esta caracterização auxilia ainda na escolha do tipo de tecnologia e perfis de design dos isoladores mais indicados para diversos tipos de poluição.

**Tabela 3 Níveis de poluição para ambientes típicos [9]**

<b>Nível de poluição</b>	<b>Ambientes típicos</b>	<b>Mínimo da linha de fuga específica mm/kV fase-fase</b>
Muito Ligeira	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zonas com baixa densidade de casas ou indústrias, mas submetidas a chuvas frequentes e/ou chuvas frequentes;</li> <li>- Zonas agrícolas;</li> </ul> <p>Todas estas zonas estarão situadas a uma distância de pelo menos 50 km do mar e não estarão expostas a ventos procedentes do mesmo.</p>	22
Ligeira	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zonas sem indústrias e com baixa densidade de edifícios.</li> <li>- Zonas com baixa densidade de casas ou indústrias, distanciadas entre 5 a 10km de qualquer tipo de poluição humana;</li> <li>- Zonas agrícolas;</li> </ul> <p>Todas estas zonas estarão situadas a uma distância de pelo menos 10 a 50 km do mar, deserto ou terra seca.</p>	27,8
Média	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zonas com indústrias que não produzem fumos particularmente contaminantes.</li> <li>- Zonas com alta densidade de casas e/ou indústrias, mas submetidas a chuvas e/ou ventos frequentes.</li> <li>- Zonas expostas ao vento procedente do mar, mas não demasiado próximo da costa (a alguns Quilómetros de distância).</li> </ul>	34,7
Elevada	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zonas com alta densidade de indústrias e subúrbios de grandes cidades com forte densidade de edifícios com aquecimento central que façam poluição.</li> <li>- Zonas próximas do mar ou em alguns casos expostas a ventos procedentes do mar relativamente fortes.</li> </ul>	43,3
Muito elevada	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zonas geralmente pouco extensas, submetidas a pós de alta condutividade e a fumos de indústrias que produzem depósitos condutores particularmente espessos.</li> <li>- Zonas muito próximas da costa, expostas aos ventos fortes e aos contaminantes procedentes do mar.</li> <li>- Zonas desertas, caracterizadas pela ausência de chuva durante longos períodos, expostas a ventos fortes com pó e areia, e submetidas a fortes condensações</li> </ul>	53,7

A norma IEC 60815-1 dá ainda algumas indicações, mediante a localização geográfica onde os isoladores vão ser instalados, como a preferência de declives baixos para casos de deposição por ação do vento (desertos e zonas industriais), com ângulos inferiores a 20° entre a perpendicular do núcleo e a linha de aba, por forma a permitir a limpeza natural por chuvas e vento, bem como em ações de manutenção. Declives mais acentuados são indicados para áreas costeiras, onde se verifica deposição por pulverização, vento ou nevoeiro. (Queirós, 2013) O perfil alternado é recomendado sobretudo para locais de grande pluviosidade, visto que permite aumentar o caminho de fugas com o mesmo comprimento total. Da mesma forma, os isoladores cerâmicos apresentam perfis mais abertos para melhores condições de limpeza por ação do vento ou perfis inferiores maiores para dificultar a deposição de sedimentos. Estas escolhas são fundamentais para garantir estabilidade no funcionamento quando em serviço e menores efeitos de degradação no corpo do equipamento. (Queirós, 2013)

A manutenção de isoladores tem uma grande contribuição para o bom funcionamento do sistema elétrico e dentro deste requisito foram encontradas algumas soluções para combater o problema do isolamento.



**Figura 8 Lavagem da cadeia de isoladores com recurso a helicóptero [16]**

Uma das soluções encontradas foi a limpeza dos isoladores e tem como base a sua lavagem com água desmineralizada. Este método provou-se eficaz na remoção da poluição

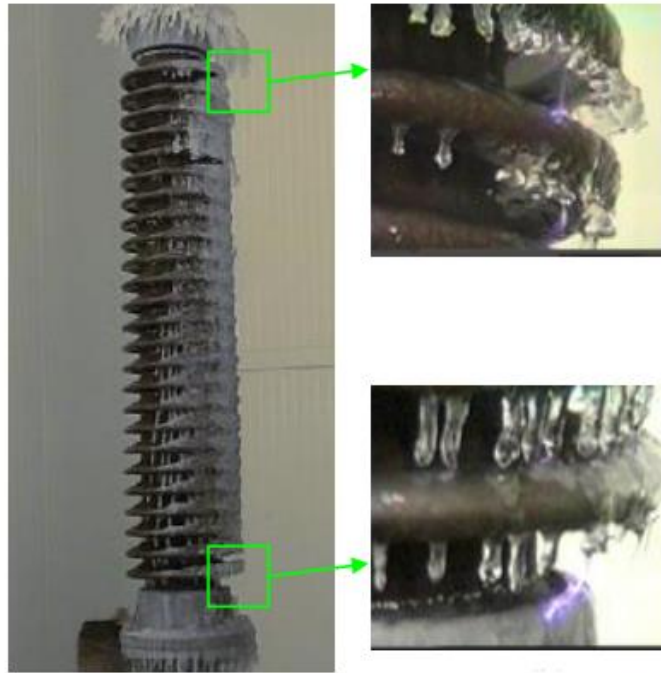
da superfície dos isoladores. Atualmente, esta prática apresenta elevados custos porque necessita de máquinas especiais para o efeito e mão-de-obra qualificada. A frequência das lavagens com água varia consideravelmente dependendo do nível de poluição local, das condições atmosféricas e do desenho dos isoladores. Outra das soluções encontradas foi fazer o revestimento, dos isoladores convencionais, com borracha de silicone, processo este que se mostrou muito vantajoso. Esta borracha de silicone utilizada apresenta boas propriedades dielétricas e flexibilidade numa gama de temperaturas alargada, em conjunto com excelente resistência a radiações ultravioletas, químicas, degradações térmicas e descargas por efeito coroa. Uma das suas mais importantes características é a capacidade de retenção da repelência à água no exterior e sujeita a grandes solicitações elétricas. Quando são aplicados em isoladores de porcelana, a propriedade de repelência à água resiste ao desenvolvimento de corrente de fuga e arcos em bandas secas, mesmo com a presença de poluição.

### **3.2. GELO E NEVE**

Durante o inverno as linhas de transporte de energia podem entrar em colapso devido ao fenómeno de acumulação de gelo ou neve sobre os isoladores, que levam a eventuais danos mecânicos e a uma considerável redução do desempenho dielétrico dos isoladores. Não é comum esta situação em Portugal.

Quando combinado com a poluição atmosférica, o gelo ou a neve leva ao aumento da condutividade elétrica e, conseqüentemente, ao aumento da probabilidade de descargas disruptivas.

Situações de contornamento do isolador por acumulação de neve são menos frequentes (pouco estudado) e este tipo de fenómeno tem mais efeito de elevar o esforço mecânico nos isoladores e apoios dos condutores elétricos, porque a neve não produz elevadas modificações na resistência dielétrica dos isoladores. O gelo por sua vez modifica radicalmente a resistência dielétrica dos isoladores, pois estabelece pontes de gelo entre as abas do isolador.



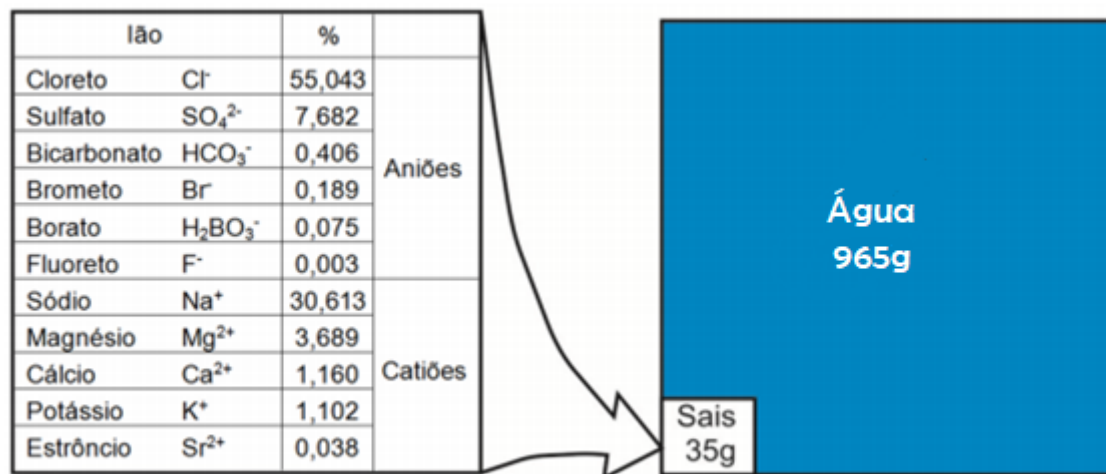
**Figura 9 Pormenor das pontes de gelo formadas entre as abas do isolador [17]**

A condutividade aumenta drasticamente quando a temperatura do gelo ou neve se aproxima do ponto de fusão (entre  $-2^{\circ}\text{C}$  e  $0^{\circ}\text{C}$ ), altura até à qual a poluição é embebida na sua constituição e então libertada para a superfície. Além disso, a condutividade aumenta fortemente com o aumento da grossura e tamanho da camada formada na superfície do isolador. Com o aumento da altitude, devido à diminuição da pressão atmosférica, a tensão necessária para ocorrência de ruptura diminui. (Farzaneh,2008)

O formato do isolador e comprimento de linha de fugas tem que ser adequado às condições de severidade que se façam sentir no local geográfico da instalação dos isoladores. Quanto maior for o diâmetro das saias, menor será a intensidade de campo elétrico em situações de gelo, logo menor a probabilidade de ocorrência de contornamentos. No entanto, esta relação não é proporcional visto que a intensidade de campo elétrico tende a diminuir cada vez menos com o aumento desse diâmetro. Por forma a diminuir a probabilidade de formação de camadas que interliguem as diferentes saias e, assim, diminuir a linha de fugas, são utilizadas configurações de perfil alternado, tipicamente com três diâmetros diferentes ou duas abas iguais consecutivas. (Farzaneh,2008)

### 3.3. NEVOEIRO SALINO

Em Portugal, a densidade populacional é grande, sobretudo no litoral, logo há a necessidade de haver redes de transporte e distribuição de energia nas zonas costeiras. A água dos oceanos apresenta uma composição rica em sais. Na realidade, como podemos observar na figura 10, em média por cada 1000g de água do mar, cerca de 35g são sais (Gross, 1967). Os iões que constituem estes sais são, maioritariamente o cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) e o sódio ( $\text{Na}^+$ ) com percentagens médias de 55% e 30,6%, respetivamente. Estes iões, através de um processo químico relativamente simples, por forças electrostáticas formam o cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ). (Fonseca,2012)



**Figura 10 Composição salina da água do mar [2]**

A interação do cloreto de sódio com os materiais denomina-se “nevoeiro salino”. Este termo não é atribuído a nenhum processo atmosférico ou meteorológico específico, mas sim a todos aqueles em que estão presentes pequenas partículas de solução marinha (spray marinho) com uma elevada percentagem de cloreto de sódio. (Fonseca,2012)

A deposição de sal forma na superfície do isolador uma camada condutiva, logo aumenta a probabilidade de ocorrência de contornamento quando a superfície do isolador se encontra molhada. O combate à fixação de contaminantes em ambientes salinos é elevada e fundamental para a resistência a disrupções e prevenção de degradação antecipada, sendo que a solução passa, por exemplo, pelo aumento do perfil da parte inferior das abas.

Além dos efeitos provocados a nível elétrico, o nevoeiro salino provoca o envelhecimento acelerado a isoladores cerâmicos e a maior degradação das ferragens de suporte.

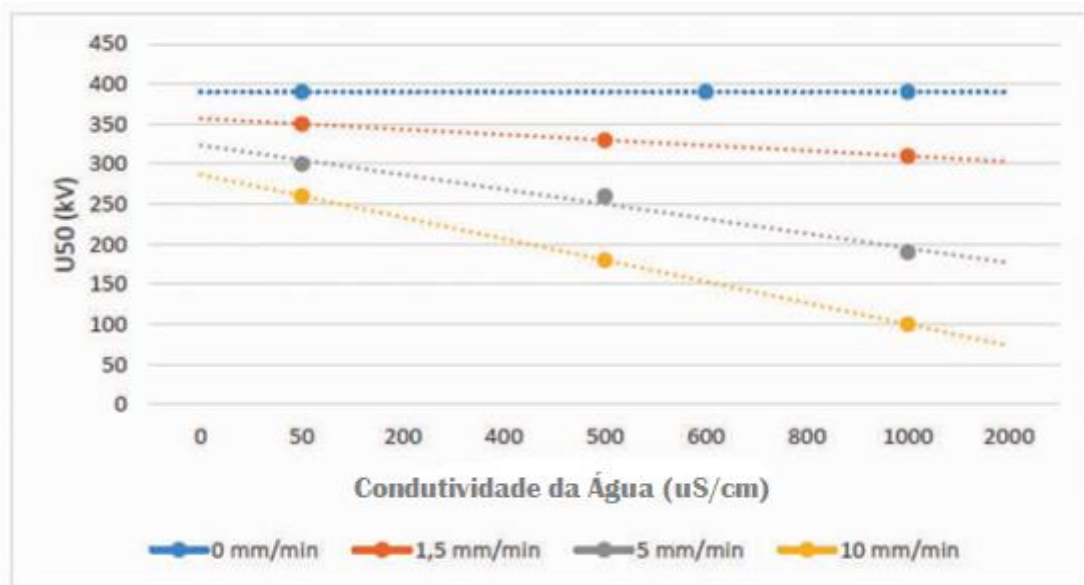
### **3.4. PRECIPITAÇÃO**

A chuva tem influência no comportamento dielétrico dos isoladores pois, ao molhar a superfície do isolador produz uma fina camada de água condutora e isso reduz a tensão de flashover dos isoladores aumentando a probabilidade de descarga elétrica.

Os parâmetros de chuva mais relevantes, no que diz respeito ao desempenho do isolador, são a intensidade da chuva em mm / min e a condutividade da chuva em  $\mu\text{S} / \text{cm}$ . Pela norma IEC 60060-1 a intensidade de chuva de 1 a 2 mm / min representa conservadoramente a intensidade de chuva natural normal. No entanto, em algumas áreas pode ocorrer chuva natural de alta intensidade com taxas de repetição muito altas podendo chegar a intensidades de chuva de 5 a 10 mm / min sendo estes fenômenos de duração relativamente curta.

No que se refere à condutividade da chuva, geralmente uma condutividade de  $100 \mu\text{S} / \text{cm}$  cobre os valores habitualmente observados na natureza. No entanto, durante um curto período de tempo podem ocorrer condutividades muito mais elevadas (até  $1000 \mu\text{S} / \text{cm}$ ) em áreas especiais caracterizadas por alta poluição. Ou seja, quando combinado com a poluição atmosférica, a chuva leva ao aumento da condutividade elétrica e, conseqüentemente, ao aumento da probabilidade de descargas disruptivas.

No gráfico 1 podemos observar a influência que a condutividade da água tem na tensão de *flashover* do isolador.



**Gráfico 1** Influência da condutividade da água na tensão de *flashover* do isolador

Para monitorização, foi desenvolvido por McKee o índice SPI (Standardized Precipitation Index) e baseia-se na precipitação standardizada, que corresponde ao desvio de precipitação em relação à média para um período de tempo específico, dividido pelo desvio padrão do período a que diz respeito essa média.

Matematicamente, o SPI corresponde à probabilidade cumulativa de um determinado acontecimento de precipitação ocorrer numa estação. O resultado computacional da precipitação standardizada é linearmente proporcional ao défice de precipitação e permite especificar a probabilidade, a percentagem da média e o défice de precipitação acumulada.

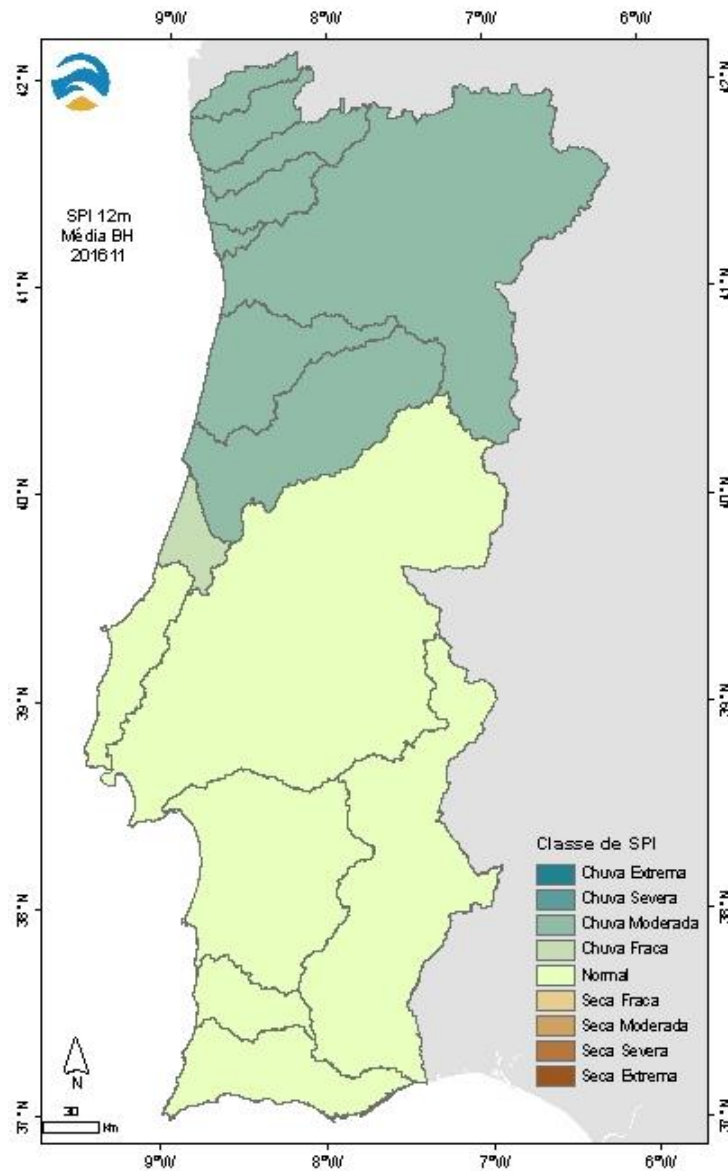
Baseado no registo de uma longa série, de precipitação, é possível dizer qual é a probabilidade da precipitação ser inferior ou igual a uma certa quantidade: valores baixos de probabilidade indicam uma situação de seca; valores elevados de probabilidade indicam uma situação de chuva.

Valores do SPI	Categoria da seca	Probabilidade %
$\geq 2.00$	chuva extrema	2.3
1.50 a 1.99	chuva severa	4.4
1.00 a 1.49	chuva moderada	9.2
0.99 a 0.50	chuva fraca	15.0
0.49 a -0.49	normal	19.1
-0.50 a -0.99	seca fraca	15.0
-1.00 a -1.49	seca moderada	9.2
-1.50 a -1.99	seca severa	4.4
$\leq -2.00$	seca extrema	2.3

**Figura 11** Classificação do índice SPI para períodos secos e períodos chuvosos e correspondente probabilidade de ocorrência [11]

### 3.4.1. PRECIPITAÇÃO EM PORTUGAL

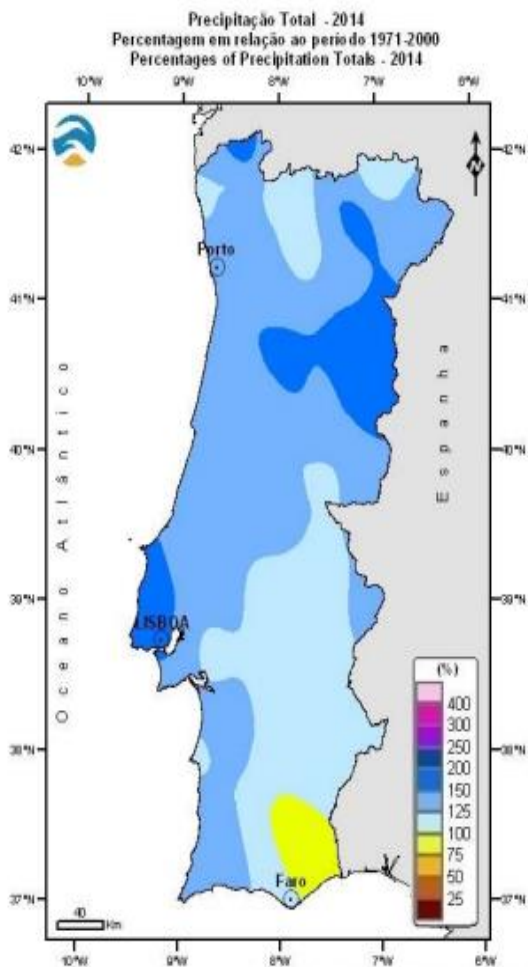
Segundo dados do Instituto Português do Mar e Atmosfera é apresentado no gráfico da figura 12, que se refere ao final de novembro de 2016, a situação em Portugal de acordo com o índice de seca SPI a 12 meses. O SPI a 12 meses reflete padrões de precipitação de longa duração. Com esta escala de tempo, é efetuada uma comparação da precipitação de 12 meses consecutivos, com os 12 meses dos anos que fazem parte da série histórica em análise.



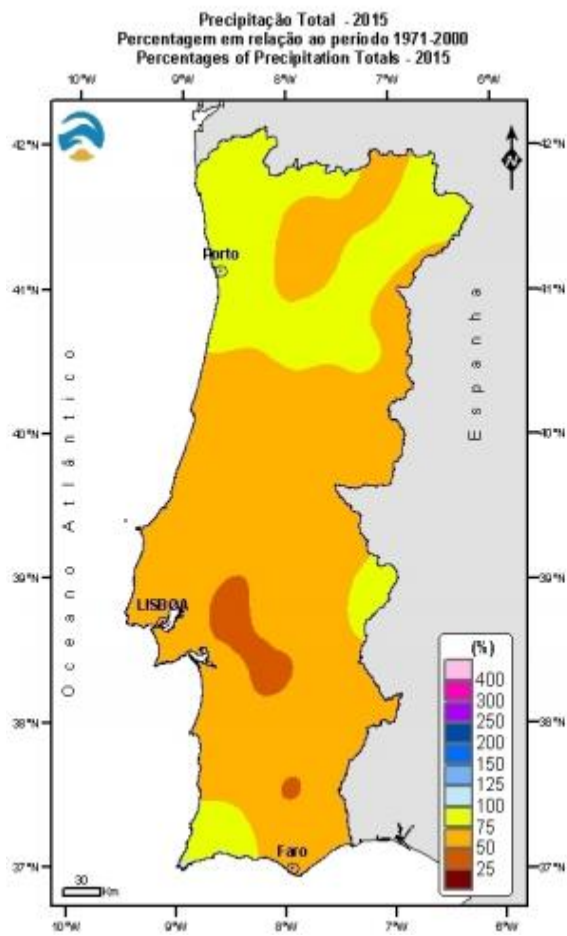
**Figura 12 Classe de SPI para Portugal continental Nov 2016 [14]**

Pode-se retirar do gráfico da figura 12 a título de exemplo que a zona norte e centro do país é mais propícia ao surgimento de chuva severa, ou seja é mais provável a existência de fenómenos de chuvas de alta intensidade.

Outro dado estatístico que pode ser apresentado é a distribuição espacial da percentagem do total anual de precipitação em relação aos respetivos valores médios do período 1971-2000.



**Figura 13 Precipitação em Portugal continental 2014 [12]**



**Figura 14 Precipitação em Portugal Continental para o ano de 2015 [13]**

Pretende-se com isto salientar que, aquando de uma nova instalação de uma rede elétrica de energia, deve-se ter em conta o tipo de isolador e o seu formato mediante a zona territorial a ser instalado. A escolha adequada vai-se refletir na fiabilidade do sistema elétrico.



## 4. LABORATÓRIO DE ENSAIOS

Para se proceder a ensaios de comportamento dielétrico de isoladores há que se recorrer a um Laboratório de Alta tensão, no qual se pretende que as instalações sejam capazes de realizar ensaios a equipamentos dielétricos com a utilização de sistemas de ensaio em alta tensão, de forma segura e respeitando as condições normalizadas internacionalmente.

A nível Laboratorial requer-se que seja possível respeitar as condições estipuladas a nível internacional, para que se garanta a qualidade dos resultados, com o menor erro possível, e passível de ser reproduzido em qualquer parte do mundo.

### 4.1. CONSTITUIÇÃO DO LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO

O laboratório de alta tensão onde foram realizados os ensaios situa-se no Departamento de Engenharia Eletrotécnica da FEUP, com uma área aproximada de 147 m<sup>2</sup> para disposição dos equipamentos e uma sala de comando e observação de ensaios. A sala de ensaios tem um pé direito de 12 metros, uma gaiola de Faraday em torno de toda a estrutura da sala e mecanismos para a mobilidade dos equipamentos de alta tensão e objetos de ensaio, para garantir um isolamento elétrico para o exterior. (Queirós N. S., 2013)

O LAT encontra-se em fase de expansão com vista ao desenvolvimento de novos ensaios e, atualmente, é possível desenvolver ensaios para os seguintes equipamentos: (Queirós N. S., 2013)

- **Ensaio de rigidez dielétrica de isoladores (IEC 60168 e IEC60383)**
  - Ensaio à frequência industrial a seco.
  - Ensaio de perfuração.
  - Ensaio para tensão suportável ao impulso atmosférico.
- **Inspecção periódicas em equipamento TET :**
  - Varas (IEC 60832-1)
  - Tirantes (IEC 60832-1)
  - Luvas (IEC 60903)
  - Protetores (IEC 61229)
  - Curto-circuitadores
  - Escadas (IEC 61478)
- **Ensaio de seccionadores (IEC 60694)**
  - Ensaio à frequência industrial a seco.
  - Ensaio para tensão suportável ao impulso atmosférico.

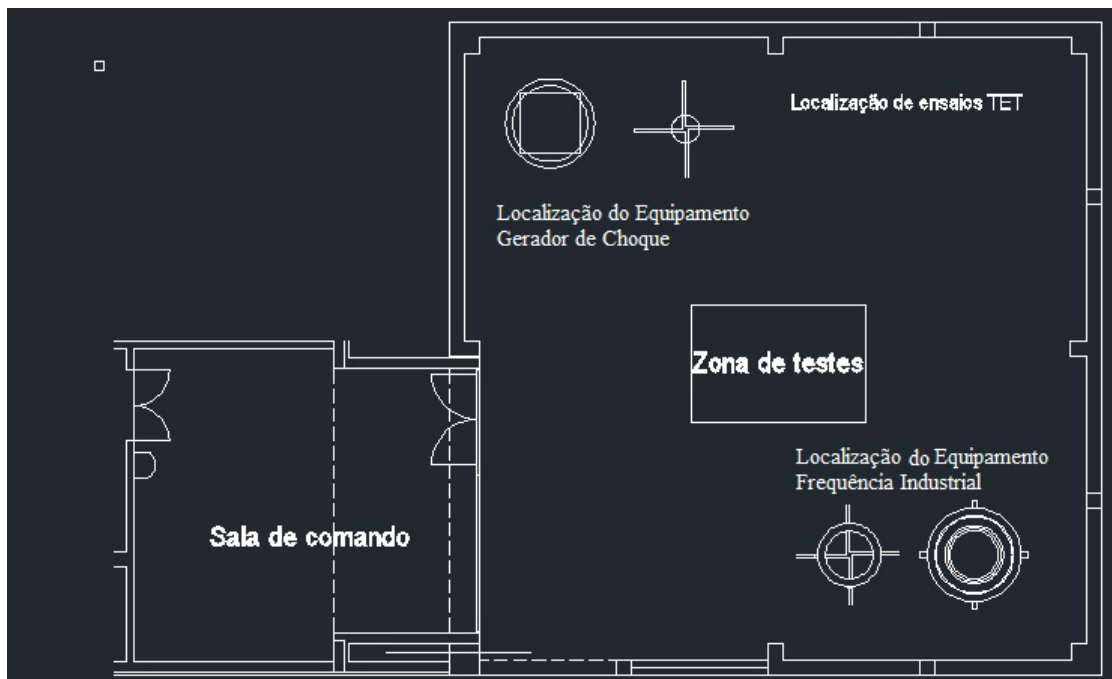


Figura 15 Planta em Autocad da Laboratório de Alta Tensão FEUP [20]

A nível de segurança necessária para a realização dos ensaios, existem dois tipos de proteção: ativa e passiva. (Queirós N. S., 2013)

A proteção ativa consiste em encravamentos elétricos, por ação de comandos em interruptores ou sensores de contacto no quadro de controlo de equipamentos do LAT. Tanto no portão exterior como na porta da sala de operação existe um sensor de contacto que indica se os mesmos se encontram abertos ou fechados e, mediante essa informação, interrompe ou estabelece a alimentação, tanto ao gerador de choque, como ao transformador de frequência industrial. (Queirós N. S., 2013)

A proteção passiva passa pela existência de uma gaiola de Faraday, que consistiu na colocação de chapas metálicas zincadas em todas as paredes do edifício e no pavimento, as quais se encontram todas eletricamente interligadas, quer por soldadura, quer por tranças metálicas, por forma a escoar as cargas elétricas que se formam durante os ensaios de forma segura para a terra. Para garantir a equipotencialização de todas as partes existe um barramento em anel de cobre em torno do edifício, o qual se encontra ligado à terra. (Queirós J. P., 2013)

## **4.2. EQUIPAMENTOS**

### **4.2.1. ESPINTERÓMETRO DE ESFERAS**

O espinterómetro de esferas é um aparelho de medição de altas tensões caracterizado pela sua facilidade de utilização e fiabilidade. É constituída por duas esferas metálicas, uma delas suspensa e eletricamente alimentada e a outra acoplada a um equipamento que permite realizar o deslocamento vertical (esta é acionada por um motor que permite fazer deslocações ao milímetro) e está ligada à terra. A diferença de potencial entre as esferas é calculada em função da distância máxima a que se encontram uma da outra e das características do ar ou outro gás, existente entre as esferas, tais como temperatura, pressão e humidade. (IEC, 2002)



**Figura 16** Espirómetro de esferas presente no LAT

O funcionamento deste componente baseia-se na ionização das moléculas de ar, situação que se verifica quando a diferença de potencial entre elas excede a tensão de rutura dielétrica desse ar, provocando uma descarga elétrica entre as esferas. É possível estabelecer uma relação baseada na distância entre as esferas, tendo em conta as propriedades do ar onde a descarga ocorreu, obtendo-se assim a tensão no circuito.

Hoje em dia o espinterómetro é bastante utilizado para a calibração de outros aparelhos de medição de tensão, pois o valor obtido neste equipamento de controlo deve ser coincidente com o que existe no momento da descarga elétrica disruptiva entre as esferas do explosor.

A montagem deste equipamento para calibração de aparelhos de medição em ambiente laboratorial deve estar de acordo com os requisitos especificados nas normas IEC 60052 e IEC 60060-1, tendo de ter alguns aspetos em atenção:

- As esferas devem ter superfícies perfeitamente lisas, limpas, secas, sem irregularidades na região da descarga elétrica, ter curvaturas uniformes e o diâmetro de cada esfera não deve diferir do valor nominal em mais de 2%.
- A haste que segura a esfera eletricamente carregada não deve conter arestas afiadas e o seu diâmetro não deve exceder 20% do seu comprimento, como forma de reduzir a influência do campo elétrico da haste na descarga entre as esferas.



Da figura 17 podemos retirar, que 1 representa o suporte isolante, 2 a haste da esfera, 3 as engrenagens de operação, mostrando as dimensões máximas, 4 a conexão de alta tensão com a resistência em série, 5 o distribuidor de stress, mostrando dimensões máximas, P o ponto de esparramamento da esfera de alta tensão e A a altura de P acima do plano terrestre, B o raio do espaço livre das estruturas externas.

#### **4.2.2. EQUIPAMENTO DE ENSAIO AO CHOQUE**

Os geradores de impulso são necessários para verificar as condições de suportabilidade dos equipamentos elétricos de alta tensão, quando submetidos a esforços dielétricos normalizados.

Adicionalmente, os geradores de impulso são necessários na pesquisa e desenvolvimento de novos equipamentos elétricos e materiais isolantes, bem como no estudo dos fenômenos associados às altas tensões.

Vários ensaios de alta tensão são usualmente realizados com o gerador de impulso, destacando-se os ensaios de impulso atmosférico e impulso de manobra, pelos quais se simula, em laboratório, sobretensões de elevada ordem, originadas, respectivamente, por descargas atmosféricas e surtos provenientes de chaveamentos no sistema de potência.

Quando o ar constitui o isolamento principal do equipamento em verificação, o ensaio é não destrutivo e o fenômeno físico associado à aplicação dos impulsos tem natureza probabilística, sendo comum a adoção de procedimentos de ensaio que utilizam métodos estatísticos, com amostragens constituídas de um número significativo de aplicações, para permitir a determinação da suportabilidade do equipamento em função de uma dada probabilidade de descarga.

Em aplicações práticas, os ensaios de impulso atmosférico são realizados com maior frequência que os ensaios de impulso de manobra, em virtude da maioria dos equipamentos utilizados no sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica estarem mais sujeitos às sobretensões de origem atmosférica, provocadas pela incidência direta ou indireta de raios atmosféricos.

## Princípio de funcionamento do gerador de Choque

Entre as diversas técnicas utilizadas para a geração de impulsos de tensão, a mais prática e eficiente é a que utiliza uma associação de condensadores em série, num circuito desenvolvido por Marx, no início do século XX, podendo ser utilizado tanto para a geração de impulsos atmosféricos como para impulsos de manobra.

O circuito multiplicador de Marx está apresentado na figura 18, constituído apenas por 4 andares neste exemplo, onde  $R_L$  é denominada resistência de carga,  $R_S$  a resistência de frente,  $R_p$  a resistência de cauda e  $C_s$  a capacitância de cada andar, sendo o objeto de ensaio representado somente pela sua capacitância  $C_b$ , em relação à terra. (Queirós N. S., 2013)

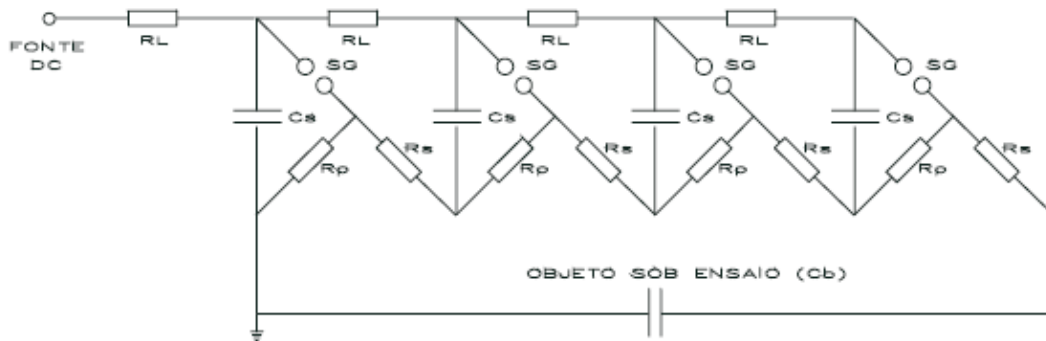


Figura 18 Esquema de um gerador de impulso de Marx [21]

O princípio de funcionamento do gerador de impulso consiste em carregar os condensadores  $C_s$  de todos os andares em paralelo, através de uma fonte de corrente contínua, usualmente com tensão máxima da ordem de 50 kV a 200 kV, e, terminado o período de carga, a energia armazenada no gerador de impulso é descarregada no terminal de alta tensão do objeto sob ensaio, pela interrupção intencional das esferas explosoras  $SG$ , conectando, assim, todos os andares em série. A tensão máxima a ser aplicada ao objeto sob ensaio será, então, a soma das tensões de carga armazenadas nos andares individuais. Considerando-se, por exemplo, um gerador de impulso formado por 16 andares, a sua tensão máxima de carga será equivalente a 1.600 kV, quando todos os andares tiverem sido individualmente carregados com a tensão de 100 kV. No caso de quisermos obter uma tensão máxima de carga de por exemplo 600kV, são neste caso necessários pelo menos 6

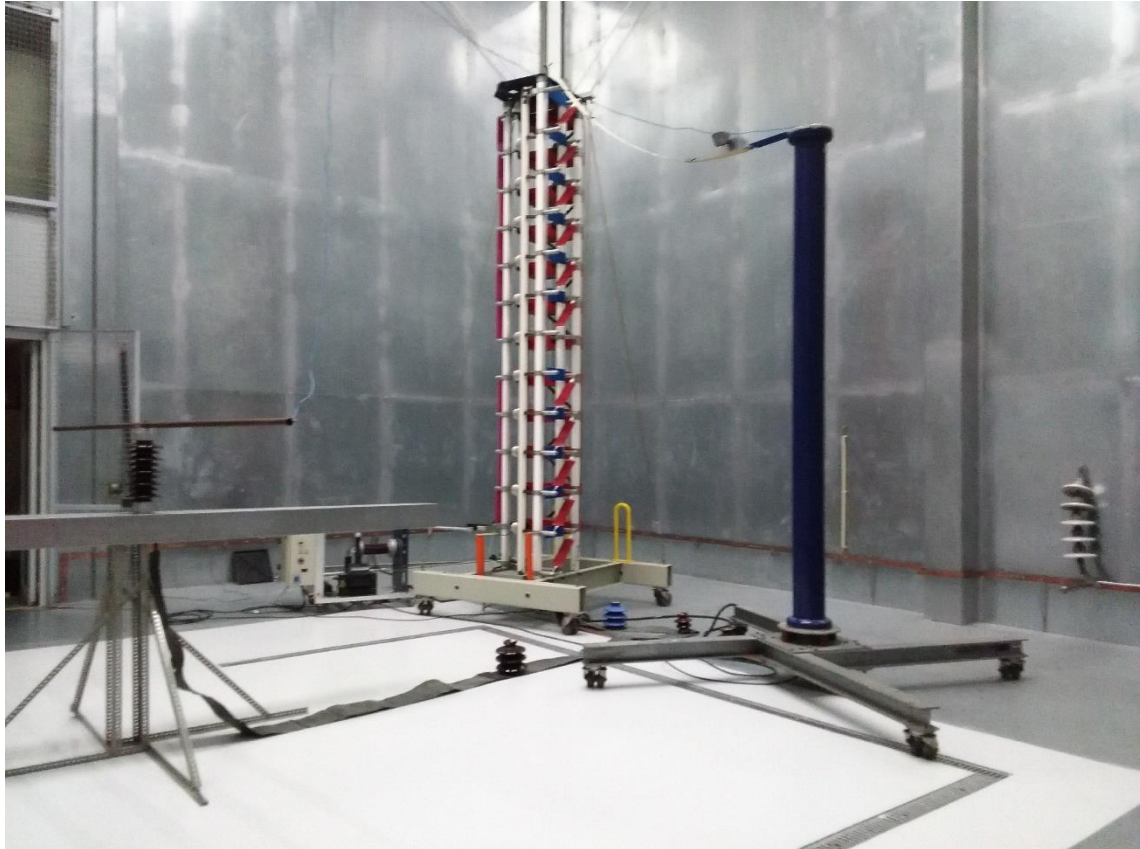
andares do gerador, sendo carregados 6 condensadores de 100kV até à sua capacidade máxima e os restantes 10 são curto-circuitados por barras metálicas. (Queirós N. S., 2013)

De realçar que, para a realização de qualquer ensaio, é necessário estabelecer ligações de terra apropriadas entre os elementos dispostos no laboratório: a parte inferior do divisor de tensão e o terminal de massa do objeto a ensaiar devem ser conectados à torre por meio de chapas de cobre de largura considerável e espessura fina, a fim de escoar a onda de impulso para a terra; a estrutura metálica da torre, divisor e regulador são ligados a um ponto comum e, de seguida, a um barramento de cobre presente nas laterais do laboratório.

O gerador de choque presente no laboratório de alta tensão é um equipamento da marca Haefely tipo S, capaz de produzir uma onda de frente rápida normalizada com valor máximo de aproximadamente 1200 kV. É um sistema capaz de testar a rigidez dielétrica de vários equipamentos destinados a altas tensões como isoladores, transformadores disjuntores entre outros. (Queirós N. S., 2013)

A configuração do sistema existente no laboratório consiste em 5 unidades:

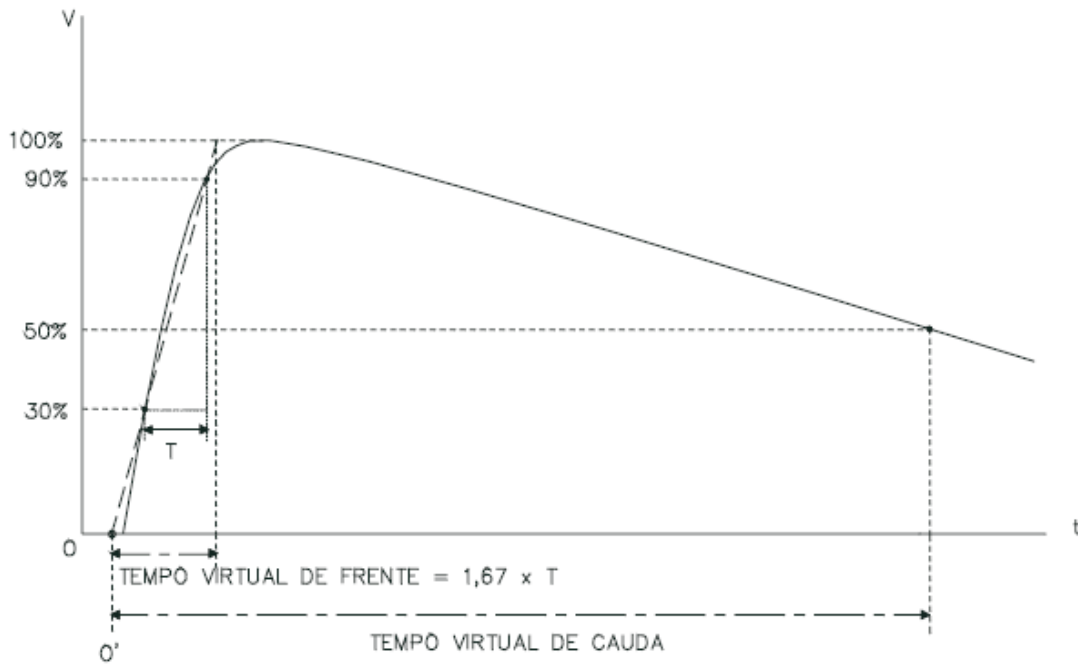
- Retificador, com ligação direta à torre do gerador, responsável pelo carregamento dos condensadores;
- Torre de gerador de impulso, constituída por 12 andares, cada um constituído por um condensador de 75 mF com capacidade de acumular até 100 kV, duas esferas de descarga, resistência em paralelo e resistências de saída, que determinarão a forma da onda de choque;
- Divisor de tensão, que consiste numa série de condensadores em série que convertem a onda de choque num sinal suscetível de ser medido pelos instrumentos onde é ligado diretamente à saída da torre e ao equipamento em ensaio.
- Unidade de controlo, onde se determina a velocidade de carregamento dos condensadores, a tensão acumulada pelos mesmos, distância entre esferas de forma manual, polaridade de onda de choque e ainda tipo de disparo (manual ou automático).
- Digital Impulse Analysis System (DIAS) responsável pelo tratamento da informação adquirida à saída do divisor de tensão e coordenação da distância das esferas, bem como a apresentação gráfica da forma de onda e suas propriedades.



**Figura 19 Gerador de impulso presente no LAT**

### **Forma de Onda de Impulso**

Desprezando-se o efeito da indutância e das capacitâncias parasitas no circuito de ensaio, o impulso de tensão aplicado ao equipamento em teste terá uma forma de onda similar à apresentada na figura 20.



**Figura 20 Forma de onda para impulsos atmosféricos [21]**

Uma onda de choque atmosférico caracteriza-se por possuir uma forma de onda padronizada como  $1,2/50$ , sendo o tempo virtual de frente igual a  $1,2 \mu\text{s}$  e o tempo virtual de cauda equivalente a  $50 \mu\text{s}$ . A sua caracterização é feita com base na amplitude da onda de tensão, nos tempos virtuais de frente e de cauda e, eventualmente, no tempo virtual até a disrupção, se o objeto sob ensaio não suportar a aplicação do impulso de tensão. A determinação dos tempos, conforme mostrado na figura 20, é realizada em função do zero virtual  $O'$ , definido pela interseção com o eixo do valor do tempo da reta que passa pelos pontos correspondentes a 30% e 90% do valor de crista, na frente da onda de impulso.

Assim, o tempo virtual de frente é determinado pelo produto da constante 1,67 e do intervalo de tempo definido pelos instantes de 30% e 90% do valor de crista da onda de impulso atmosférico. De modo similar, o tempo virtual de cauda é definido pelo intervalo de tempo compreendido entre o zero virtual  $O'$  e o instante em que a tensão tenha sido reduzida para 50% do valor de crista.

De realçar que o tempo de frente é controlado pelas resistências em série, enquanto o tempo de cauda é definido pelas resistências em paralelo.

Se houverem oscilações sobrepostas na crista ou na frente da onda de impulso, cujo período seja inferior a  $1 \mu s$  (frequência superior a 0,5 MHz), a determinação dos instantes correspondentes a 30% e 90% do valor de crista de impulso, para fins de caracterização da forma de onda, deverá ser realizada tomando-se como base a linha média traçada por entre os pontos extremos das oscilações, suavizando deste modo a forma de onda de impulso medida. Para impulsos atmosféricos, é padronizada a técnica de medição de tempos virtuais ao invés dos valores reais, em face da dificuldade de determinação exata do momento da aplicação do impulso, já que o mesmo pode ser influenciado pelo transitório de disparo dos vários andares do gerador de impulso, principalmente quando a caracterização da forma de onda é realizada com antigos sistemas de medição. Para impulsos de manobra, com forma de onda padronizada de  $250/2.500 \mu s$ , a frente de onda é muito mais lenta que no caso dos impulsos atmosféricos, os tempos virtuais e reais praticamente coincidem, sendo por isso, adotada apenas a medição dos tempos reais.

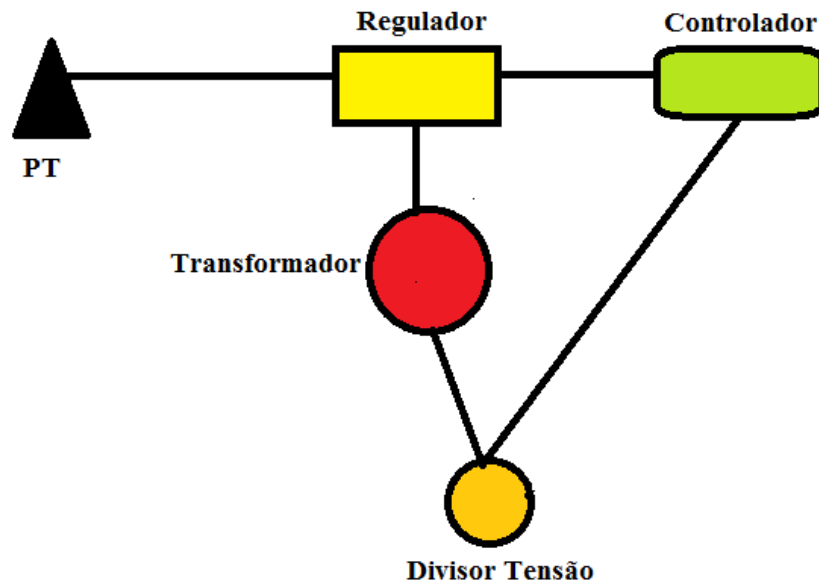
Na prática comum, a realização do ensaio de impulso num determinado protótipo de equipamento elétrico é constituído pela montagem do equipamento que será testado, pelo ajuste do gerador de impulso com resistências adequadas para um dado número de andares utilizados, pela calibração da forma de onda e pela execução propriamente dita do procedimento de ensaio, atendendo rigorosamente às prescrições das normas técnicas apropriadas.

Segundo a Norma IEC 60060-1, as tolerâncias estabelecidas pelo comité técnico para as ondas de choque atmosférico são:

- Para o valor da tensão de teste:  $\pm 3\%$ ;
- Para o tempo de frente:  $\pm 30\%$ ;
- Para o tempo de cauda:  $\pm 20\%$ .

#### **4.2.3. EQUIPAMENTO DE ENSAIO À FREQUÊNCIA INDUSTRIAL**

O sistema de ensaio à frequência industrial é composto por quatro unidades, sendo estas, o transformador, o divisor de tensão, o regulador e o controlador. O sistema presente no LAT é da marca Phenix e é constituído por um transformador que produz uma potência máxima de 300kVA, atingindo uma tensão máxima de ensaio de 600 kV.



**Figura 21 Esquema unifilar do sistema de ensaio à frequência industrial**

Este tipo de ensaio tem como objetivo testar o comportamento dos isoladores para diferentes níveis de tensão em diversas situações, que podem ocorrer durante o seu período de vida útil. Pretende-se saber qual o ponto de funcionamento máximo sem que haja contornamento ou perfuração e, no caso de existir contornamento, qual a sua resistência mecânica nesta situação. Este tipo de ensaio permite verificar se as características de um determinado isolador se adequam às características, por exemplo, de temperatura e humidade, do local onde vai ser instalado, tendo em conta o seu normal funcionamento ou durante a ocorrência de fenómenos extremos como uma sobretensão, seja ela de manobra ou causada por uma descarga atmosférica.

Existem alguns aspetos a ter em consideração na realização dos ensaios à frequência industrial. Em primeiro lugar, deve-se garantir a segurança de pessoas e equipamentos presentes no laboratório durante os ensaios e, além disso, garantir que existem as condições ideais expressas nas normas (IEC 60168, IEC 60383) para que os resultados obtidos sejam fidedignos.

Antes dos ensaios é preciso preparar o laboratório, tendo em conta as normas técnicas, por forma a:

- Manter as distâncias de segurança entre os diversos equipamentos presentes (transformador, divisor de tensão, montagem do objeto de ensaio).
- Garantir que os constituintes da montagem, seja o condutor de cobre ou o barramento de terra, se adequam em termos de dimensões aos mínimos exigidos pela respetiva norma.
- Garantir que a montagem do objeto de ensaio respeita as distâncias mínimas às paredes do laboratório, ao solo e aos outros constituintes da montagem.
- Preparar o sistema de terras, ligando no mesmo ponto a terra do transformador, do divisor de tensão e a terra do barramento onde se encontra apoiado o isolador à terra do laboratório.
- Garantir que o laboratório apresente as condições atmosféricas de pressão, temperatura e humidade que se adequam a este tipo de ensaio.

É importante referir que a zona onde ocorrem os ensaios encontra-se dentro de uma gaiola de Faraday, que deve estar fechada para ser possível a realização dos ensaios, garantindo a proteção de todos os técnicos no momento do ensaio. Para o bom funcionamento de todos os componentes, em particular do transformador, e para que não haja influências nos resultados, deve-se ter em conta o intervalo de tempo entre os ensaios.



**Figura 22 Gerador à frequência industrial e divisor de tensão**



**Figura 23 Controlador do sistema de ensaio à frequência industrial**

#### 4.2.4. LCR BRIDGE

Para o ensaio da determinação da tensão suportável sob chuva é necessário medir a resistividade da água utilizada no ensaio e, para isso, existe no LAT uma LCR bridge, apresentada na figura 24. A LCR bridge presente no laboratório é uma LEADER LCR-740 e é uma ponte de impedância clássica a qual permite medir a resistência, a indutância e a capacitância. As soluções líquidas são medidas a 1 kHz ao usar o oscilador interno, ou até 40 kHz com uma fonte de onda senoidal externa. Tem as seguintes especificações técnicas:

- Resistência: 1 mOhm a 11 MOhm.
- Capacitância: 1 pF a 11 mF.
- Indução: 100 nH a 1100 H.

Precisão básica  $\pm (0,5\% + 0,1\% \text{ f.s.})$  nos intervalos mais baixos.

O utilizador ajusta a ponte interna de modo a que as duas impedâncias de ramificação sejam equilibradas, sendo isto indicado com a medição de um valor nulo.



Figura 24 LCR Bridge para medição da resistividade da água



# 5. ENSAIOS ELÉTRICOS

Para uma verificação laboratorial, onde se quer determinar a influência da chuva no comportamento dielétrico dos isoladores e que se pretende que seja fidedigna, temos que respeitar as normas nacionais e internacionais em vigor. Para isso, foram efetuadas as devidas montagens elétricas e mecânicas de suporte segundo as normas internacionais, em vigor à data da realização deste tipo de ensaios. Os ensaios respeitaram integralmente as normas IEC regentes deste tipo de atividade, nomeadamente a IEC 60061-1, onde são estabelecidas as definições gerais e testes requeridos para os ensaios de alta tensão e a IEC 60168, onde são descritas as condições de testes, para interior ou exterior, de isoladores feitos de material cerâmico ou de vidro, com sistemas de tensões nominais superiores a 1000 V.

## 5.1. OBJETOS DE ESTUDO

Como objetos de ensaios para esta dissertação foram utilizados 4 isoladores de suporte cerâmicos, disponibilizados pela empresa Cerisol-Isoladores Cerâmicos. Foram utilizados 2 isoladores do tipo H2 307, em que um desses isoladores foi pintado de forma manual com uma tinta de silicone com partículas de fibra da marca “Ceys”, que confere ao isolador uma superfície rugosa (figura 25) e 2 isoladores do tipo R 2115C em que um desses

isoladores foi pintado uniformemente com uma leve camada tinta de silicone azulada (figura 26) e hidrofóbica e o outro mantendo-se com as características de fábrica. As características dos isoladores são descritas nas tabelas 4 e 5:

**Tabela 4 Características elétricas e mecânicas do isolador H2 307**

Designação Cerisol	H2 307
<b>Dimensões</b>	
Linha de fuga	960 mm
Linha de arco	355 mm
Distância entre ferragens	315 mm
<b>Características elétricas (Tensão suportável)</b>	
Sob Chuva	70 kV
Ao choque atmosférico	170 kV
<b>Características mecânicas (Carga de rutura)</b>	
A flexão pousado	4000 N
A flexão no topo	890 Nm
A torção	1200 Nm



**Figura 25 Isolador cerâmico H2 307 normalizado (esquerda) e com revestimento de tinta de silicone com fibras (direita)**

**Tabela 5 Características elétricas e mecânicas do isolador R2115 C**

Designação Cerisol	R 2115C
Dimensões	
Linha de fuga	600 mm
Altura	225mm
Características elétricas (Tensão suportável)	
Sob Chuva	77 kV
Ao choque atmosférico	172 kV
Características mecânicas (Carga de rutura)	
Dobrado	10 kN



**Figura 26 Isolador cerâmico R 2115 C normalizado (direita) e revestido com tinta de silicone (esquerda)**

## **5.2. MONTAGENS REALIZADAS**

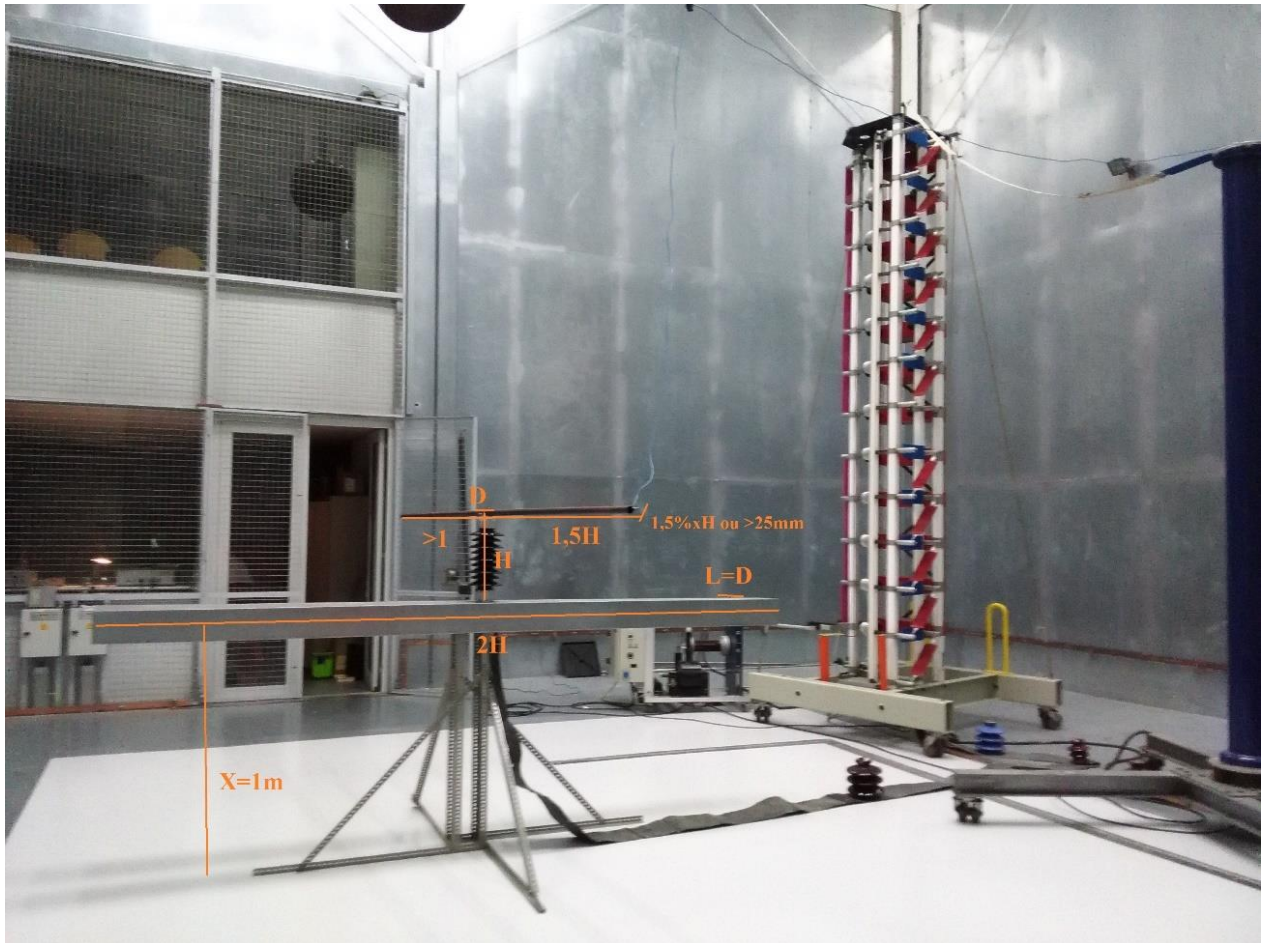
Para a realização dos ensaios elétricos foi necessário proceder à montagem de uma estrutura metálica. A realização dos ensaios aos isoladores teve em conta os parâmetros definidos na norma internacional IEC 60168, a qual suporta as condições de teste para zonas interiores com isoladores cerâmicos para tensões superiores a 1000 V.

Tratando-se neste caso de montagem de isoladores de suporte, a norma IEC 60168 especifica que, para ensaios a impulsos de choque atmosférico e frequência industrial, o isolador de suporte deve ser apoiado verticalmente sobre uma estrutura metálica em forma de U, com a abertura direcionada para baixo, com um comprimento total de pelo menos o dobro do tamanho do isolador e uma largura aproximadamente igual ao diâmetro da base das ferragens metálicas do isolador. Se o isolador possuir uma altura inferior a 1,8 metros, a estrutura em U deve ser colocada a pelo menos 1 metro de altura, caso contrário esta deve erguer-se no mínimo a 2,5 metros do solo. Esta deve ser ligada à terra do transformador.

No topo do isolador coloca-se um tubo na horizontal, perpendicular à estrutura em U, com um comprimento de pelo menos 1,5 vezes o tamanho do isolador, que deve prolongar-se no mínimo 1 metro para cada lado do eixo do isolador. O diâmetro desse tubo é de aproximadamente 1,5% da altura do isolador, com um mínimo de 25 mm.

A tensão de ensaio deve ser aplicada entre o tubo e o suporte metálico, na ponta do condutor.

A figura 27 exemplifica um caso de ensaio realizado no LAT a um isolador de suporte, onde se procura mostrar as relações entre as diferentes dimensões enunciadas anteriormente. Onde H é a altura do isolador; L a largura da chapa da base da estrutura; D é o diâmetro das ferragens do isolador e X a altura da base.



**Figura 27 Montagem de ensaio de um isolador de suporte**

Note-se que a estrutura tem que estar ligada à terra do transformador e, dependendo do ensaio ser ao choque atmosférico ou à frequência industrial, o tipo de ligação à terra é feita por chapa de cobre ou por cabo trançado, respetivamente. Isto deve-se a que no ensaio com o gerador de choque atmosférico as frequências são mais elevadas e, assim, a indutância vai aumentar, pelo que as vibrações no condutor de terra vão ser maiores.

Este tipo de montagem serve tanto para ensaios realizados a seco como ensaios realizados sob chuva, desde que a estrutura cumpra as dimensões acima estipuladas.

### **5.3. PROCEDIMENTO DE ENSAIO**

#### **5.3.1. ENSAIO A SECO**

Para obtermos resultados credíveis temos que respeitar as normais nacionais e internacionais para que o estudo seja válido.

Nos ensaios a seco devemos contruir uma estrutura com as dimensões indicadas no ponto 5.2 desta dissertação, manter os objetos de ensaio no interior das instalações de ensaio para garantir a estabilidade térmica dos objetos e, assim, evitar condensações na superfície dos mesmos. Após cada ensaio realizar um intervalo de pelo menos 1 minuto para garantir que os valores obtidos não foram afetados pelos ensaios anteriores, respeitar todas as distâncias de segurança entre objetos de ensaio, equipamentos e terras e cumprir com as medidas de segurança ativas e passivas do laboratório de ensaio.

Durante o ensaio propriamente dito temos que registar a tensão de disrupção do isolador em estudo, a temperatura, a humidade relativa e a pressão atmosférica que se faz sentir no laboratório no momento dos ensaios.

Segundo a norma IEC 60060-1, para ensaios à frequência industrial, para todos os valores de tensão de disrupção registados é necessário aplicar os fatores de correção em função das condições atmosféricas presentes na altura do ensaio, em comparação com os valores de referência definidos na norma para a temperatura, humidade e pressão atmosférica. De salientar que não se aplica o fator de correção da humidade aos valores de disrupção registados sob chuva.

Os valores estipulados pela a norma são os seguintes:

- Temperatura de referência:  $t_0 = 20^\circ\text{C}$
- Pressão atmosférica absoluta:  $p_0 = 1013 \text{ mbar}$
- Humidade absoluta:  $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$

Os fatores de correção da temperatura, pressão atmosférica e humidade são calculados por meio de relações matemáticas descritos na norma IEC 60060-1. A tensão de disrupção obtida para as condições não standard é corrigida para o valor equivalente sob os valores padrões  $t_0$ ,  $p_0$  e  $h_0$  através da sua divisão pelo fator de correção atmosférico  $k_t$ :

$$U_0 = U / K_t \quad (1)$$

Em que  $U_0$  é a tensão corrigida,  $U$  a tensão do ensaio e  $K_t$  o factor de correcção atmosférico.

$$K_t = k_1 \cdot k_2 \quad (2)$$

O factor de correcção atmosférica obtém-se pela multiplicação do fator de correção da densidade do ar  $k_1$  e o fator da humidade do ar  $k_2$ . (60060-1, 2010)

Sendo que o fator  $k_1$  provém da densidade relativa  $\delta$  e o coeficiente  $m$  que é um valor calculado pela obtenção do coeficiente  $g$ , descrito na equação 7.

$$k_1 = \delta^m \quad (3)$$

A densidade relativa do ar é obtida através da seguinte expressão:

$$\delta = \frac{\rho}{\rho_0} \times \frac{273+t_0}{2273+t} \quad (4)$$

Nesta expressão  $t$  representa o valor de temperatura, em graus Celsius, no momento de ensaio e  $p$  a pressão atmosférica medida em hPa.

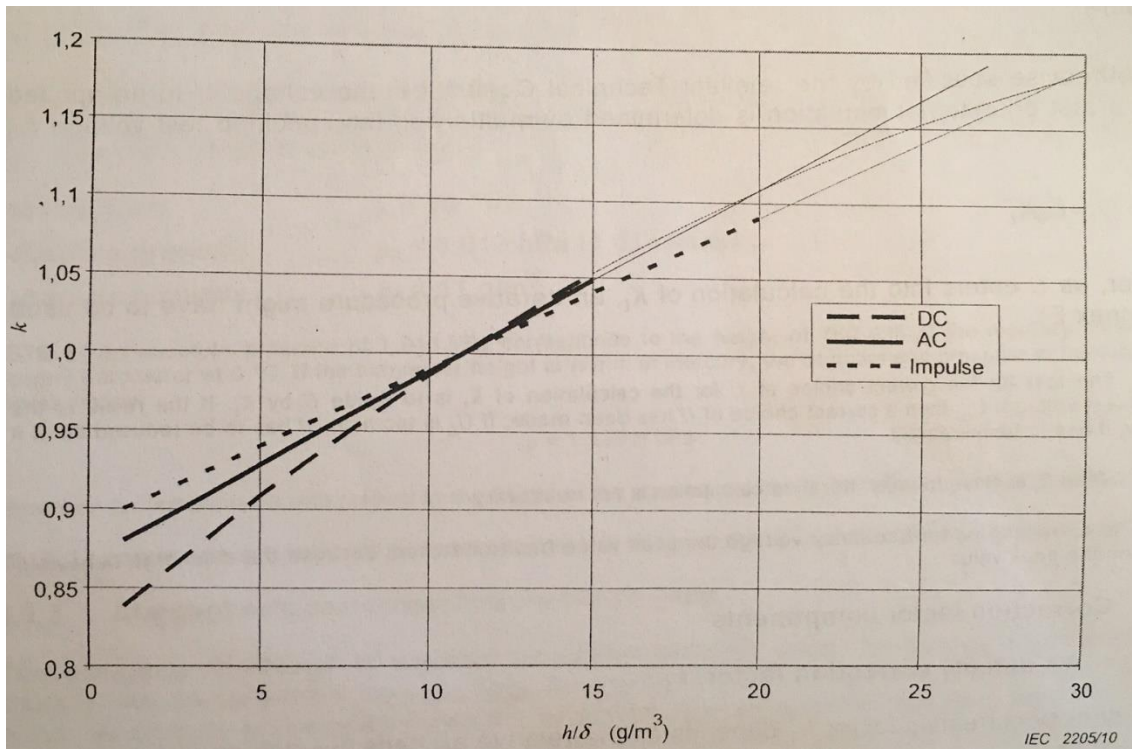
A correcção da humidade do ar  $k_2$  é obtida através da relação do parâmetro calculado na equação 6,  $k$ , elevado ao coeficiente  $w$ , sendo este último dependente do valor de  $g$  dado pela equação 7.

$$k_2 = k^w \quad (5)$$

No caso do ensaio à frequência industrial,  $k$  é definido pela seguinte equação:

$$k = 1 + 0,012(h/\delta - 11), \text{ para } 1 \text{ g/m}^3 < h/\delta < 15 \text{ g/m}^3 \quad (6)$$

A equação 6 provém do seguinte gráfico baseado em resultados experimentais.



**Figura 28 Gráfico de correlação do fator k com a massa volúmica do ar atmosférico [10]**

O cálculo do parâmetro g é feito através da seguinte expressão:

$$g = \frac{U50}{500.L.\delta.K} \quad (7)$$

Em que U50 é a tensão crítica de descarga disruptiva de impulso atmosférico a 50% em kV, L o comprimento do trajeto mínimo da descarga em m e os valores de δ e k calculados. Tendo o valor de g calculado, obtemos os coeficientes m e w através da seleção da linha na seguinte tabela:

$g$	$m$	$w$
$<0,2$	0	0
0,2 to 1,0	$g(g-0,2)/0,8$	$g(g-0,2)/0,8$
1,0 to 1,2	1,0	1,0
1,2 to 2,0	1,0	$(2,2-g)(2,0-g)/0,8$
$>2,0$	1,0	0

**Figura 29** Valores dos coeficientes “m” e “w” em função do factor g [10]

Para a obtenção da humidade absoluta, que só se aplica aos ensaios a seco, o valor é dado pela seguinte expressão:

$$h = \frac{6.11 \times R \times e^{\frac{17.6 \times t}{243+t}}}{0.4615 \times (273+t)} \quad (8)$$

Em que h é a humidade absoluta em  $\text{g/m}^3$ , R a percentagem relativa de humidade e t a temperatura ambiente em graus Celcius.

A humidade absoluta também pode ser obtida pelo gráfico da figura 30:

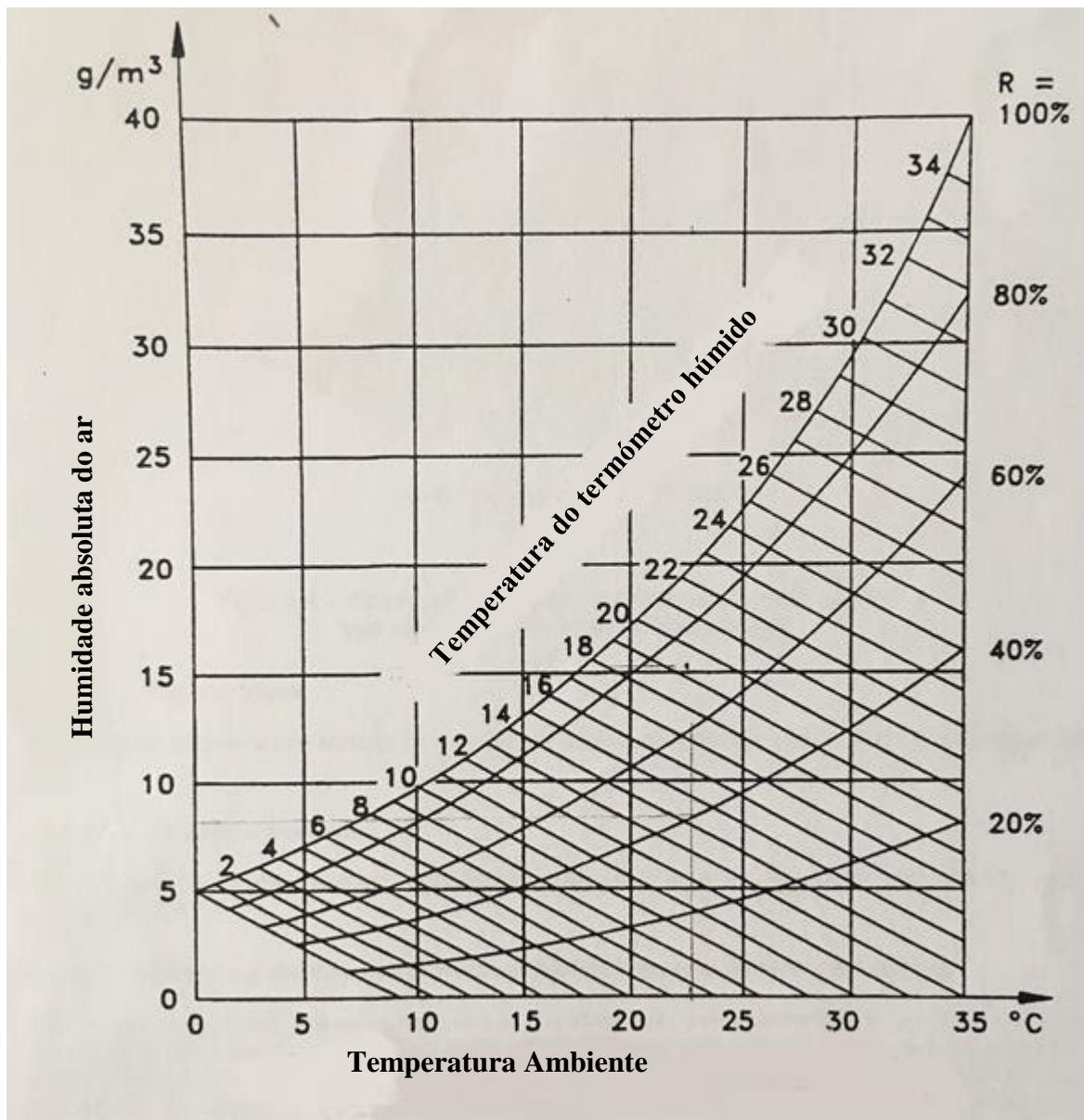


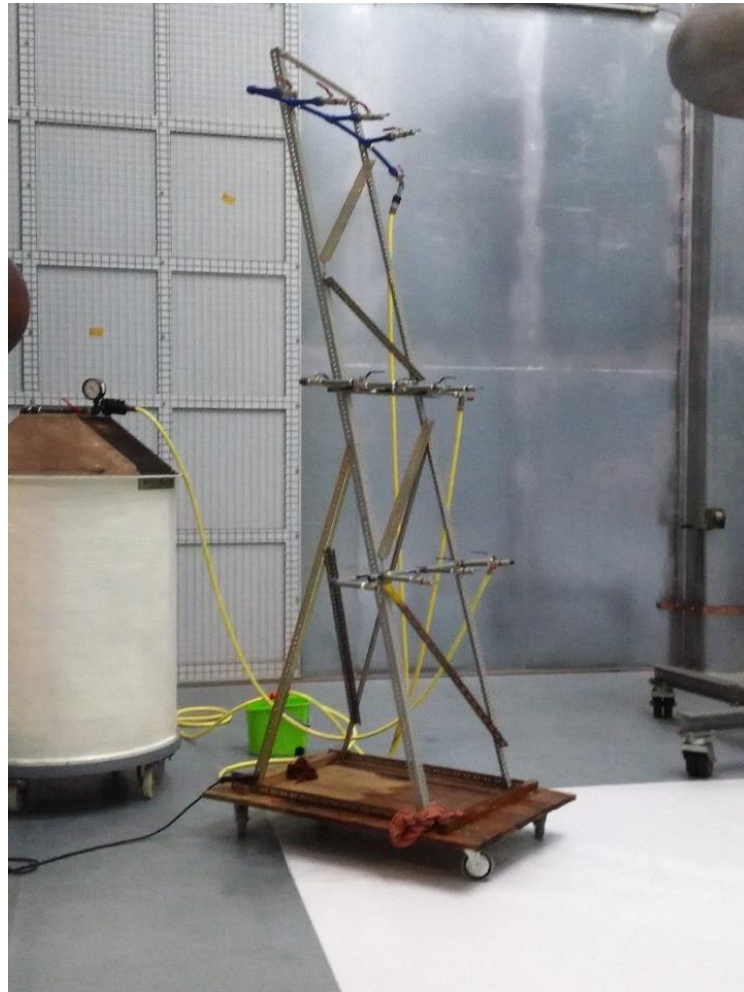
Figura 30 Umidade absoluta em função da temperatura ambiente e umidade relativa [10]

### 5.3.2. ENSAIOS SOB CHUVA

O ensaio sob chuva destina-se a simular o efeito real da chuva na disrupção dos isoladores. Para a sua realização em ambiente laboratorial é necessário proceder à montagem de uma estrutura com as dimensões indicadas no capítulo anterior, após cada ensaio realizar um intervalo de pelo menos 1 minuto para garantir que os valores obtidos não foram afetados pelos ensaios anteriores, respeitar todas as distâncias de segurança entre objetos de ensaio, equipamentos e terras e cumprir com as medidas de segurança ativas e passivas do

laboratório de ensaio. Além disso, há necessidade de ter uma estrutura especial para simular o efeito de chuva.

A montagem é composta com um sistema de pulverização com 3 andares ajustáveis e com regulação dos ejetores de água, como mostrado na figura 31. Uma cuba, onde é armazenada a água para ensaio, que tem no cimo instalada uma bomba de água para abastecer o sistema de pulverização a que está interligada.

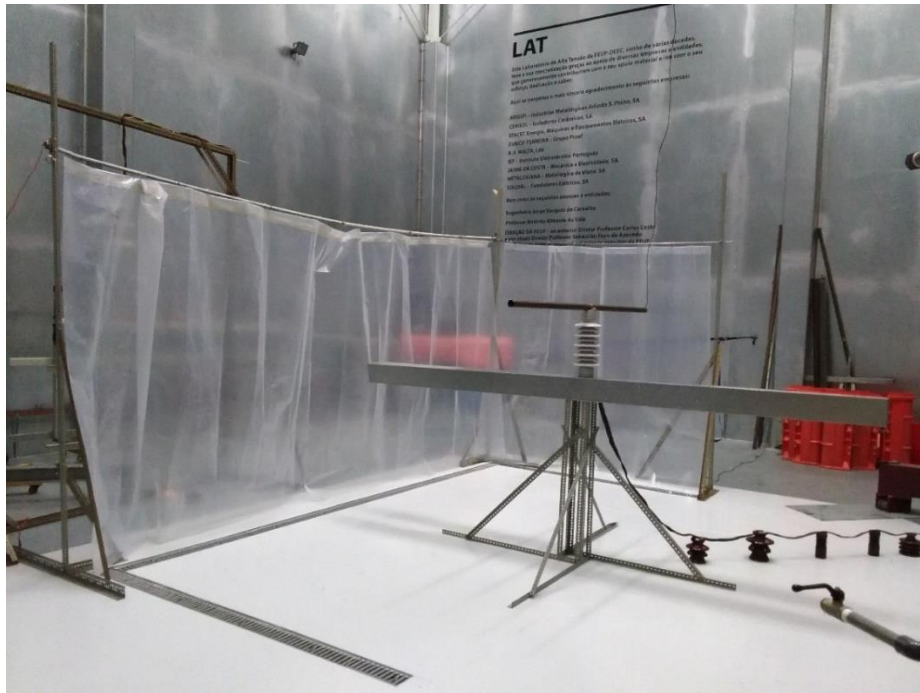


**Figura 31 Sistema de chuva artificial para ensaios elétricos**



**Figura 32 Sistema de armazenamento de água para o abastecimento do sistema de chuva**

Para se preservar o laboratório de ensaios foi contruída uma estrutura com um sistema de cortinas para proteger o espaço laboratorial e para que a água se concentre num espaço restrito e seja evacuada pelas respetivas calhas de saídas, que estão presentes no chão do laboratório.



**Figura 33 Cortinas de proteção para ensaios elétricos sob chuva**

Relativamente às condições de ensaio, elas devem respeitar as diretivas da norma IEC 60060-1, que diz que o objeto de ensaio deve ser pulverizado com água de resistividade e temperatura descritos na tabela 6, incidindo sobre ele como gotículas (evitar neblina e nevoeiro) e direcionado para que a intensidade de precipitação sobre a componente vertical e horizontal sejam aproximadamente iguais.

**Tabela 6 Condições standard para ensaios elétricos sob chuva [10]**

Condições	Unidade	Intervalo
<b>Taxa de precipitação média de todas as medições:</b>		
<b>-Componente vertical</b>	mm/min	1,0 até 2,0
<b>- Componente horizontal</b>	mm/min	1,0 até 2,0
<b>Limites para qualquer medição individual</b>	mm/min	±0,5 da média
<b>Temperatura da água</b>	°C	Temperatura ambiente ±15
<b>Condutividade da água</b>	uS/cm	100±15

A intensidade da precipitação é medida com um recipiente de recolha dividido, tendo aberturas de 100 cm<sup>2</sup> a 750 cm<sup>2</sup>, uma abertura na horizontal e outra na vertical com a abertura vertical virada para o pulverizador.

Para minimizar a dispersão, devem ser tomadas as seguintes precauções:

- O recipiente de recolha deve ser colocado perto do objeto de teste, mas evitando a coleta de gotas ou salpicos a partir dele. Durante o período de medição, deve ser movido lentamente ao longo de uma extensão suficiente para calcular a média dos efeitos de não-uniformidades da pulverização dos bicos individuais. Esta zona de medição deve ter uma largura igual à do objeto de teste e uma altura máxima de 1 m.
- Para objetos de teste entre 1 m e 3 m de altura, as medições individuais devem ser feitas na parte superior, central e inferior do objeto de teste. Cada zona de medição cobre apenas um terço da altura do objeto de teste.
- Para objetos de teste superiores a 3 m de altura, o número de zonas de medição deve ser aumentado para cobrir a altura total do objeto de teste sem sobreposição.
- Os procedimentos acima serão adaptados para objetos de teste com dimensões horizontais de grande porte.
- A dispersão de resultados pode também ser afetados por anomalias de altas ou baixas taxas de precipitação locais. Recomenda-se para detetar estas anomalias efetuar medições localizadas, para melhorar a uniformidade da pulverização, se for necessário.

O aparelho de pulverização deve ser ajustado para produzir goticulação, dentro das tolerâncias especificadas, podendo ser usados qualquer tipo e disposição dos bicos, desde que sejam garantidas as condições de precipitação no objeto de ensaio prevista na tabela 1.

A temperatura da água e resistividade devem ser medidas a partir de uma amostra coletada imediatamente antes da água atingir o objeto de teste. Também pode ser medido noutros locais como, por exemplo, no reservatório de armazenamento, desde seja assegurado que nenhuma mudança significativa ocorre até ao momento em que a água atinge o objeto de teste.

O objeto de ensaio deve ser inicialmente humedecido durante pelo menos 15 minutos sob as condições acima especificadas e essas condições devem permanecer dentro das tolerâncias especificadas durante todo o ensaio, que deve ser realizado sem interromper a precipitação. O tempo de pré-molhagem não inclui o tempo necessário para ajustar a precipitação. Também é possível efetuar um pré-humedecimento inicial por água da rede de abastecimento público não tratada, durante 15 min, seguido sem interrupção da pulverização por um segundo pré-humedecimento durante pelo menos 2 min antes do início do ensaio, usando água com todas as condições corretas de precipitação, que deve ser medida imediatamente antes do início do teste.

O procedimento de teste para o ensaio sob chuva deve ser o mesmo que o especificado para os testes a seco.

Durante o ensaio temos que registrar a tensão de disrupção do isolador em estudo, a temperatura da água e a pressão atmosférica que se faz sentir no laboratório no momento dos ensaios.

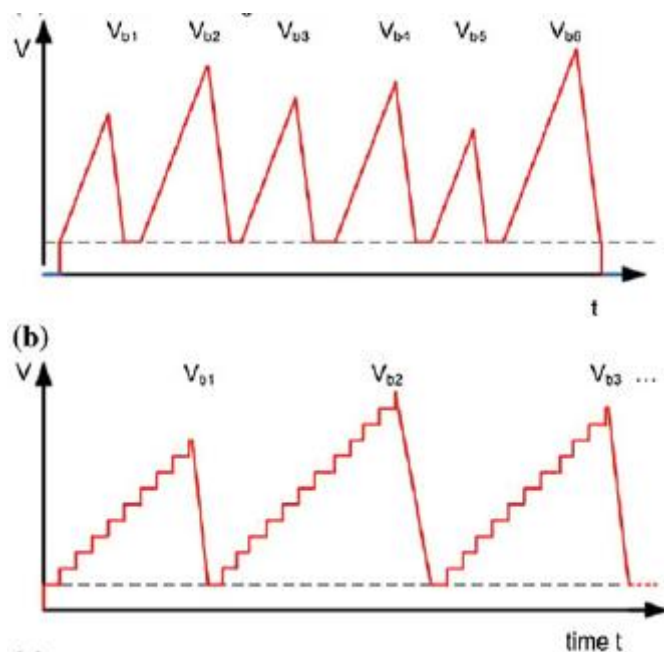
Para todos os valores de disrupção registados é necessário aplicar os fatores de correção em função das condições atmosféricas presentes na altura do ensaio, conforme a descrição feita acima para o ensaio a seco, mas nenhum fator de correção de humidade deve ser aplicado a ensaios sob chuva.

#### **5.4. MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA ENSAIOS ELÉTRICOS**

As descargas elétricas e a quebra de isolamentos são processos estocásticos, que devem ser descritos por métodos estatísticos. Os ensaios podem ser realizados com tensões aumentando de forma crescente até ao contornamento, Método de Stress Progressivo, com aplicação múltipla de tensões pré-determinadas e estimativas de probabilidades de degradação, método de múltiplos níveis, ou por aplicação de um número  $n$  de stresses de voltagem de igual valor agrupados e dependendo dos resultados dessas aplicações, aumenta-se ou diminui-se a tensão a aplicar, método up-and-down. (60060-1, 2010)

Para o tratamento estatístico dos resultados desta dissertação foi escolhido o Método de Stress Progressivo que consiste na aplicação de uma tensão crescente contínua ao objeto de ensaio até ocorrer a descarga disruptiva. Pode-se aplicar a tensão de forma contínua ou em

pequenos passos até acontecer o contornamento do isolador. É importante respeitar no mínimo 60 segundos entre ensaios para que os resultados não sejam afetados por fenômenos do ensaio anterior. Isto resume-se nos gráficos da figura 34. O valor da tensão de contornamento do objeto de ensaio é obtido pela média aritmética dos, 10 ou mais, ensaios realizados.



**Figura 34 Representação gráfica do método de stress progressivo [10]**

## **5.5. VERIFICAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DOS APARELHOS DE ENSAIO**

Visto querer resultados fidedignos, antes da realização dos ensaios de contornamento foi verificada se a aparelhagem de medida do LAT estava bem calibrada. Para isso utiliza-se o espirómetro de esferas, em que a grandeza da tensão é calculada de acordo com a distância entre as esferas, quando ocorre uma descarga.

Para verificar se a aparelhagem está bem calibrada temos que consultar a norma IEC 60052, que nos diz que para aparelhagem certificada o erro de medida deve ser inferior a 3%, já depois de aplicada a correção de todos fatores atmosféricos.

A montagem das esferas e dos aparelhos de medida deve respeitar as condições descritas no subcapítulo dedicado ao Espirómetro de esferas e o valor de tensão de pico a que ocorre

o escorvamento, neste caso para esferas de 75 cm de diâmetro, é nos dado pela tabela nº 2 da norma IEC 60052.

Para as condições atmosféricas, os valores tidos como referência (IEC 60052, ponto 6) são:

- Temperatura de referência:  $t_0 = 20^\circ\text{C}$
- Pressão atmosférica absoluta:  $p_0 = 101.3 \text{ kPa}$
- Humidade absoluta:  $5 \text{ g/m}^3 < h_0 < 12 \text{ g/m}^3$  com valor médio de  $h_0 = 8.5 \text{ g/m}^3$

Os fatores de correção da temperatura, pressão atmosférica e humidade são calculados por meio de relações matemáticas descritas na norma IEC 60052.

A tensão de escorvamento com a correção dos fatores atmosféricos é nos dada pela seguinte expressão:

$$U_0 = \frac{U_{esc}}{\delta \times K} \quad (9)$$

Em que  $\delta$  é a correção da densidade do ar, em função de  $P$  e  $P_0$ , ambas pressões atmosféricas e  $t$  e  $t_0$ , ambas temperaturas em graus Celcius:

$$\delta = \frac{P}{P_0} \times \frac{273+t_0}{273+t} \quad (10)$$

Sendo,  $k$ , o fator de correção da temperatura (a utilização deste fator de correção é para ensaios à frequência industrial):

$$k = 1 - (0.002 \times ((\frac{h}{\delta}) - 8.5)) \quad (11)$$

De seguida são apresentados os resultados da tensão de escorvamento para as distâncias entre esferas de 4,5;6,5 e 11 cm, com o respetivo erro.

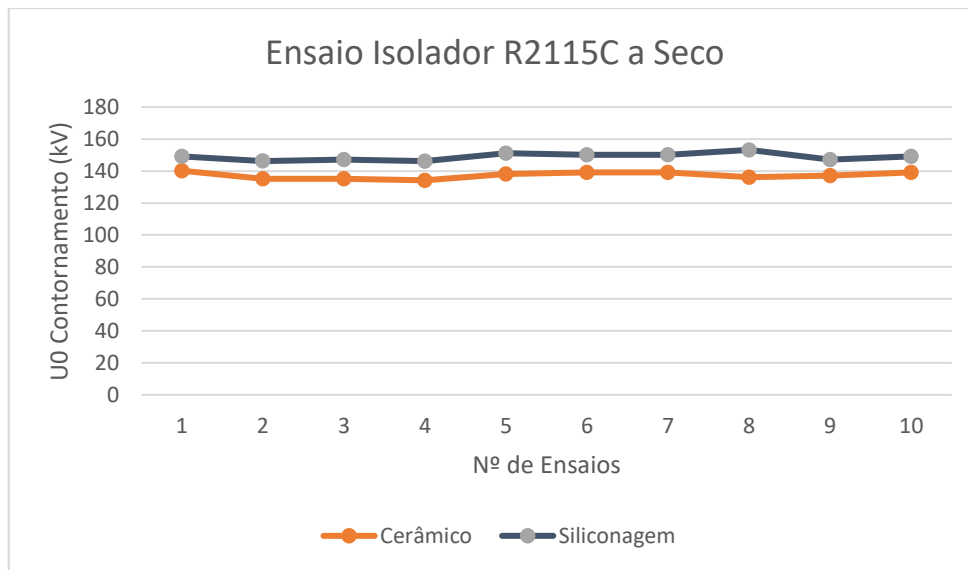
**Tabela 7 Erro da tensão de escorvamento mediante as distâncias entre esferas do espirómetro**

Distância entre esferas do espirómetro (cm)	Erro (%)
4,5	1,97
6,5	0,84
11	3,05

Como podemos observar nas tabelas acima os erros apresentados são inferiores a 3 % nas 2 primeiras séries de ensaios e igual a 3 % na 3ª série de ensaio. Conclui-se que a aparelhagem está bem calibrada e cumpre os requisitos da norma IEC 60052. As tabelas completas associadas aos cálculos dos erros da tabela 7 podem ser vistas no anexo A desta dissertação.

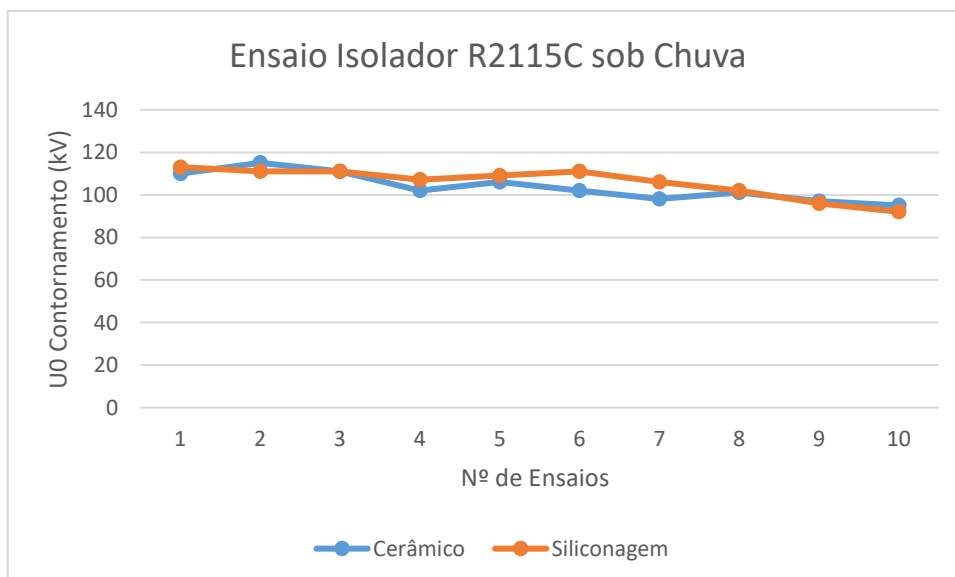
## **5.6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS**

Após a realização dos ensaios experimentais seguindo estritamente as condições de procedimento do capítulo 5.3, podemos fazer umas breves comparações sobre o desempenho dos isoladores testados quer nos ensaios a seco quer nos ensaios sob chuva. Quero desde já realçar que todos os valores da tensão de contornamento apresentados em todos os gráficos abaixo representados é um valor já com a correção dos fatores atmosféricos. Pode-se encontrar as tabelas no anexo B desta dissertação, na qual se apresentam todos os valores dos coeficientes necessários segundo as fórmulas apresentadas no capítulo 5.3.1 para a correção atmosférica do valor da tensão de contornamento.



**Figura 35** Comparação gráfica da tensão de contornamento num ensaio a seco de um isolador R2115C cerâmico e um isolador R2115 C coberto com tinta de silicone

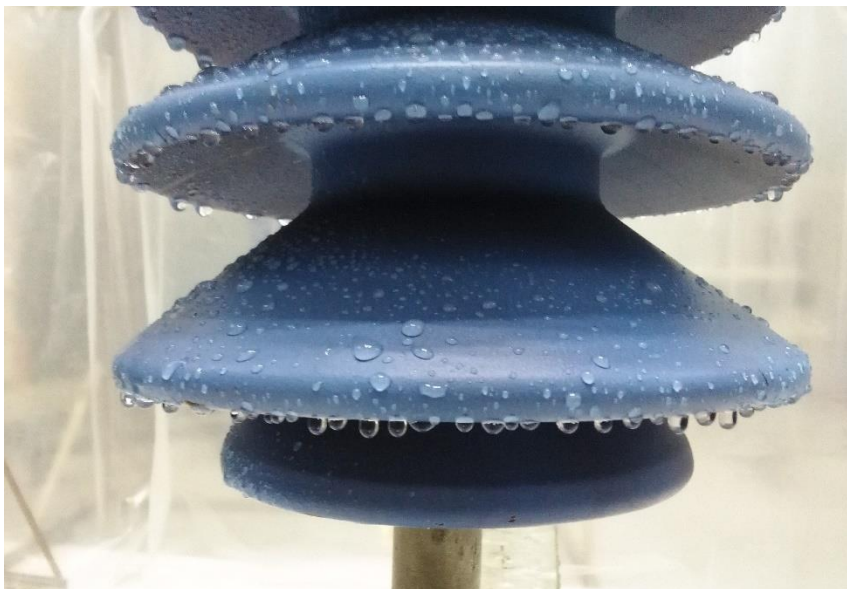
Do gráfico da figura 35 podemos dizer que ao aplicar a tinta de silicone, esta traz uma ligeira vantagem comparativamente com o isolador cerâmico convencional ao nível da rigidez dielétrica do isolador, visto que a tensão de contornamento é ligeiramente mais alta. Isto pode ser justificado pelo aumento milimétrico do diâmetro das saias do isolador pela aplicação da camada de tinta de silicone.



**Figura 36** Comparação gráfica da tensão de contornamento num ensaio sob chuva de um isolador R2115C cerâmico e um isolador R2115 C coberto com tinta de silicone

Um dos principais objetivos desta dissertação era verificar se ao recobrir um isolador cerâmico com tinta de silicone, este tinha um melhor comportamento dielétrico sob chuva. Do gráfico da figura 36 conclui-se que a siliconagem é vantajosa comparativamente com o isolador cerâmico convencional ao nível da rigidez dielétrica do isolador, visto que a tensão de contornamento é ligeiramente mais alta em geral, apenas no segundo e décimo ensaio isso não se verificou.

O melhor comportamento do isolador com recobrimento de tinta de silicone sob chuva do isolador pode ser explicado pela hidrofobicidade criada na superfície do isolador que evita mais eficazmente a formações de “lençóis” de água na superfície do isolador, que facilita o cortamento elétrico. Podemos ver em pormenor a hidrofobicidade do isolador na figura 37.

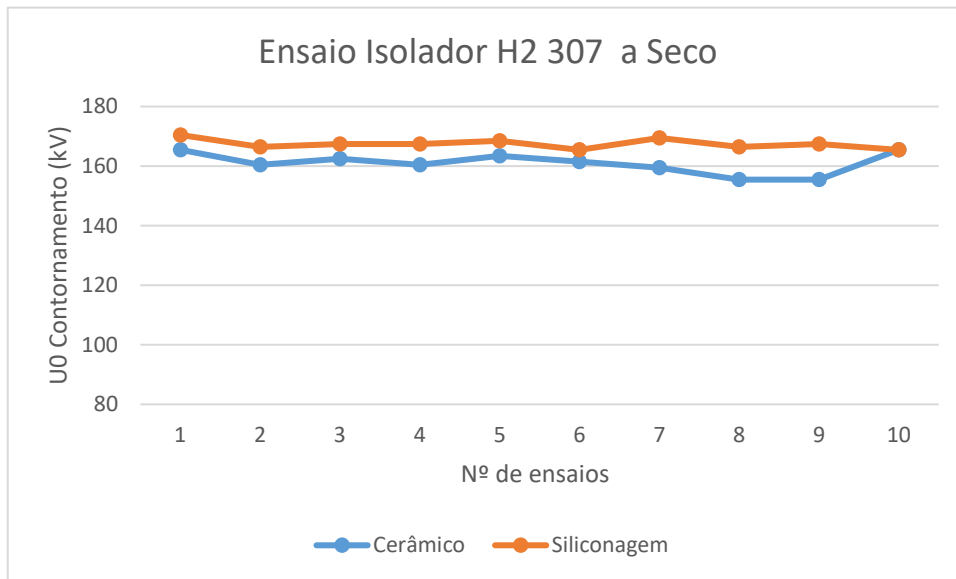


**Figura 37 Hidrofobicidade do isolador cerâmico pintado com tinta de silicone**

Os resultados da recobertura com tinta de silicone não se destacam tanto porque foram utilizados isoladores novos e o isolador cerâmico utilizado ainda possui uma superfície bastante cristalizada e sem atrito, o que se reflete num rápido escoamento da água. Penso que se fosse possível fazer uma comparação da recobertura de um isolador cerâmico usado com outro isolador cerâmico usado com desgaste dos agentes atmosféricos as vantagens da siliconagem destacar-se-iam ainda mais.

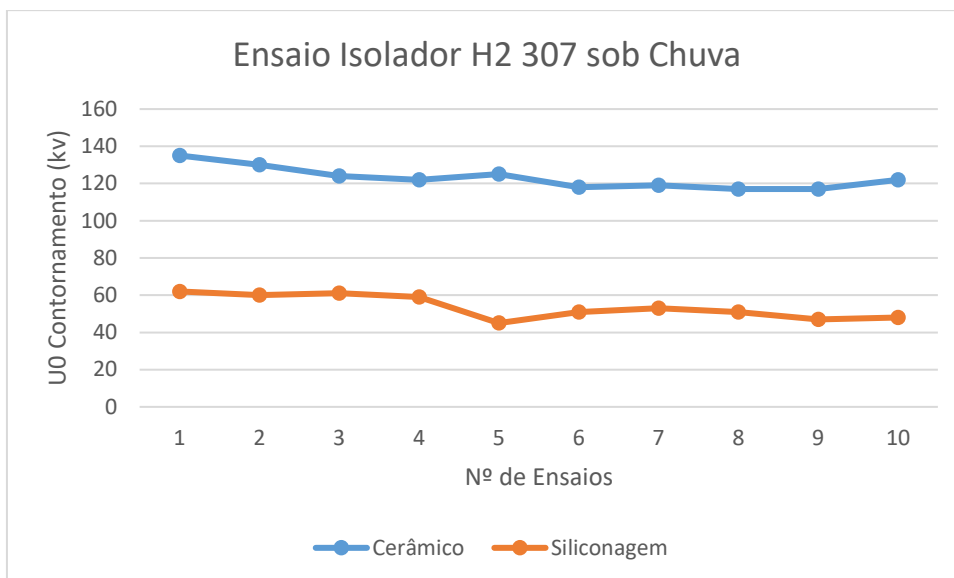
Do gráfico da figura 37 podemos dizer que ao aplicar a tinta de silicone, esta confere uma vantagem significativa comparativamente com o isolador cerâmico convencional ao nível

da rigidez dielétrica do isolador, visto que a tensão de contornamento é ligeiramente mais alta.



**Figura 38 Comparação gráfica da tensão de contornamento num ensaio a seco de um isolador H2 307 cerâmico e um isolador H2 307 coberto com uma tinta fibrada de silicone**

Ao aplicar-se a tinta com fibras de silicone verificou-se que houve um decréscimo muito acentuado da rigidez dielétrica do isolador, visto que a tensão de contornamento caiu em média 69.23 kV.



**Figura 39** Comparação gráfica da tensão de contornamento num ensaio sob chuva de um isolador H2 307 cerâmico e um isolador H2 307 coberto com uma tinta fibrada de silicone

A superfície bastante rugosa do isolador recoberto com tinta de fibras de silicone, faz com que o escoamento de água seja muito mais lento. Isto simula na perfeição a acumulação de detritos da poluição atmosférica que se acumula ao longo dos anos na superfície do isolador, embora de uma forma exagerada.

A camada de sedimentos não permite escoar a água de forma rápida e retira a hidrofobicidade ao isolador que é muito importante nos dias de chuva, sendo mais facilmente contornado, o que faz diminuir a fiabilidade do sistema elétrico de energia.

# 6. CONCLUSÕES

## 6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um dos objetivos que motivou o desenvolvimento deste trabalho foi a oportunidade de estudar mais a fundo os ensaios elétricos de alta tensão que são de extrema importância no estudo das condições e fiabilidade dos sistemas elétricos de energia. Além disso ao fazer um estágio no Laboratório de Alta Tensão da FEUP tive a tarefa de desenvolver um sistema de ensaio de equipamentos elétricos sob chuva cumprindo estritamente os requisitos normativos nacionais e internacionais para ensaios de alta tensão de aparelhagem elétrica, para aumentar o tipo de ensaios que é possível realizar no LAT.

O conhecimento das características dos materiais isolantes é fundamental para efetuar dimensionamentos em concordância com as condições esperadas em serviço e para o tipo de aplicação. A determinação da rigidez dielétrica dos isoladores através de ensaios elétricos em ambiente laboratorial permite elucidar sobre o comportamento dos mesmos em condições representativas das enfrentadas em serviço. Tendo em conta o comportamento dielétrico dos materiais, esta dissertação aborda um estudo do comportamento dielétrico dos isoladores cerâmicos onde foram realizados ensaios experimentais com isoladores sob chuva e verificada a viabilidade técnica da implementação de isoladores de superfície pintada a tinta de silicone nas redes de energia.

As experiências elétricas elaboradas pretendem comprovar que a capacidade dielétrica dos isoladores cerâmicos é fortemente afetada pela condensação de água na sua superfície e por fatores de poluição ambiental.

Ao nível dos ensaios efetuados, tal como esperado, o recobrimento da superfície do isolador com tinta de silicone é vantajoso comparativamente com o isolador cerâmico convencional ao nível da rigidez dielétrica do isolador nos ensaios a seco e sob chuva, visto que a tensão de contornamento é ligeiramente mais alta, de modo geral, o que se verifica nos casos de estudo apresentados.

O melhor comportamento dielétrico do isolador com recobrimento de tinta de silicone sob chuva do isolador pode ser explicado pela hidrofobicidade na superfície do isolador que evita mais eficazmente a formação de “lençóis” de água, o que dificulta o contornamento elétrico.

Os resultados da recobertura com tinta de silicone não se destacam tão eficazmente porque foram utilizados isoladores novos e o isolador cerâmico utilizado ainda possui uma superfície bastante cristalizada e com muito pouco atrito, o que se reflete num rápido escoamento da água. Numa comparação futura de um isolador cerâmico usado siliconizado com outro isolador cerâmico usado desgastado pelos agentes atmosféricos, as vantagens da siliconagem destacar-se-iam ainda mais.

No caso de estudo onde foi aplicada a tinta com fibras de silicone, esta, simula na perfeição a acumulação de detritos da poluição atmosférica que se acumula ao longo dos anos na superfície do isolador. Ao retirar a hidrofobicidade ao isolador, isso reflete-se no decréscimo da tensão de contornamento bastante acentuado nos dias de chuva, sendo mais fácil o contornamento do isolador ou da cadeia de isoladores fazendo diminuir a fiabilidade do sistema elétrico de energia.

## **6.2. TRABALHOS FUTUROS**

Os fatores ambientais num serviço de distribuição ou transporte de energia têm cada vez mais importância para o bom funcionamento das linhas e da qualidade de serviço do operador de rede. Visto que a densidade populacional está cada vez mais concentrada nas zonas costeiras, como é o caso de Portugal, isso faz que conseqüentemente o número de linhas de distribuição de energia nas zonas à beira-mar aumentem e essas estão sujeitas à influência do nevoeiro salino que é um fator que afeta significativamente o aumento dos contornos elétricos de isoladores, podendo provocar interrupções no fornecimento de energia. Também tem-se verificado nos últimos anos o aumento de fenómenos intempestivos como chuvas de alta densidade e secas extremas.

Como perspectivas futuras, entende-se que seria de interesse dotar o Laboratório de alta tensão da FEUP com um sistema de ensaio de nevoeiro salino. Além disso era interessante continuar o estudo de outros tipos de siliconagem para aplicação sobre isoladores cerâmicos e fazer uma análise técnico-económica da pintura de isoladores cerâmicos instalados na rede com tinta de silicone, aquando a sua manutenção.



## *Referências Documentais*

- [1] Aluno FEUP, EE97153 (2008). <https://web.fe.up.pt/~ee97153/Isol.htm>, data de consulta a 02-03- 2017.
- [2] Blog Uma química irresistível. (2011). <http://umaquimicairresistivel.blogspot.pt/quimica-da-agua-do-mar.html>, data de consulta a 25-04- 2017.
- [3] EDP.(2007).[http://www.edpdistribuicao.pt/pt/profissionais/projecto tipoSE\\_AT\\_MT/documentacaonormativa](http://www.edpdistribuicao.pt/pt/profissionais/projecto_tipoSE_AT_MT/documentacaonormativa), data de consulta a 12-02- 2017.
- [4] ELO Produtos Elétricos. (2008). <http://eloeletrico.com.br/portal/modules/rmms/categos.php?idc=34>, data de consulta a 15-07- 2017.
- [5] Farzaneh, Masoud; William A. (2009). *Insulators for Icing and Polluted Environments* Chisholm John Wiley & Sons. Quebec:Canada.
- [6] Finishtec. (2013). <http://finishtec.com.br/isolador-suporte/>, data de consulta a 10-02- 2017.
- [7] Fonseca Bruno. (2012). *Influência do Nevoeiro Salino na Degradação de Materiais Cerâmicos Aplicados em Construções*.Faculdade de Ciências e tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.
- [8] IEC. (2002). *IEC 60052 - Voltage Measurement by Means of standard air gaps*.
- [9] IEC.(2008). *IEC 60815-1:Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - Part 1: Definitions, information and general principles*.
- [10] IEC.(2010). *IEC 60060-1-General Definitions and test requirements*.

- [11] IPMA . (Agosto 2011)  
<https://www.ipma.pt/pt/oclima/observatorio.secas/spi/apresentacao/definicao>, data de consulta a 20-07- 2017.
- [12] IPMA. (2014).  
[https://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20150127/jaWbvqpLKYSXxPvTfaAW/cli\\_20140101\\_20141231\\_pcl\\_aa\\_co\\_pt.pdf](https://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20150127/jaWbvqpLKYSXxPvTfaAW/cli_20140101_20141231_pcl_aa_co_pt.pdf), data de consulta a 20-07- 2017.
- [13] IPMA. (2015).  
[https://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20160118/EHqOkNyqVxeHzzqfavaa/cli\\_20150101\\_20151230\\_pcl\\_aa\\_co\\_pt.pdf](https://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20160118/EHqOkNyqVxeHzzqfavaa/cli_20150101_20151230_pcl_aa_co_pt.pdf), data de consulta a 20-07- 2017.
- [14] IPMA. (Novembro 2016).  
[http://www.gpp.pt/images/Agricultura/Estatisticas\\_e\\_Analises/Indicadores\\_AgroAmb/Seca/Seca\\_nov2016\\_IPMA.pdf](http://www.gpp.pt/images/Agricultura/Estatisticas_e_Analises/Indicadores_AgroAmb/Seca/Seca_nov2016_IPMA.pdf), , data de consulta a 20-07- 2017.
- [15] JOCLAMAR Materiais Eléctricos. (2017). <http://joclamar.com.br/produto/isolador-pilar-porcelana-vefrificado-25kv-m20>, data de consulta a 20-12- 2016.
- [16] Mário Marcão.(2013). <https://www.youtube.com/watch?v=yJ9OLY3hoec>, data de consulta a 12-03- 2017.
- [17] Masoud Farzaneh.(2008). *Atmospheric Icing of Power Networks*. Springer Science.
- [18] Materiaisufpr. (2008). <http://materiaisufpr.blogspot.pt/2008/11/gerador-de-impulso-ensaios-eltricos-em.html>, , data de consulta a 26-05- 2017.
- [19] Queirós, J. P. (2013). *Análise comparativa do comportamento dielétrico dos isoladores compósitos com isoladores em materiais convencionais*. Porto: FEUP.
- [20] Queirós, N. S. (2013). Memória descritiva do Laboratório de Alta tensão. Porto.
- [21] Rosmer Ocando Morales. (2007). <http://www.monografias.com/trabajos66/generador-impulsos-atmosfericos/generador-impulsos-atmosfericos2.shtml>, data de consulta a 12-06- 2017.

- [22] Silva, R. L. (2011). Lavagem de isoladores em linhas de transmissão.Porto.
- [23] Sousa, P. E. (2006). *Problemática do Isolamento nas Linhas de Muito Alta Tensão nas Zonas Poluídas*. Porto:FEUP.
- [24] Thomazini, D. (2009). *A hidrofobicidade do setor elétrico de alta tensão*. Universidade São Paulo.Brasil.

## Anexo A. Calibração dos Aparelhos de Ensaio

Neste anexo são descritos alguns dos pormenores do desenvolvimento no cálculo da tensão de escorvamento com a correção dos fatores atmosféricos para as distâncias entre esferas de 4,5;6,5 e 11 cm, com o respetivo erro. Todos os valores registados nestas tabelas foram registados durante os ensaios de calibração dos aparelhos de ensaio e calculados segundo as fórmulas apresentadas no capítulo 5.5.

**Tabela 8 Erro associado à tensão medida para a distância entre esferas de 4,5 cm**

Distância entre esferas de 4,5 cm					
Temp ('C)	Humidade (%)	Pressão (kPa)	Humidade absoluta (g/m3)	Temp ('C) Normalizada	Pressão (KPa) Normalizada
20,6	54	100,7	9,63	20	101,3
Nível de Tensão em ensaio					
Vp			Vrms		
125			88,38834765		
Nº de Ensaio			kV (Voltmetro Comando)		
1			88		
2			88		
3			86		
4			86		
5			90		
6			91		
7			90		
8			91		
9			91		
10			91		
Média			89,2		
$\delta$		k		U c/factores de correcção	
0,992045507		0,997585568		90,13284975	
Erro (%)		1,973678822			

**Tabela 9 Erro associado à tensão medida para a distância entre esferas de 6,5 cm**

Distância entre esferas de 6,5 cm					
Temp ('C)	Humidade (%)	Pressão (kPa)	Humidade absoluta (g/m3)	Temp ('C) Normalizada	Pressão (KPa) Normalizada
19,6	56	100,7	9,42	20	101,3
Nível de Tensão em ensaio					
Vp			Vrms		
177			125,1579003		
Nº de Ensaio			kV (Voltmetro Comando)		
1			126		
2			124		
3			123		
4			126		
5			126		
6			125		
7			126		
8			126		
9			127		
10			125		
Média			125,4		
$\delta$		k		U c/factores de correcção	
0,995435956		0,998073619		126,2180994	
Erro (%)		0,847089237			

**Tabela 10 Erro associado à tensão medida para a distância entre esferas de 11 cm**

Distância entre esferas de 11 cm					
Temp ('C)	Humidade (%)	Pressão (kPa)	Humidade absoluta (g/m3)	Temp ('C) Normalizada	Pressão (KPa) Normalizada
19,8	39	100,9	6,64	20	101,3
Nível de Tensão em ensaio					
Vp			Vrms		
290			205,0609665		
Nº de Ensaio			kV (Voltmetro Comando)		
1			211		
2			212		
3			210		
4			213		
5			213		
6			211		
7			212		
8			210		
9			212		
10			210		
Média			211,4		
$\delta$		k		U c/factores de correcção	
0,996731696		1,003676455		211,3162903	
Erro (%)		3,050470259			

## Anexo B. Fatores de correção atmosférica da tensão de contornamento

Neste anexo são apresentadas as medições registradas em ambiente laboratorial para a aplicação dos fatores de correção atmosféricos da tensão de contornamento dos isoladores. Todos os valores registrados nestas tabelas foram registrados durante os ensaios experimentais e calculados segundo as fórmulas apresentadas no capítulo 5.3.1. Os gráficos comparativos apresentados no ponto 5.6 são baseados nos valores da tensão corrigida presente em cada uma das tabelas abaixo apresentadas.

**Tabela 11 Fatores de correção atmosférica da tensão contornamento do Isolador R2115C cerâmico, a seco**

Temp (°C)	Humidade (%)	Pressão (mbar)	Humidade absoluta (g/m <sup>3</sup> )	Temp (°C) Normalizada	Pressão (mbar) Normalizada
24,4	44	1005	9,760026771	20	1013
Nº de Ensaio		kV (Voltmetro Comando)		Ucorrigo	
1		140,00		140,20	
2		135,00		135,19	
3		135,00		135,19	
4		134,00		134,19	
5		138,00		138,20	
6		139,00		139,20	
7		139,00		139,20	
8		136,00		136,20	
9		137,00		137,20	
10		139,00		139,20	
Média		137,20		137,40	
$\delta$	K	k1	K2	Kt	
0,977424617	0,987825426	0,999061184	0,999496265	0,998557922	

**Tabela 12 Fatores de correção atmosférica da tensão contornamento do Isolador R2115C  
siliconagem, a seco**

Temp ('C)	Humidade (%)	Pressão (mbar)	Humidade absoluta (g/m3)	Temp ('C) Normalizada	Pressão (mbar) Normalizada
24,4	44	1005	9,760026771	20	1013
Nº de Ensaio		kV (Voltmetro Comando)		Ucorrigo	
1		149,00		149,22	
2		146,00		146,21	
3		147,00		147,21	
4		146,00		146,21	
5		151,00		151,22	
6		150,00		150,22	
7		150,00		150,22	
8		153,00		153,22	
9		147,00		147,21	
10		149,00		149,22	
Média		148,80		149,01	
$\delta$	K	k1	K2	Kt	
0,977424617	0,987825426	0,999061184	0,999496265	0,998557922	

**Tabela 13 Fatores de correção atmosférica da tensão contornamento do Isolador R2115C cerâmico, sob chuva**

Temp (°C)	Humidade (%)	Pressão (mbar)	Temperatura da água (°C)	Temp (°C) Normalizada	Pressão (mbar) Normalizada
24	46	1005	21,6	20	1013
Nº de Ensaio		kV (Voltmetro Comando)		Ucorrvido	
1		110,00		110,10	
2		115,00		115,10	
3		111,00		111,10	
4		102,00		102,09	
5		106,00		106,09	
6		102,00		102,09	
7		98,00		98,09	
8		101,00		101,09	
9		97,00		97,09	
10		95,00		95,08	
Média		103,70		103,79	
$\delta$		k1		Kt	
0,978741013		0,999120527		0,999120527	

**Tabela 14 Fatores de correção atmosférica da tensão contornamento do Isolador R2115C  
Siliconagem, sob chuva**

Temp (°C)	Humidade (%)	Pressão (mbar)	Temperatura da água (°C)	Temp (°C) Normalizada	Pressão (mbar) Normalizada
24,3	44	1005	21,5	20	1013
Nº de Ensaio		kV (Voltmetro Comando)		Ucorrigo	
1		113,00		113,10	
2		111,00		111,10	
3		111,00		111,10	
4		107,00		107,10	
5		109,00		109,10	
6		111,00		111,10	
7		106,00		106,10	
8		102,00		102,09	
9		96,00		96,09	
10		92,00		92,09	
Média		105,80		105,90	
$\delta$		k1		Kt	
0,977753384		0,99907606		0,99907606	

**Tabela 15 Fatores de correção atmosférica da tensão contornamento do Isolador H2 307 cerâmico, a seco**

Temp (°C)	Humidade (%)	Pressão (mbar)	Humidade absoluta (g/m3)	Temp (°C) Normalizada	Pressão (mbar) Normalizada
19,9	35	1009	5,995051501	20	1013
Nº de Ensaio		kV (Voltmetro Comando)		Ucorrigo	
1		165,00		165,48	
2		160,00		160,46	
3		162,00		162,47	
4		160,00		160,46	
5		163,00		163,47	
6		161,00		161,46	
7		159,00		159,46	
8		155,00		155,45	
9		155,00		155,45	
10		165,00		165,48	
Média		160,50		160,96	
$\delta$	K	k1	K2	Kt	
0,996391398	0,940201163	0,999840425	0,997281692	0,997122551	

**Tabela 16 Fatores de correção atmosférica da tensão contornamento do Isolador H2 307**

**Siliconagem, a seco**

Temp ('C)	Humidade (%)	Pressão (mbar)	Humidade absoluta (g/m3)	Temp ('C) Normalizada	Pressão (mbar) Normalizada
19,4	37	1009	6,154691861	20	1013
Nº de Ensaio		kV (Voltmetro Comando)		Ucorrigo	
1		170,00		170,46	
2		166,00		166,45	
3		167,00		167,45	
4		167,00		167,45	
5		168,00		168,45	
6		165,00		165,44	
7		169,00		169,45	
8		166,00		166,45	
9		167,00		167,45	
10		165,00		165,44	
Média		167,00		167,45	
$\delta$	K	k1	K2	Kt	
0,998095214	0,941997251	0,999916981	0,997401449	0,997318646	

**Tabela 17 Fatores de correção atmosférica da tensão contornamento do Isolador H2 307 cerâmico, sob chuva**

Temp (°C)	Humidade (%)	Pressão (mbar)	Temperatura da água (°C)	Temp (°C) Normalizada	Pressão (mbar) Normalizada
19,9	40	1003	21,6	20	1013
Nº de Ensaio		kV (Voltmetro Comando)		Ucorrído	
1		135,00		135,06	
2		130,00		130,05	
3		124,00		124,05	
4		122,00		122,05	
5		125,00		125,05	
6		118,00		118,05	
7		119,00		119,05	
8		117,00		117,05	
9		117,00		117,05	
10		122,00		122,05	
Média		122,90		122,95	
$\delta$		k1		Kt	
0,990466375		0,999585868		0,999585868	

**Tabela 18 Fatores de correção atmosférica da tensão contornamento do Isolador H2 307  
Siliconagem, sob chuva**

Temp (°C)	Humidade (%)	Pressão (mbar)	Temperatura da água (°C)	Temp (°C) Normalizada	Pressão (mbar) Normalizada
19,9	41	1003	21,6	20	1013
Nº de Ensaio		kV (Voltmetro Comando)		Ucorrigo	
1		62,00		62,03	
2		60,00		60,02	
3		61,00		61,03	
4		59,00		59,02	
5		45,00		45,02	
6		51,00		51,02	
7		53,00		53,02	
8		51,00		51,02	
9		47,00		47,02	
10		48,00		48,02	
Média		53,70		53,72	
$\delta$		k1		Kt	
0,990466375		0,99958604		0,99958604	

