FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Comportamento experimental de pára-raios equipados com dispositivo de pré-emissão de descarga

Francisco Cupertino de Miranda Gomes

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor António Carlos Sepúlveda Machado e Moura

13 de Abril de 2017

© Francisco Cupertino de Miranda Gomes, 2017

Resumo

Esta dissertação realizada no âmbito do Mestrado de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores tem como principal objetivo estudar o comportamento de dispositivos de pré-emissão de descarga, comparando-os com dispositivos tradicionais, como os terminais aéreos de Franklin.

Este tipo de dispositivo de proteção contra descargas atmosféricas é relativamente recente e os seus defensores afirmam que consegue ser mais eficaz do que os dispositivos tradicionais que já vigoram, como principais dispositivos de proteção, há cerca de 200 anos. Tudo isto tem sido fonte de grande controvérsia no seio da comunidade científica.

Esta dissertação tem também o intuito de se limitar ao estudo e análise dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais a estes dois tipos de dispositivos. Comparando-os ,posteriormente, e daí retirar as conclusões, tentando sempre tomar uma posição imparcial e independente.

Em primeiro lugar, há uma necessidade de expor e compreender temas que foram estudados para a elaboração da dissertação que envolvem desde os fenómenos físicos referentes à formação de trovoadas, passando pela explicação relativa às descargas propriamente ditas, até à avaliação de risco e consequente dimensionamento de proteções. Nesta primeira parte são também descritos, ainda que por brevemente, os equipamentos presentes no LAT-FEUP, focando-se um pouco mais nos ensaios ao choque.

Depois desta primeira explicação apresentam-se algumas considerações relativas à NP4426 que são fundamentais para uma melhor compreensão de toda a montagem envolvida durante os ensaios a estes dispositivos. Apesar da dissertação se limitar a analisar o comportamentos dos para-raios e não a tecer qualquer comentário ou consideração relativamente à norma, esta foi seguida de forma bastante rigorosa, de maneira a poder comparar os resultados com quaisquer estudos passados ou futuros. Acresce o facto deste ser a norma que vigora em Portugal, quando consideramos dispositivos de ionização não radioativos, como é o caso.

Nesta segunda parte incluem-se também todas as montagens relativas aos ensaios e os ensaios propriamente ditos. Durante os ensaios e com vista a compreender melhor de que forma certos factores exteriores, como é o caso do sistema de terras ou mesmo as condições atmosféricas, poderiam influenciar o desempenho deste tipo de dispositivo, estes foram ensaiados alterando alguns desses aspetos, respeitando sempre a norma. Foram submetidos a ensaios mais do que um tipo de dispositivo ionizante, disponibilizado por diferentes empresas que se preferem manter como anónimas.

A última parte da dissertação é então dedicada à análise dos resultados obtidos e posterior conclusão de trabalhos e trabalhos futuros. Também no fim do documento, apresentam-se vários anexos que podem trazer informações adicionais para qualquer dúvida que possa surgir.

Durante este longo caminho, vários foram problemas que surgiram, mas como futuro engenheiro, foi também grande a satisfação de os conseguir ultrapassar.

Abstract

This dissertation carried out in the scope of the Master of Electrical and Computer Engineering has as main objective to study the behavior of pre-emitting devices of discharge, comparing them with traditional devices such as Franklin's aerial terminals.

This type of lightning protection device is relatively recent and its supporters claim that it can be more effective than the traditional devices already in place as the main protection devices around 200 years ago. All this has been the source of great controversy within the scientific community.

This dissertation is also intended to study and analyze the results obtained in the laboratory tests to these two types of devices. Comparing them later, and then draw the conclusions, always trying to take an impartial and independent position.

In the first place, there is a need to present and understand topics that have been studied for the elaboration of the dissertation that involve from the physical phenomena related to the formation of thunderstorms, through the explanation of the actual discharges, to the risk assessment and consequent dimensioning of Protection. In this first part are also described, albeit briefly, the equipments present in the LAT-FEUP, focusing a little more on the tests to the shock.

After this first explanation we present some considerations regarding the NP4426 that are fundamental for a better understanding of all the assembly involved during the tests on these devices. Although the dissertation was limited to analyzing the behavior of the lightning rods and did not provide any comment or consideration regarding the standard, it was followed in a very rigorous way, in order to compare the results with any past or future studies. In addition, this is the norm that applies in Portugal when we consider non-radioactive ionization devices, as is the case.

This second part also includes all assemblies relating to the tests and the tests themselves. During the trials and in order to better understand how certain external factors, such as the earth system or even the atmospheric conditions, could influence the performance of this type of device, they were tested by altering some of these aspects, always respecting the standard. More than one type of ionizing device has been tested, provided by different companies that are preferred to remain anonymous.

During this long journey, several were problems that arose, but as future engineer, it was also great satisfaction to overcome them.

Agradecimentos

Os agradecimentos... não são uma tarefa fácil. E não o são porquê? Obviamente que a elaboração desta dissertação não teria sido possível sem a colaboração de várias pessoas, pessoas estas, das quais tenho todo gosto que façam parte da minha vida e tenho um orgulho enorme em poder dizer que me ajudaram a ultrapassar mais um obstáculo. Mas a dificuldade não está em lhes agradecer, a dificuldade está na possibilidade de me esquecer de lhes agradecer, pois o caminho até aqui, não se resume aos últimos meses, mas a todos os anos que essas pessoas fizeram parte da minha vida.

Em primeiro lugar, queria agradecer ao Professor António Machado e Moura, que com muito orgulho posso dizer que foi o meu orientador. Um ser humano excecional, com o coração do tamanho do mundo. Queria lhe agradecer todos os conselhos e orientações que me deu e penso que posso dizer que é um exemplo para mim enquanto Engenheiro e pessoa.

Aos colaboradores do LAT-FEUP, Engenheiro Fábio Branco e Tomás Sapage, que sinceramente para mim, são muito mais que isso, são amigos. Agradecer-lhes por todas as horas que o Fábio passou comigo a encher mangueiras, a preparar soluções, a medir resistências... Agradecer-lhes por todas as noites que passamos, eu e o Tomás, dentro do laboratório, chegando a passar 24 horas seguidas na faculdade a realizar ensaios. Agradecer-lhes por todos os conselhos e orientações também, porque apesar de não ser oficial, eles foram os meus co-orientadores.

Quero também agradecer a disponibilidade e paciência de vários membros da faculdade, que fazem parte do dia-a-dia de todos nós, mas nestes momentos é que nos apercebemos da sua contribuição. Ao Sr.Henrique, ao Sr. Ramiro, entre outros que me ajudaram a resolver situações que pareciam não ter solução possível.

Quero agradecer aos Departamentos de Química, tanto da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto como do Isep, pela disponibilidade que tiveram para me ajudar no desenvolvimento das resistências aquosas, um Muito Obrigado.

Não posso claro, não deixar de agradecer a todos os meus amigos, amigos que fizeram e fazem de mim o que sou hoje, tanto amigos de toda uma vida, como amigos que fui conhecendo ao longo do meu percurso académico e que me ajudaram a percorre-lo. Especialmente, gostaria de agradecer, aqueles que me acompanharam nas longas noites de trabalho na faculdade durante a elaboração desta dissertação... a ti André, Tiago e Zé Richi, um muito obrigado!

Por último, talvez a quem mais moldou a pessoa que sou hoje, gostaria de agradecer à minha família. Ao meu irmão, que se tornou um exemplo, para mim, do que é um engenheiro bem sucedido, sem nunca descurar a sua personalidade, e que me deu ainda mais vontade de terminar o meu curso e dedicar-me à Engenharia o resto da minha vida. Aos meus pais que me aturaram nas alturas mais complicadas desta dissertação e da vida, e eu, apesar de eles não saberem, sei o quão complicado posso ser. E a todos os outros, mais uma vez, um Muito Obrigado!

A todas as pessoas que não agradeci... Um Muito Obrigado!

Francisco Cupertino de Miranda Gomes

"Mystery creates wonder
and wonder
is the basis of man's desire to understand"

Neil Armstrong

Conteúdo

1 Introdução **1**
- 1.1 Motivação e Objectivos . . . 2
- 1.2 Estrutura da Dissertação . . . 2

2 Memória Descritiva do Laboratório de Alta Tensão **5**
- 2.1 Contextualização Histórica do LAT . . . 5
- 2.2 Atividades de um Laboratório de Alta Tensão . . . 6
  - 2.2.1 Equipamentos do LAT-FEUP . . . 8
- 2.3 Proteções no LAT-FEUP . . . 21
  - 2.3.1 Proteções Passivas . . . 21
  - 2.3.2 Proteções Ativas . . . 25

3 Descargas Atmosféricas e Proteções **29**
- 3.1 História . . . 29
- 3.2 Descargas atmosféricas . . . 30
  - 3.2.1 Origem e Formação . . . 31
  - 3.2.2 Formação da Trovoada . . . 33
  - 3.2.3 Estudos da Eletricidade na Descarga Atmosférica . . . 36
- 3.3 Propriedades da Descarga importantes para Dimensionamento de Proteções . . . 37
  - 3.3.1 Propriedades da Descarga *VS.* Danos . . . 37
  - 3.3.2 Corrente de pico de uma descarga - Distribuição clássica . . . 39
- 3.4 Índice Ceráunico . . . 41
- 3.5 Proteções . . . 42
  - 3.5.1 Parametrização e necessidade de proteção segundo a NP 4426 . . . 42
  - 3.5.2 Avaliação do Risco . . . 47
  - 3.5.3 Raio de Proteção de um PDI . . . 49
  - 3.5.4 Diferentes Tipos de Proteção . . . 50

4 Caracterização dos Ensaios **59**
- 4.1 Introdução . . . 59
- 4.2 Considerações à Norma Portuguesa 4426 (NP4426) . . . 59
  - 4.2.1 Conceitos e Definições presentes na NP 4426 . . . 60
- 4.3 Preparação da Montagem . . . 64
- 4.4 Início dos Ensaios . . . 76
  - 4.4.1 Verificação e Validação da Montagem . . . 76
  - 4.4.2 Requisitos Inerentes à NP 4426 . . . 79
- 4.5 Resultados . . . 84
  - 4.5.1 Resultados obtidos para o para-raios ionizante fornecido pela Empresa X 85

4.5.2 Resultados obtidos para o para-raios ionizante de 40μs fornecido pela Empresa Y . . . 86
4.5.3 Resultados obtidos para o para-raios ionizante de 60μs fornecido pela Empresa Y . . . 87
4.5.4 Resultados obtidos para os para-raios ionizante que sofreram um aumento da resistência da terra . . . 88

5 Conclusões e Trabalho Futuro **91**
5.1 Conclusões Relativas à Montagem . . . 91
5.2 Conclusões a retirar dos Ensaios . . . 92
5.3 Limitações . . . 97
5.4 Contribuições desta Dissertação . . . 97
5.5 Trabalhos Futuros . . . 97

A Resultados dos ensaios aos Para-raios **99**
A.1 Demonstração de resultados da 1ª série de ensaios . . . 99
A.1.1 Condições atmosféricas e Outras observações . . . 99
A.1.2 Resultados . . . 99
A.1.3 Registo das formas de onda . . . 103
A.2 Demonstração de resultados da 2ª série de ensaios . . . 106
A.2.1 Condições atmosféricas e Outras observações . . . 106
A.2.2 Resultados . . . 106
A.2.3 Registo das formas de onda . . . 110
A.3 Demonstração de resultados da 3ª série de ensaios . . . 113
A.3.1 Condições atmosféricas e Outras observações . . . 113
A.3.2 Resultados . . . 113
A.4 Demonstração de resultados da 4ª série de ensaios . . . 119
A.4.1 Condições atmosféricas e Outras observações . . . 119
A.4.2 Resultados . . . 119
A.5 Demonstração de resultados da 5ª série de ensaios . . . 124
A.5.1 Condições atmosféricas e Outras observações . . . 124
A.5.2 Resultados . . . 124
A.6 Demonstração de resultados da 6ª série de ensaios . . . 130
A.6.1 Condições atmosféricas e Outras observações . . . 130
A.6.2 Resultados . . . 130
A.7 Demonstração de resultados da 7ª série de ensaios . . . 135
A.7.1 Condições atmosféricas e Outras observações . . . 135
A.7.2 Resultados . . . 135
A.8 Up and Down . . . 139

Referências **141**

Lista de Figuras

2.1 Laboratório de Alta Tensão de grandes dimensões na Índia 7
2.2 Esquema de funcionamento de associação de 3 transformadores em cascata . . . 9
2.3 Transformador de tensão em cascata 10
2.4 Controlador (Comando do Transformador) 11
2.5 Divisor de tensão (equipamento de medição) 12
2.6 Espinterómetro de Esferas 13
2.7 Onda de Choque Atmosférico 14
2.8 Onda de Choque de Manobra 15
2.9 Gerador de Marx do LAT-FEUP 16
2.10 Retificador do Gerador de Choque 17
2.11 Módulo de Controlo GC222 19
2.12 Sistema Digital de Análise de Impulsos presente no LAT-FEUP 20
2.13 Terras do LAT-FEUP [1] 22
2.14 Elementos constituintes do Barramento principal do LAT [1] 22
2.15 Barramento secundário do LAT-FEUP 23
2.16 Baixada de ligação entre os barramentos 23
2.17 Revestimento do chão do LAT-FEUP 24
2.18 Revestimento das paredes do LAT-FEUP 25
2.19 Gráfico representativo das distâncias mínimas em relação às tensões de pico [2] . 26
2.20 Sinóptico do quadro de comando e respetivos níveis de segurança 27

3.1 Ilustração da famosa experiência de Benjamin Franklin 30
3.2 Modelo conceptual da precipitação em um cumulonimbus que ilustra o processo de Bergeron-Findiesen 32
3.3 Diferentes Configurações de Descarga [19] 33
3.4 Fase de Crescimento da nuvem 34
3.5 Fase de maturação da nuvem 35
3.6 Fase de dissipação da nuvem 36
3.7 Distribuição acumulada de correntes de descargas proposta por *Berger* (atualizada) 39
3.8 Distribuição acumulada de correntes de descargas proposta pelo IEEE e pelo CIGRE 40
3.9 Tabela com os dias de trovoada por ano, desde 2000 a 2014 41
3.10 Mapa das descargas elétricas medidas pela rede de sensores entre 2003 e 2009. . 43
3.11 Fontes de Danos; tipos de danos e tipos de perdas de acordo com o ponto de impacto. 44
3.12 Componentes de risco a serem consideradas para cada tipo de perda numa estrutura [31] 47
3.13 Valores típicos de Riscos Toleráveis [31] 48
3.14 Zona de proteção ou Cone de proteção 51
3.15 Exemplo da aplicação do Método das Esferas Rolantes (RSM) 52

3.16 Exemplo de dimensionamento de uma gaiola de Faraday para proteção de uma infraestrutura . . . 54
3.17 Circuito Equivalente de um dispositivo PDI . . . 55
3.18 Exemplo de um para-raios com dispositivo piezoelétrico . . . 56

4.1 Plataforma metálica utilizada durante os ensaios . . . 64
4.2 1ª Fonte de Tensão DC utilizada . . . 65
4.3 2ª Fonte de Tensão DC utilizada . . . 66
4.4 Esquema de montagem sugerido por [37] . . . 67
4.5 Esquema de ligações ao explosor [1] . . . 69
4.6 Montagem dos explosores utilizada no LAT-FEUP para proteção do gerador . . . 69
4.7 Divisor de tensão DC utilizado durante os ensaios . . . 70
4.8 Exemplo para elaboração das resistências . . . 73
4.9 Exemplo das resistências utilizadas . . . 74
4.10 Esquema de Montagem para determinar queda de tensão nas resistências . . . 77
4.11 Esquema de Montagem . . . 78
4.12 Representação das distâncias [31] . . . 80
4.13 Arquitectura da Solução Proposta . . . 81
4.14 Gráfico Up and Down . . . 82
4.15 Para-raios utilizados nos ensaios . . . 84
4.16 Resistência de 10Ω utilizada para análise da influência de diferentes valores de terra no desempenho de dispositivos de proteção . . . 88

5.1 Exemplo do comportamento de um PDI perante uma descarga positiva [1] . . . 96

A.1 Onda Completa do Início da primeira série . . . 104
A.2 Onda Completa entre para-raios na primeira série . . . 104
A.3 Onda Completa do Fim da primeira série . . . 104
A.4 Onda registada no disparo válido nº30 ao PTS da primeira série . . . 105
A.5 Onda registada no disparo válido nº39 ao PTS da primeira série . . . 105
A.6 Onda regista no disparo válido nº21 ao PDI da primeira série . . . 105
A.7 Onda Completa do Início da segunda série . . . 110
A.8 Onda Completa entre para-raios na segunda série . . . 111
A.9 Onda Completa do Fim da segunda série . . . 111
A.10 Onda registada no disparo válido nº24 ao PTS da segunda série . . . 111
A.11 Onda registada no disparo válido nº17 ao PDI da segunda série . . . 112
A.12 Onda regista no disparo válido nº46 ao PDI da segunda série . . . 112
A.13 Gráfico Up and Down . . . 139

Lista de Tabelas

2.1 Tabela de Resistência segundo o Manual [14] 17

4.1 Valores de queda de tensão nas resistências 77
4.2 Variações das condições atmosféricas para ambos os ensaios, admitidas pela NP 4426 [31] 81
4.3 Resultados obtidos no melhor ensaio ao PDI da empresa X (3º Ensaio) 85
4.4 Análise requisitos Impostos pela NP 4426 [31] 85
4.5 Resultados obtidos no melhor ensaio ao PDI (40μs) da empresa Y (4º Ensaio) . . 86
4.6 Análise requisitos Impostos pela NP 4426 [31] 86
4.7 Resultados obtidos no melhor ensaio ao PDI (60μs) da empresa Y (7º Ensaio) . . 87
4.8 Análise requisitos Impostos pela NP 4426 [31] 87
4.9 Resultados obtidos no ensaio com a terra de 10Ω ao PDI (40μs) da empresa Y e ao da Empresa X (5º Ensaio) 89

5.1 Tempos de Captura e de Cauda de todos os ensaios aos PHS, e respetiva diferença 92
5.2 Tempos de Captura e de Cauda de todos os ensaios aos PDI da Empresa X, e respetiva diferença 93
5.3 Tempos de Captura e de Cauda de todos os ensaios aos PDI (40μs) da Empresa Y, e respetiva diferença 93
5.4 Tempos de Captura e de Cauda de todos os ensaios aos PDI (60μs) da Empresa Y, e respetiva diferença 93
5.5 Tempos de Captura de vários tipos de para-raios (a amarelo os tempos dos para-raios onde se aumentou a terra) 95

A.1 Condições Atmosféricas da 1ª Série de Ensaios 99
A.2 Resultados obtidos para a primeira série de ensaios ao PHS 99
A.3 Resultados obtidos para a primeira série de ensaios ao PDI 102
A.4 Condições Atmosféricas da 2ª Série de Ensaios 106
A.5 Resultados obtidos para a segunda série de ensaios ao PHS 106
A.6 Resultados obtidos para a segunda série de ensaios ao PDI 108
A.7 Condições Atmosféricas da 3ª Série de Ensaios 113
A.8 Resultados obtidos para a terceira série de ensaios ao PHS 113
A.9 Resultados obtidos para a terceira série de ensaios ao PDI da empresa X 115
A.10 Resultados obtidos para a terceira série de ensaios ao PDI (40μs) da empresa Y . 117
A.11 Condições Atmosféricas da 4ª Série de Ensaios 119
A.12 Resultados obtidos para a quarta série de ensaios ao PHS 119
A.13 Resultados obtidos para a quarta série de ensaios ao PDI(40μs) - Empresa Y . . . 121
A.14 Condições Atmosféricas da 5ª Série de Ensaios 124
A.15 Resultados obtidos para a quinta série de ensaios ao PHS com terra 124

A.16 Resultados obtidos para a quinta série de ensaios ao PDI da Empresa X, com terra 126
A.17 Resultados obtidos para a quinta série de ensaios ao PDI (40μs) da Empresa Y, com terra 128
A.18 Condições Atmosféricas da 6ª Série de Ensaios 130
A.19 Resultados obtidos para a sexta série de ensaios ao PHS 130
A.20 Resultados obtidos para a sexta série de ensaios ao PDI (60μs) - Empresa Y . . . 132
A.21 Condições Atmosféricas da 7ª Série de Ensaios 135
A.22 Resultados obtidos para a sétima série de ensaios ao PHS 135
A.23 Resultados obtidos para a sétima série de ensaios ao PDI (60μs) - Empresa Y . . 137

Abreviaturas e Símbolos

AC	*Alternating Current* (Corrente Alternada)
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
C_c	Capacidade em relação à terra
CIGRE	*Internacional Coucnil on Large Electric Systems*
C_g	Condensador do gerador de Marx
DA	Descargas Atmosféricas
DC	*Direct Current* (Corrente Continua)
DEA	Descargas Eléctricas Atmosféricas
DIAS	*Digital Impulse Analyser System*
EAT	Extremamente Alta Tensão
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Freq	Frequência
HVDC	*High-voltage direct current*
IC	Índice Ceráunico
IEC	*International Electrotechnical Comission* (Comissão Electrotécnica Internacional)
IEP	Instituto Electrotécnico Português
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ISO	*International Organization for Standardization* (Organização Internacional de Normalização)
LAT	Laboratório de Alta Tensão
LAT-FEUP	Laboratório de Alta Tensão da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
LEMP	*Lightning Electromagnetic Impulse* Impulso Electromagnético da descarga
MDF	*Magnetic Direction Finding*
MT	Média Tensão
PDI	Para-raios com dispositivo de avanço à ionização
PHS	Para-raios de haste Simple
R_L	Resistência de Carga
R_p	Resistência paralelo
R_{Se}	Resistência Série Externa
R_S	Resistência Série Interna

SPDA	Sistema de proteção contra descargas atmosféricas
SPDI	Sistema de proteção contra descargas atmosféricas com dispositivo de ionização
NP	Norma Portuguesa
ONN	Organismo Nacional de Normalização
T_c	Tempo de cauda
T_{cr}	Tempo de crista
T_b	Tempo de captura do traçado ascendente
TOA	*Time Of Arrival*

Capítulo 1

Introdução

Os estudos relativos a descargas atmosféricas são, nos dias de hoje, um dos desafios mais complexos que a ciência e a tecnologia têm que enfrentar. Esta complexidade reside no elevado número de fatores causa-efeito envolvidos no processo de desenvolvimento do fenómeno elétrico, particularmente na acumulação de cargas e na variação de campos elétricos. Tudo isto leva a uma necessidade de se fazer uma abordagem multidisciplinar a estes objetos de estudo.

É sabido que a eficiência da tradicional ponta de Franklin, usada há mais de 200 anos como proteção contra descargas atmosféricas, depende do desenvolvimento de efeito de coroa à volta da sua ponta como resultado de elevados campos elétricos que tendem a se desenvolver na presença de trovoadas. A aproximação ao solo de uma descarga negativa resulta numa excitação do campo elétrico, que por sua vez aumenta esse efeito de coroa. Quando todas as condições elétricas estão cumpridas pode ocorrer, de um objeto à superfície, a formação de um arco ascendente que se irá ligar a essa descarga descendente, permitindo assim escoar a corrente para a terra.

No entanto, apesar de este método de proteção passiva ter vigorado durante centenas de anos, surgem agora dúvidas relativas à sua eficácia, e assim criam-se terminais aéreos ativos.

Este novo tipo de dispositivo trouxe grande discórdia à comunidade eletrotécnica, onde de um lado, estão os apoiantes dos dispositivos de pré-emissão de descarga, que alegam que esta medida de proteção garante uma maior zona de proteção contra descargas atmosféricas que as medidas tradicionais. Enquanto que, por outro lado, existem membros que afirmam que esta é só uma maneira de grandes multinacionais cobrarem mais por um novo tipo de tecnologia.

Estas alegações, por parte dos apoiantes deste novo tipo de dispositivo, baseiam-se no facto de, como são dispositivos ativos, terem a capacidade de despoletar o efeito de coroa mais rapidamente e, em consequência, conseguem intercetar a descarga descendente também em menos tempo, o que leva a um menor tempo para o impacto.

Esta controvérsia continua a existir e continuará, se não se realizarem testes mais exaustivos a este tipo de dispositivo, tanto em condições laboratoriais como naturais.

1.1 Motivação e Objectivos

Como referido em 1, há uma necessidade de se realizarem ensaios mais exaustivos a este tipo de dispositivos e é para tentar preencher esta lacuna que esta dissertação irá contribuir com os ensaios realizados. Apesar de esta dissertação ter sido realizada apenas em ambiente laboratorial, reconhece a necessidade de se realizarem ensaios sob condições naturais para validação deste tipo de dispositivos. Reconhece também que tais estudos não são viáveis levando por vezes anos e que, apesar das condições recriadas no laboratório serem aproximações bastante realistas das condições naturais, os resultados não devem ser extrapolados, com vista a validar este tipo de dispositivo.

Toda esta controvérsia, ignorância e necessidade de criar bases, tantos científicas como técnicas para validação, ou não, destes dispositivos, já é, por si só, um factor de grande motivação para o desenvolvimento desta dissertação. Acresce o facto de que uma tese [1], desenvolvida no LAT-FEUP, sobre o mesmo tema, não conseguiu recriar algumas das condições necessárias à validação dos pára-raios segundo a NP 4426, criando assim a inevitabilidade de ser dar continuidade aos trabalhos desenvolvidos.

Esta dissertação pretende analisar o comportamento de dispositivos de pré-emissão de descarga segundo os parâmetros requeridos pela Norma em vigor em território nacional, NP 4426, validando-os, ou não. Esta validação pretende ser um contribuição e um complemento a estudos realizados no mesmo âmbito em todo mundo.

Assim, o principal objetivo passa por uma tentativa de determinar se este tipo de dispositivo apresenta ou não uma maior eficácia relativamente aos dispositivos tradicionais, para-raios de Franklin, ajudando a criar mais bases científicas e técnicas para esta discussão.

1.2 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos distintos, mais anexos.

O primeiro capítulo, 1 é dedicado a uma pequena introdução, que permite uma contextualização do tema abordado. Apresenta também os motivos e objetivos inerentes ao desenvolvimento da mesma e, por fim, a estruturação de todo o trabalho.

Os capítulos 2 e 3 dedicam-se exclusivamente a uma descrição do estado da arte, onde se apresentam conceitos essenciais ao desenvolvimento desta dissertação.

Relativamente ao capítulo 2, este foca-se numa visão generalizada acerca dos laboratórios de Alta Tensão, sendo que depois, se faz uma pequena referência ao LAT-FEUP e ao tipo de ensaios aí praticados. Existe também uma tentativa de dar um pouco mais de ênfase aos ensaios relacionados com o tema abordado.

O capítulo 3 dedica-se à explicação dos fenómenos físicos associados à formação de trovoadas e consequentes descargas elétricas. É também possível neste capítulo encontrar breves referências históricas relativas aos estudos das descargas atmosféricas.

Já o capítulo 4 refere e explica os diferentes passos inerentes a todas as montagens realizadas para os diferentes ensaios, apresenta também os resultados obtidos e uma posterior análise aos mesmos.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões, limitações e contribuições desta dissertação, bem como sugestões de possíveis futuros trabalhos.

Na secção dedicada aos anexos, podemos encontrar os restantes resultados dos ensaios e imagens dos mesmos.

Capítulo 2

Memória Descritiva do Laboratório de Alta Tensão

O principal propósito do Laboratório de Alta Tensão da Faculdade de Engenharia (LAT-FEUP) é ensaiar componentes e aparelhagem elétrica recorrendo a ensaios à frequência industrial, bem como ensaios ao choque.

Quando se trabalha com eletricidade, todos os cuidados são poucos no que toca ao manuseamento de aparelhagem sobre tensão. Na realização deste tipo de ensaios, em que se lida com tensões elevadíssimas, erros podem ser fatais, logo é necessário possuir um conhecimento profundo das regras de segurança, como principal referência a norma [2].

2.1 Contextualização Histórica do LAT

Por volta da década de 80, com uma revisão dos planos curriculares da Licenciatura em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores na FEUP, surge uma nova disciplina, "Técnica das Altas Tensões"(TAT). Houve a necessidade de complementar os estudos teóricos de simulação numérica com estudos de caráter experimental, para a garantia dos resultados pretendidos.

Na viragem do milénio, as instalações da Faculdade de Engenharia deslocam-se da rua dos Bragas para o polo universitário da Asprela, e, então, aquilo que até aqui tinha sido um sonho poderia-se tornar realidade.

Numa fase inicial, entre 2002 e 2005, em que ainda não se dispunha de equipamentos, o hall de ensaios foi partilhado pelo futebol robótico e pelo Laboratório de Aparelhagem. Em 2007, o LAT recebeu o primeiro equipamento de ensaio de alta tensão - um gerador de choque de 500kV, cedido pela empresa Solidal. Neste ano, foram realizadas as primeiras aulas práticas da cadeira de TAT, envolvendo ensaios dielétricos de isoladores ao choque atmosférico.

À medida que anos passam, a vontade de ver o laboratório diversificar o tipo de ensaios que poderia realizar, aumenta e é em 2008, que se instala equipamento que permite realizar ensaios à frequência industrial. Este equipamento, generosamente cedido pela EFACEC, após a desativação de um dos seus laboratórios, é composto por unidades transformadoras de 200kV.

Já em 2009, a Cerisol manifesta à FEUP a sua intenção de deslocar as suas instalações fabris e abre a possibilidade de cedência ao LAT da FEUP do equipamento existente no seu laboratório, de que se destaca um gerador de choque de Marx de doze andares (1200kV), de fabrico Heafely, sem o qual não era possível a realização desta dissertação. Além do gerador, a empresa cede também, um transformador de ensaios à frequência industrial da marca Phenix de 600kV e 0,5A. [3]

Devido às grandes dimensões dos equipamentos, tanto a nível físico como elétrico, exige-se uma adequação e otimização das instalações do LAT, quer a nível estrutural, quer a nível da instalação elétrica, operação que foi possível concluir em 2013. Das principais modificações implementadas destacam-se:

- Aumento do pé direito do edifício para 11 metros;
- Construção de uma gaiola de Faraday em torno da estrutura da sala;
- Instalação de condições de mobilidade dos equipamentos de alta tensão.

2.2 Atividades de um Laboratório de Alta Tensão

Hoje em dia, e com o intuito de aumentar a fiabilidade da rede elétrica é necessário levar a cabo um controlo de qualidade mais restrito e rigoroso. Por isso, diversas empresas recorrem aos seus próprios LAT ou a outras entidades com o objetivo de ensaiar os equipamentos que posteriormente serão instalados. Os equipamentos a ensaiar são os mais diversos, podendo ser ativos ou passivos, equipamentos do subsistema de proteção, comunicação e transporte, como por exemplo: transformadores, hastes para-raios, descarregadores de sobretensões, diferentes tipos de isoladores, disjuntores, seccionadores, cabos, condensadores, reatâncias, apoios, óleo de transformadores, equipamentos de TET, entre outros. Normalmente, todos estes equipamentos são sujeitos a dois tipos de ensaios mais frequentes, ensaios de suportabilidade ou de disrupção elétrica, quer ao choque, quer à frequência industrial.

Todos estes ensaios podem ser realizados com diferentes configurações e sujeitos a diferentes condições, sejam estas de tensão, corrente ou mesmo atmosféricas. Por exemplo, em AC e DC podemos realizar ambos os ensaios a seco, mas caso se queiram alterar as condições atmosféricas, com a introdução de chuva ou mesmo poluição, este ensaio só pode ser realizado em AC. Existem também outros ensaios passíveis de se realizarem, como ensaios ao choque atmosférico, ou ao choque de manobra, ensaios ao comportamento térmico do equipamento quando se encontra em funcionamento, medição de perdas por efeito de coroa, entre muitos outros.[4]

Estes laboratórios, apesar de terem sido criados com o propósito de realizar ensaios dielétricos e estudos de Alta tensão, não se dedicam apenas a isto. Isto, porque hoje em dia os clientes sentem a necessidade de realizar estudos mais diversos e relativos a outras grandezas, surgindo assim os primeiros laboratórios de potência.

Consoante os equipamentos, as suas dimensões e, consequente, capacidade para realizar ensaios, é possível agrupar os LAT's em: pequenos, médios ou grandes. Esta divisão permite determinar os níveis de tensão para os quais os equipamentos podem ser ensaiados.

Um LAT pode ter várias áreas, consoante a sua dimensão terá menos ou mais áreas, mas normalmente podemos dividi-los em:

- Hall de ensaios
- Hall de montagem
- Hall de ensaios de descargas parciais e outros
- Camara de poluição e/ou salina e sua aparelhagem
- Zona de ensaios exterior
- Armazém
- Sala de Controlo
- Sala de Observação
- Escritórios
- Sala de Alimentação e Regulação

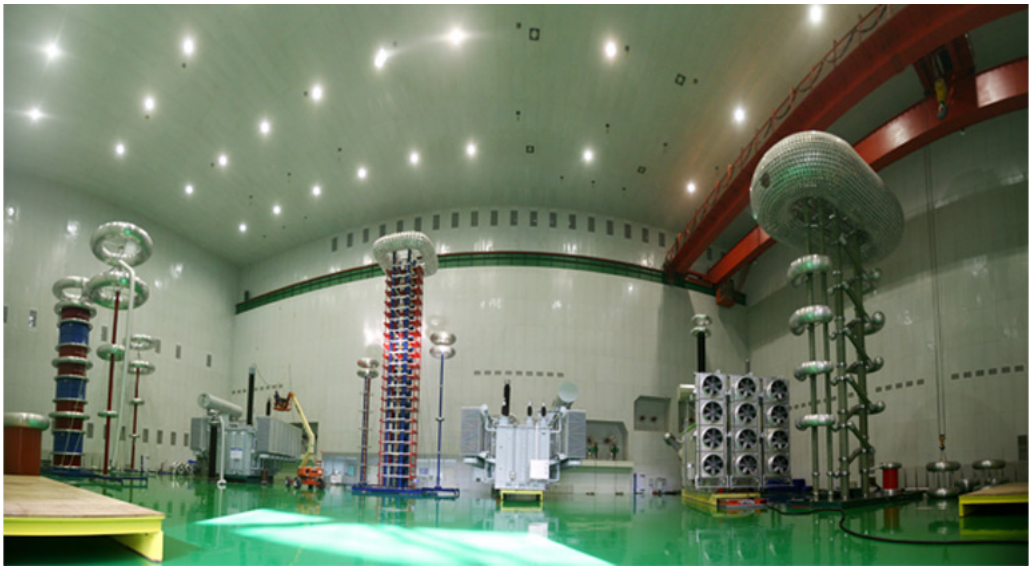


Figura 2.1: Laboratório de Alta Tensão de grandes dimensões na Índia

Os laboratórios mais pequenos, como é o caso do LAT-FEUP, usualmente, pertencem a universidades, o que lhes permite manter uma certa independência, evitando assim um regime de exclusividade para apenas uma empresa do sector elétrico. Ao se evitar essa exclusividade permite-se aos responsáveis focarem-se em diversas áreas e, na maior parte das vezes, a explorar áreas de investigação relativamente pouco conhecidas.[5]

Assim, cria-se uma relação recíproca entre as empresas e a universidade, pois estas entidades conseguem, recorrendo a este tipo de LAT's, financiar os seus estudos a um custo bastante mais reduzido, mas por outro lado ajudam a uma expansão do laboratório, contribuindo com ajuda financeira ou mesmo com a disponibilização de equipamentos. Esta relação aumenta tanto a polivalência das empresas como dos laboratórios.

2.2.1 Equipamentos do LAT-FEUP

Depois de se introduzir, ainda que brevemente, um pouco de história relativa a este laboratório e após se ter nomeado as principais atividades laboratoriais que normalmente são praticadas, é altura de se aprofundar um pouco a aparelhagem em geral. Os equipamentos que cada laboratório possui definem o tipo de ensaios e equipamentos a testar, por esta razão dividir-se-ão os equipamentos consoante os ensaios a realizar.

2.2.1.1 Equipamento de Ensaio à Frequência Industrial

Os ensaios à frequência industrial são normalmente utilizados para testar isoladores, transformadores, seccionadores, entre outros, quando submetidos a tensões às quais estariam normalmente sujeitos, em condições normais de funcionamento. Para a sua realização, o LAT-FEUP, possuí os seguintes equipamentos:

- Transformador;
- Regulador de tensão;
- Controlador;
- Divisor de Tensão.

Transformador

Para estes ensaios é necessário atingir elevados valores de tensão, tensões que dificilmente se atingem com um único transformador, logo a solução passa por associar dois ou mais transformadores em cascata.

Pelo enrolamento primário do primeiro transformador, faz-se a alimentação do conjunto, e no seu secundário obtém-se uma tensão $\boldsymbol{U}$. Relativamente à segunda máquina, a sua alimentação é feita através do seu enrolamento de excitação, e espera-se obter no secundário uma tensão $\boldsymbol{2U}$. Numa configuração deste género podemos associar até 3 transformadores em cascata.

Apesar de conseguirem atingir valores mais elevados com a associação de mais transformadores, existe uma desvantagem desta configuração. Ao se associar um maior número de transformadores, o primário da primeira máquina vai estar sujeito a correntes mais elevadas e a possíveis sobreintensidades, havendo uma maior necessidade de controlo.

Assumindo que a potência final do transformador é ***2P*** (para uma associação de 2 transformadores), segundo a fórmula 2.1.

$$P = IU \tag{2.1}$$

Como referido anteriormente, obtém-se uma tensão, ***2U***, e uma potência, ***2P***, no secundário da segunda máquina, logo a corrente, ***I***, assumirá um valor unitário. Se o enrolamento primário da segunda máquina apresenta o mesmo valor de potência que o enrolamento secundário da primeira, e sabendo também que a tensão nesse enrolamento é ***U***, ou seja metade. Isto significa que o valor da corrente é de ***2I***. No primário do primeiro transformador a tensão diminui mais uma vez para metade do valor, obrigando que a corrente passe para o dobro, ***4I***.

Com isto, compreende-se esta necessidade de controlo relativo às sobreintensidades, pois toda a corrente recai sobre o primário da primeira máquina. Na figura 2.2 está representado o esquema de associação de três transformadores. [6]

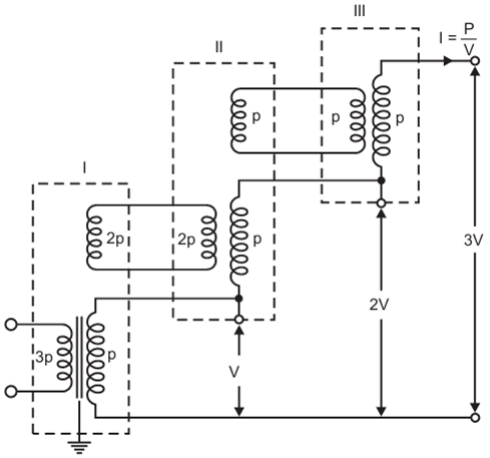


Figura 2.2: Esquema de funcionamento de associação de 3 transformadores em cascata

Do exemplo anterior, numa associação de três transformadores, o valor da corrente seria de ***8I***.

O transformador presente no LAT-FEUP, figura 2.3, é composto por dois módulos (2x300kV) o que confere no total, uma tensão de 600kV e uma potência máxima de 300kVA. Esta configuração permite ainda, em caso de necessidade, se utilize apenas um dos módulos.

Figura 2.3: Transformador de tensão em cascata

Regulador de Tensão

A alimentação do transformador está ao encargo do regulador de tensão, que consiste num funcionamento semelhante a um autotransformador com regulação, feita através do controlador apresentado na figura 2.4. Nos dias de hoje, a regulação é feita recorrendo à eletrónica de potência, o que permite uma redução no tamanho do equipamento, mas com uma menor fiabilidade. No LAT-FEUP esta regulação é feita através de oito reostátos, resultando num equipamento de grandes dimensões.

Os reguladores além de serem responsáveis pela alimentação do transformador são também responsáveis pela proteção e comando, estando incorporados dentro do regulador.

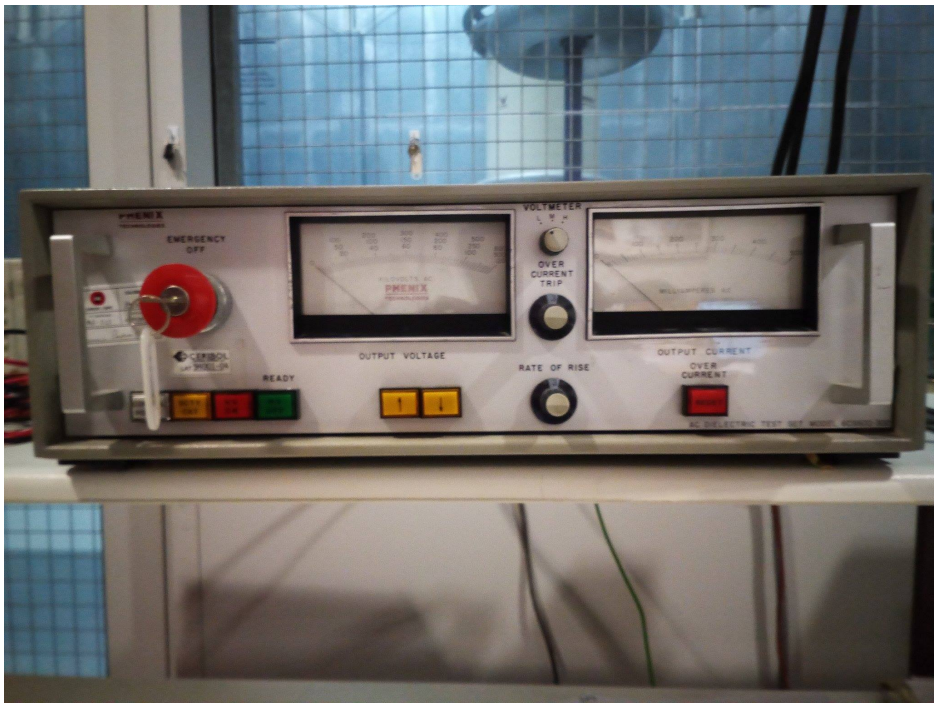


Figura 2.4: Controlador (Comando do Transformador)

Divisor de Tensão Capacitivo

Durante os ensaios à frequência industrial a utilização do equipamento de medição apresentado na figura 2.5 é essencial, pois permite obter na saída uma amplitude de tensão, já reduzida, possibilitando assim a sua medição. A sua saída de baixa tensão encontra-se ligada à sala de controlo através de um cabo coaxial permitindo, assim, efetuar a medição da tensão na saída AT do transformador. [4]

Essencialmente, o divisor consiste num componente de AT que está ligado à saída do transformador e outra saída BT ligada à sala de controlo. Basicamente, existem dois tipos de divisores de tensão, que se distinguem pelo elemento mais predominante constituinte do ramo de AT, podendo ser considerados, resistivos ou capacitivos. Usualmente, ambos possuem acoplados na sua parte superior um escudo, sendo que nos divisores resistivos este tem a função de reduzir a carga absorvida pelo ramo AT, e nos divisores capacitivos reduzem a intensidade do campo elétrico na coluna.

O divisor de tensão presente no LAT-FEUP, figura 2.5, é puramente capacitivo e apresenta uma potência máxima de 23kVA quando sujeito a uma tensão máxima do transformador de 600kV, a uma frequência de 50Hz.

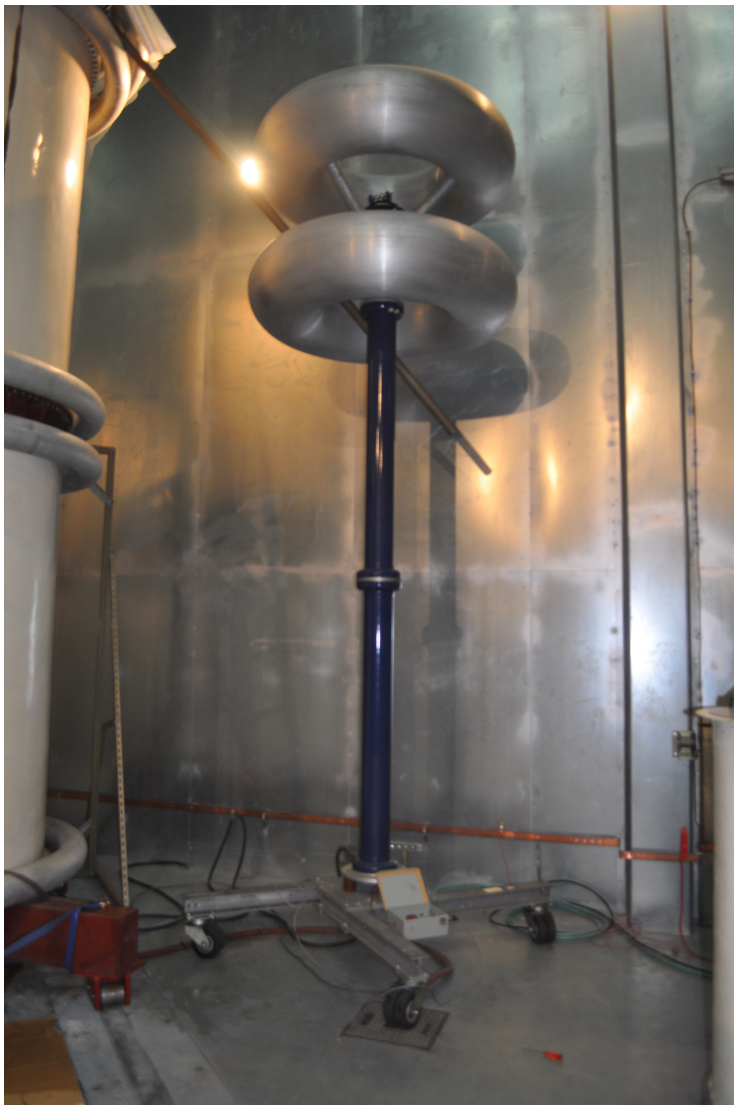


Figura 2.5: Divisor de tensão (equipamento de medição)

Espinterómetro de Esferas

O espinterómetro de esferas, apesar de não ter sido referido anteriormente, é um equipamento que existe no LAT-FEUP, que por vezes é utilizado como auxiliar para calibrar os instrumentos de medida.

Este equipamento é constituído por duas esferas ocas de cobre com um diâmetro D, espaçadas por uma distância S e que tanto podem ser montadas numa posição vertical ou horizontal. Uma das esferas é ligada à terra, enquanto que à outra aplica-se uma tensão. Este aparelho melhora a uniformidade do campo elétrico, e ao se saber o diâmetro das esferas e a distância entre ambas existe uma relação bem definida que permite determinar a tensão de pico para a qual se dá um escorvamento do ar, entre as esferas.

Em função das diferentes medidas normalizadas, tanto para o diâmetro, D, bem como para o

espaçamento, S, pode-se recorrer à Norma *IEC 60052 - Voltage measurment by means of standards air gaps* [7], onde se pode encontrar os valores de tensão para os quais se dá o escorvamento. De notar, que respeitar as condições atmosféricas de referência é preponderante para uma calibração com maior precisão.

Tome-se como exemplo o espinterómetro mais pequeno presente no LAT-FEUP (2.6) ,com 12.5cm de diâmetro, se distanciarmos as esferas em $2cm$, segundo a norma, só ocorrerá escorvamento do ar para uma tensão de pico de 59kV. Todavia, durante ensaios no laboratório deve-se recorrer ao voltímetro do instrumento de comando para verificar o valor de tensão, que deverá ser próximo do fornecido pela norma, depois de aplicados os factores de correção relativos às condições atmosféricas.

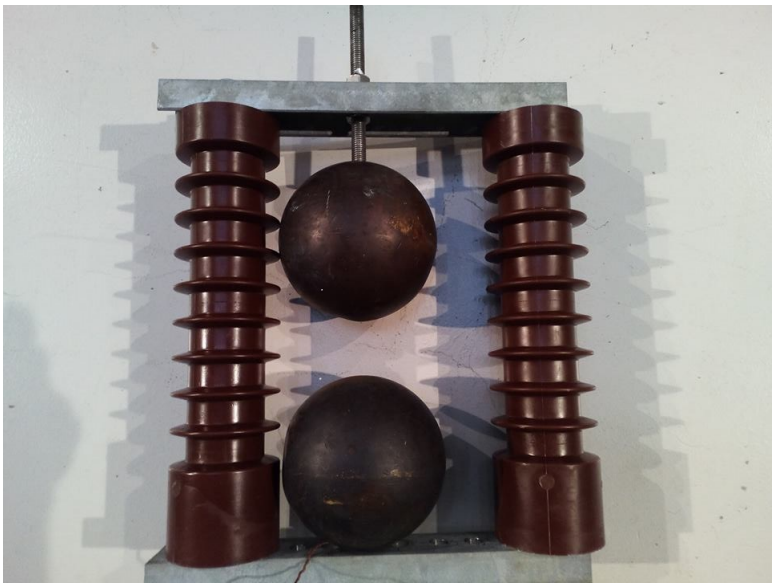


Figura 2.6: Espinterómetro de Esferas

2.2.1.2 Equipamento de Ensaio ao Choque

Os ensaios ao choque, de forma análoga aos ensaios de frequência industrial, servem também para testar a rigidez dielétrica de isoladores, seccionadores,etc, mas num regime diferente. O objetivo destes ensaios é analisar o comportamento destes componentes quando sujeitos a tensões anormais, como descargas atmosféricas ou outro tipo de sobretensões.

Os equipamentos discutidos nesta subsecção vão ser aprofundados mais que os da anterior, pois são elementos-chaves na elaboração desta dissertação.

Para a realização deste tipo de ensaios o LAT-FEUP dispõe dos seguintes equipamentos:

- Gerador de choque ou gerador de Marx que contém:

  Divisor de tensão;

  Módulo de Controlo;

Rectificador;

Unidade de processamento de sinal (DIAS);

- Fonte de tensão DC.

Gerador de Choque ou Gerador de Marx

O gerador de Marx, denominado assim em homenagem a *Erwin Otto Marx*, também conhecido como gerador de impulsos tem como objetivo a criação de ondas impulsionais de Alta Tensão.

Numa abordagem simplista e geral a um sistema deste género, pode-se afirmar que este comporta condensadores, resistências tanto em série como em paralelo, bem como uma fonte reguladora de tensão DC, mais à frente nesta secção abordaremos de uma forma mais exaustiva os componentes do gerador presente no laboratório.[8]

Este é um equipamento de grande importância num laboratório de Alta Tensão devido à capacidade que o mesmo possuí de gerar ondas que podem ser utilizadas em diversos ensaios. As duas ondas mais comuns em ensaios são a onda de choque atmosférica e a onda de choque de manobra.

Ambas as ondas, respetivos tempos e configurações estão previstos na norma *IEC 60060* [2]. Relativamente à onda de choque atmosférico (2.7), onda mais comum em ensaios, às suas características passam por ser uma onda com um tempo de frente de 1,2μs e um tempo de cauda de 50μs.

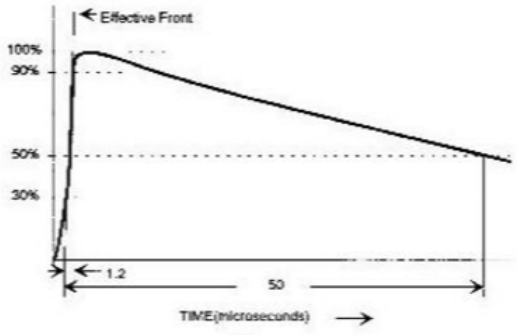


Figura 2.7: Onda de Choque Atmosférico

No caso da onda de manobra (2.8) o tempo de frente é de 250μs, enquanto que o tempo de cauda é de 2500μs.

Uma importante particularidade relativamente às diferenças entre as duas ondas reside no tempo de frente, ou seja, o tempo que as ondas demoram a atingir o valor de pico. A última onda demora bastante mais tempo a atingir esse valor, logo o seu gradiente é, consequentemente

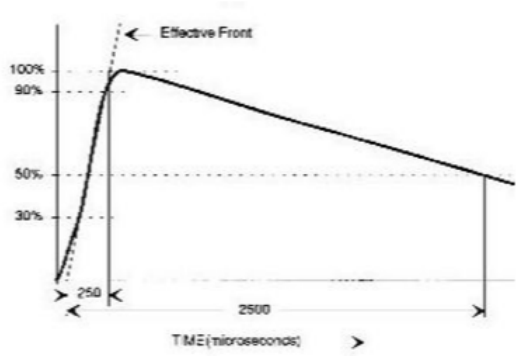


Figura 2.8: Onda de Choque de Manobra

menor. Esta diferença de valores requer, para o mesmo nível de tensão, um perímetro de segurança maior, consequência do tempo de criação do campo elétrico e do seu valor de energia mais elevado.

O gerador do LAT-FEUP (2.9), é um equipamento de marca *Haefely* do tipo S, mais concretamente o modelo **SGS 1200/36 com 12 andares**, que possui uma configuração muito semelhante a qualquer outro tipo de gerador de Marx [9]. Este gerador é constituído como referido anteriormente, além da torre, por mais 4 unidades distintas:

- Retificador de Carregamento do tipo **LGR 100-15**;
- Divisor de tensão de impulso do tipo **CR 1200 kV**;
- Módulo de controlo **GC222**;
- *Digital Impulse Analyser System* (Sistema DIAS).

A torre do gerador de choque é composta por 12 andares, onde cada andar apresenta dois condensadores que perfazem uma capacidade de 1,2μF, o que por sua vez confere a capacidade de acumular uma tensão de até 100kV por andar. Posto isto, tendo o gerador 12 andares, obtém-se um total de 1200kV com uma energia máxima de 36kJ.

O conjunto de condensadores presentes na torre irá ser carregado, em paralelo, através das resistências de carga, recorrendo à fonte de regulação DC. Deste modo, a fonte irá carregar com polaridade negativa os condensadores de um dos lados, enquanto que os do outros lado estarão positivamente polarizados. Entre o terminal positivo de cada condensador e o negativo encontra-se um explosor de esferas, cuja tensão de escorvamento é regulada para um certo valor de tensão de carga, através da regulação da distância entre eles. A ocorrência do escorvamento dos explosores dá-se quando a carga dos condensadores atinge a tensão de escorvamento, originando um percurso condutor que coloca os condensadores em série, sendo a tensão final obtida através da soma das tensões individuais de cada condensador.[6]

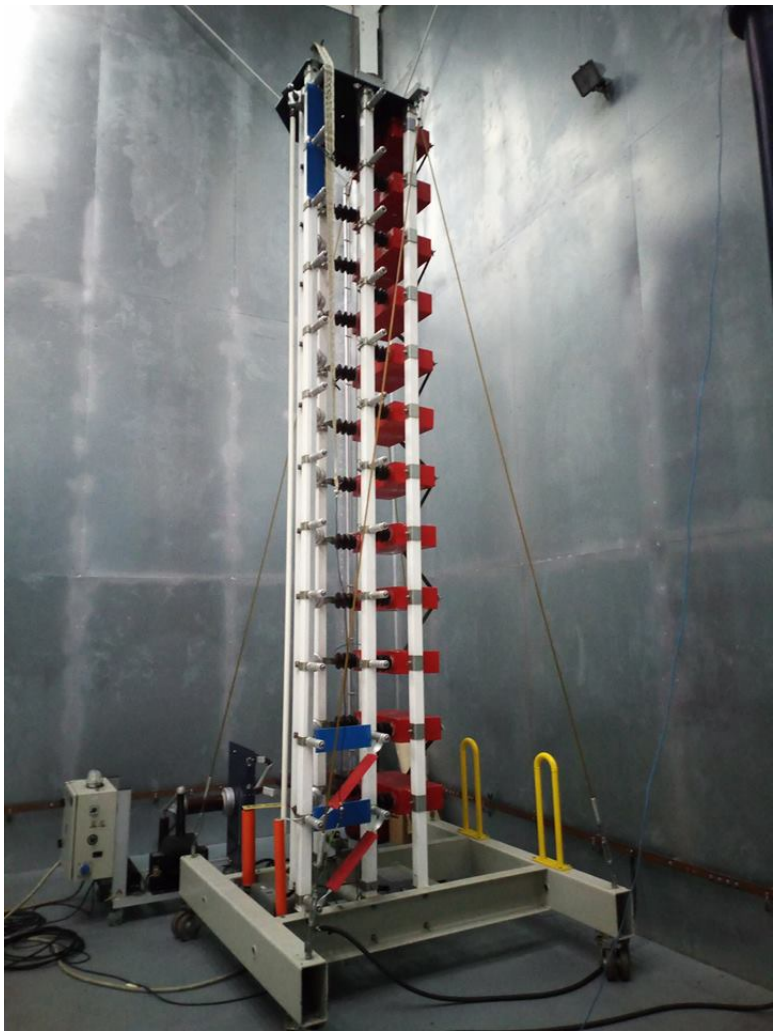


Figura 2.9: Gerador de Marx do LAT-FEUP

Após o escorvamento dos explosores dá-se o descarregamento em série dos condensadores pelas resistências de cauda, resultando daí um decréscimo exponencial da tensão com uma determinada constante de tempo, permitindo desta forma obter uma componente de cauda de onda biexponencial. A componente de frente de subida de tensão é efetuada por um condensador de frente carregado através de uma resistência de amortecimento existente no topo da torre do gerador, obtém-se assim, uma carga exponencial que se irá sobrepor à descarga dos condensadores, permitindo obter a onda biexponencial completa com as duas componentes.

Através da regulação dos valores das resistências e das capacidades dos vários condensadores é possível obter uma forma de onda de choque de acordo com os parâmetros presentes e definidos pela norma, aplicável ao ensaio que se pretende fazer. Na próxima tabela, 2.1, apresentam-se as duas configurações de resistências possíveis definidas pelo manual[9]:

Tabela 2.1: Tabela de Resistência segundo o Manual [14]

Resistências	Onda	
	Choque	Manobra
R_L	8,4kΩ	8,4kΩ
R_P	115Ω	8,4kΩ
R_S	20Ω	20Ω
R_{Se}	30kΩ	45kΩ

Retificador de carregamento do tipo LGR 100-15

O retificador é a unidade de alimentação do gerador de choque que permite o carregamento dos condensadores, que, por sua vez, é alimentada monofasicamente (220V a 235V) a uma frequência de 50/60Hz, com respetiva terra de proteção. A ligação do retificador ao gerador dá-se por meio de um cabo ligado aos terminais **JX1** e **GX1**, já a alimentação está garantida por vias do transformador representado na seguinte figura (2.10):

Figura 2.10: Retificador do Gerador de Choque

Divisor de tensão de impulso do tipo CR 1200 kV

Este divisor capacitivo do LAT-FEUP possui uma tensão nominal máxima de 1200kV, com uma capacidade de 1200 pF e uma resistência de amortecimento de 100 Ω. Este tipo de divisores

de tensão capacitivos têm a capacidade de reduzir em milhares de voltes a tensão, de forma a tornar elevados valores de tensões de impulso, com grandes amplitudes, passíveis de serem adquiridos por outros equipamentos.

Este divisor é o responsável pelas medições de tensão presentes nas descargas e está ligado ao DIAS através de um cabo coaxial de baixa capacidade. Este cabo liga o sistema de análise ao secundário do divisor que se encontra na parte inferior da torre de divisão de Alta Tensão. Os valores adquiridos pelo divisor e enviados para o DIAS são sujeitos a um coeficiente de transformação (2.2.1.2) relacionado com os valores das capacidades do divisor de tensão. Esse coeficiente é calculado pela razão das capacidades secundárias com a capacidade total primária.

Outro factor essencial na utilização deste aparelho reside nas distâncias de segurança, supondo que o divisor se encontra à tensão máxima admitida, é necessário garantir uma distância mínima de 3,5m a qualquer objeto com forte diferença potencial, no fundo, a aproximadamente a altura deste.[3]

$$n = \frac{C_2 + C_c}{C_1} + 1 = 870,8 \tag{2.2}$$

Módulo de Controlo GC222

Esta unidade de controlo tem a capacidade de controlar todos os componentes que constituem o gerador, tal como o próprio gerador de impulsos, o retificador, o sistema de segurança e o sistema auxiliar de disparo. A comunicação entre a aparelhagem no *hall* de ensaios e esta unidade faz-se recorrendo a cabos de 3 e 24 elementos, sendo que estes são responsáveis pela alimentação do gerador e sinais de controlo, respetivamente.

O cabo de 24 pares, respeitante ao controlo, faz a interligação entre a unidade de controlo e o terminal do retificador permitindo assim controlar o carregamento dos condensadores. Este controlo, presente no painel esquerdo da unidade (2.11) permite ao operador selecionar a tensão de carregamento de cada condensador (com uma tensão máxima de 99kV), com uma estabilidade de 0.5% e uma resolução de 100V. Também é possível definir o tempo de carregamento dos condensadores, num intervalo que varia entre os 10s até aos 99s). Após definição do valor de tensão e do tempo de carregamento (em segundos), atua-se no interruptor de AT da unidade de controlo para que os condensadores sejam carregados por uma tensão de saída, em rampa, do retificador proporcional aos parâmetros definidos.

Figura 2.11: Módulo de Controlo GC222

Quando se alcança 95% da tensão de carregamento pretendida, fecha-se um contacto durante 0,5segundos, o qual pode estar associado a um aviso sonoro.

Também no painel esquerdo da unidade encontram-se dois interruptores essenciais à manobra do equipamento, *"High Voltage On"* e *"High Voltage Off"*. O primeiro permite iniciar o carregamento dos condensadores, que levará ao disparo dos impulsos e consequente abertura do circuito de equipotencialização, já o segundo interruptor tem a capacidade de cancelar todas estas operações.

Tanto o valor real como o valor percentual relativo ao carregamento é indicado no painel da unidade de controlo, e, quando este atinge o valor predefinido, ou seja, os 100%, acende-se um sinal luminoso. Existe a possibilidade de ocorrer um desvio de tensão de subida (definida pelo valor predefinido de tensão e tempo de subida) provocado a um curto-circuito ou interrupção de carregamento, caso isto aconteça, acende-se outro sinal luminoso, "ΔU", e o valor de referência da tensão é alterado para zero até que o operador reinicie a rampa.

No caso do disparo de impulsos, pode competir ao operador fazê-lo manualmente, se assim o desejar ou automaticamente, e isto pode ser definido através do interruptor de seleção do modo *"trigger"*. Em ambos os casos, a rampa de carregamento inicia-se novamente após a onda de impulso. Caso ocorra uma descarga não programada entre as esferas do gerador antes de se atingir a tensão de carregamento estipulada, o LED *"Self-firing"* acende. Se, por outro lado, não ocorrer uma descarga disruptiva após o disparo automático, é indicado através do LED *"No firing"* e o valor de referência é anulado. Também a polaridade da tensão da onda de impulso pode ser definida, mas agora no painel central da unidade de controlo.

Ao definir a tensão a ser aplicada, esta unidade, através da atuação de um mecanismo existente na torre do gerador de choque altera a distância entre as esferas explosoras, ajustando-as de

forma a corresponder a uma razão de $100/41\ kV/mm$. Como tal, a distância entre esferas é diretamente proporcional à tensão de ensaio. Mas, mais uma vez esta distância pode ser modificada manualmente pelo operador.[3]

Digital Impulse Analyser System 730 (Sistema DIAS)

Como já explicado anteriormente, o divisor de tensão é o responsável por adquirir o sinal analógico dos impulsos, que depois será reduzido para uma amplitude de aproximadamente 10V por um divisor interno, permitindo assim a sua leitura pelo DIAS.

A informação obtida do divisor é processada e apresentada no monitor que possui um sistema de coordenadas de escala ajustável, neste monitor são apresentados o número de leitura, o valor de pico, valores dos parâmetros temporais da onda adquirida, a razão de transformação do sinal adquirido e o tipo de disparo e ampliação. É possível também observar-se uma linha de texto onde são apresentadas mensagens de instruções, erros e estado do equipamento. [3]

O sistema de análise de impulsos presente no LAT-FEUP está representado na figura 2.12.

Figura 2.12: Sistema Digital de Análise de Impulsos presente no LAT-FEUP

Fonte de Tensão DC

Sabe-se que as fontes de tensão DC não têm grande utilização em laboratórios de Alta Tensão, apesar disso, este tipo de equipamento foi fundamental para elaboração desta dissertação. [10]

A fonte de tensão DC, no caso do LAT-FEUP, é usada em termos de retificação para carregar os condensadores do gerador de choque, outra foi também utilizada para carregar negativamente o plataforma circular, bem como pode ser utilizada em outros projetos de investigação de Alta Tensão.

Recorrendo a diferentes tipologias de circuitos retificadores, como o Circuito Retificador de Meia Onda ou o de Onda Completa, é possível, e de forma bastante eficiente gerar altas tensões DC. A base do funcionamento deste tipo de circuitos é bastante conhecida, e permite gerar elevadas tensões DC. Esse funcionamento é em tudo semelhante, aos circuitos que geram baixas tensões também DC. [11]

2.3 Proteções no LAT-FEUP

A segurança no LAT-FEUP, bem como em qualquer outro laboratório que trabalhe com elevadas tensões é um ponto fulcral no dimensionamento das proteções. A forma e o nível de segurança desse dimensionamento depende de dois factores, a dimensão do *hall* de ensaios, bem como o tipo de ensaios a realizar. [3]

O tipo de proteções presentes divide-se em passivas e ativas.

2.3.1 Proteções Passivas

Como mencionado em 2.1, ao longo dos anos, o laboratório tem vindo a sofrer alterações, e desde a sua última reestruturação até hoje, constam os seguintes elementos de proteção passiva:

- Terras;
- Barramentos;
- Revestimento interior;

Terras

O sistema de terras de proteção do LAT-FEUP é formado pela ligação de três terras distintas, a terra de proteção original do edifício, a terra secundária criada exclusivamente para o laboratório e a terra de proteção do PT que alimenta eletricamente o laboratório.

De notar que na última medição efetuada à terra do laboratório (Janeiro de 2016) esta apresentou um valor de $0,8\Omega$, o que é bastante positivo e só salienta ainda mais a qualidade da terra de proteção do tipo malha.

Figura 2.13: Terras do LAT-FEUP [1]

Barramentos

No LAT-FEUP, existem dois barramentos anelares, ligados entre si, formando um anel em toda a estrutura do *hall* de ensaios.

O primeiro, e mais importante, é o barramento composto por barras de cobre com secção de $5x50\ mm$. Refiro este barramento como mais importante, pois é o barramento onde estão ligadas as terras de proteção aos equipamentos e também a ligação da terra de ensaio. Este barramento está fixo à parede do laboratório através de isoladores de apoio , nas zonas de passagem (entrada e saída do laboratório) o barramento está fixo no chão com uma tinta isoladora entre a chapa e o barramento de forma a não existir contacto direto entre o chão (chapas zincadas) e o barramento. Este está furado em certas zonas de forma a ser possível fazer as ligações à terra corretamente. Está ainda ligado ao revestimento interior, atingindo o equipotencial em toda a estrutura.[1]

Os elementos constituintes deste barramento são apresentados no seguinte conjunto de imagens 2.14:

Figura 2.14: Elementos constituintes do Barramento principal do LAT [1]

O barramento secundário está presente na parte metálica da estrutura (a parte metálica começa aos 8 metros de altura até à cobertura, situada nos 11 metros) (2.15). [1]

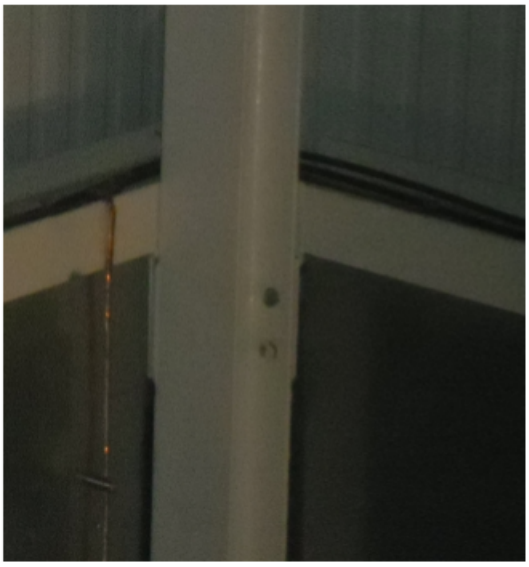


Figura 2.15: Barramento secundário do LAT-FEUP

É formado por um cabo de cobre de 10 mm^2 e encontra-se ligado ao barramento principal através de várias baixadas, de forma a manter um impedância global igual em todo o laboratório. 2.16 [1] [3]

Figura 2.16: Baixada de ligação entre os barramentos

Revestimento Interior

A fim de garantir a blindagem do *hall* de ensaios, foi necessário fazer um revestimento parcial da sua estrutura.

O laboratório até aos 8 metros é constituído por betão, dos 8 aos 11 metros é constituído por uma estrutura metálica devido ao aumento do pé direito, após a reestruturação. Assim sendo, para fazer a blindagem do *hall* foi necessário cobrir as paredes com chapa zincada de espessura $1,5\ mm$. A parte superior, apenas tem a terra secundária pois a estrutura já é metálica. Essa estrutura foi ligada ao barramento de forma a promover um contacto correto. Também as chapas metálicas que revestem o betão, com o mesmo objetivo, estão ligadas entre si através de soldaduras.

Em relação ao pavimento do *hall* de ensaios, este foi também revestido com chapas zincadas com uma espessura de 2.5 milímetros. Mais recentemente, a zona central do laboratório, local onde se realizam a maior parte dos ensaios foi revestida com uma tinta hidrofóbica, devido ao desgaste que as placas zincadas sofriam quando eram realizados ensaios sob chuva, sendo necessário o técnico responsável ter mais atenção devido às diferenças de potencial entre o cabo terra do ensaio e as placas zincadas do chão.

Todo este revestimento baseia-se no conceito da Gaiola de Faraday que será explorado mais à frente. Isto permite que o *hall* de ensaios esteja isolado dos campos elétricos e ondas eletromagnéticas presentes no exterior e que possam causar perturbações nos ensaios a realizar, mas por outro lado, permite proteger o exterior, contendo as cargas no interior da gaiola. Assim se garante, a qualidade dos resultados sem interferências e também, a proteção de pessoas e bens exteriores ao *hall* de ensaios. [3] [1]

Figura 2.17: Revestimento do chão do LAT-FEUP

Figura 2.18: Revestimento das paredes do LAT-FEUP

2.3.2 Proteções Ativas

Este tipo de proteções são assim apelidadas devido ao caráter ativo que apresentam aquando da segurança na realização de ensaios. Estas seguem determinados procedimentos e que caso não se cumpram, as proteções têm a capacidade de impedir ao operador acionar o equipamento. Estas proteções ativas ou medidas ativas visam a segurança e prevenção dos utilizadores de um LAT.

Distâncias de Segurança

Consoante os valores de tensão de pico que se poderão atingir nos ensaios a realizar é necessário manter uma certa distância a qualquer estrutura em tensão ou ligada à terra, com o intuito de anular quaisquer efeitos de proximidade. Também a distância em altura relativamente ao solo é um factor importante, que normalmente vem descriminada nos documentos normativos correspondentes e que depende do tipo de objeto a ensaiar [2]. O seguinte gráfico demonstra a relação entre a distância de segurança e o valor de tensão de pico:

Cumpridos estes requisitos relativos às distâncias de segurança garante que não existem descargas disruptivas entre pontos que se encontrem a diferentes potenciais e não sejam integrantes do ensaio.

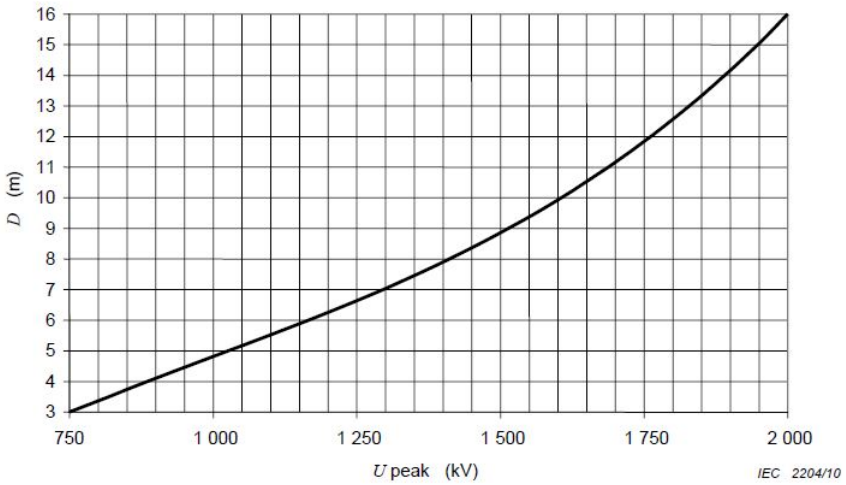


Figura 2.19: Gráfico representativo das distâncias mínimas em relação às tensões de pico [2]

Quadro de Comando

Todos os ensaios necessitam de uma supervisão de um operador e para este, as medidas mais importantes encontram-se implementadas no quadro de comando, que opera através de relés e contatores com sequências e condições lógicas e predefinidas. O quadro de comando obedece a uma linha de operações lógica dividida em três níveis distintos que serão apresentados de seguida. [12]

1. **Nível 1**

   No primeiro nível (de cor verde), com o menor grau de segurança é possível a utilização das tomadas de apoio ao *hall* de ensaios e a utilização da iluminação fluorescente existente no topo do laboratório. Neste nível tanto a porta de acesso à sala de comando, como o portão de acesso ao exterior podem estar abertos

2. **Nível 2**

   No segundo nível (de cor azul), o portão de acesso ao exterior tem de estar obrigatoriamente fechado e é possível a alimentação de alguns equipamentos como sistema de chuva, comando das esferas de calibração podendo estarem ligadas as lâmpadas de halogêneo.

3. **Nível 3**

   No terceiro nível (de cor vermelho), nível com maior segurança, as duas portas têm de estar obrigatoriamente fechadas e permite a utilização dos equipamentos de AT: transformador e gerador de choque e seus reguladores. No entanto, a utilização destes equipamentos é restringida, uma vez que só é permitido a utilização de apenas um dos equipamentos durante cada ensaio.

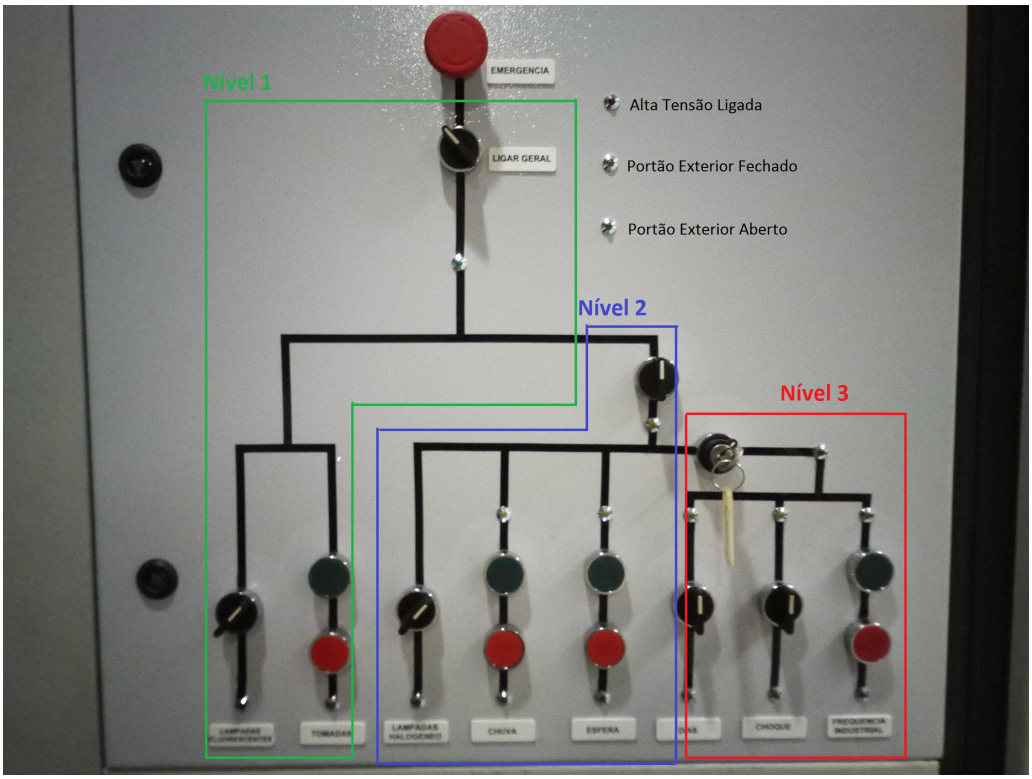


Figura 2.20: Sinóptico do quadro de comando e respetivos níveis de segurança

Além destas medidas, existe também no exterior do laboratório um aviso luminoso que sempre que estejam a ocorrer ensaios este acende, permitindo a quem possa entrar pelo portão que dá acesso ao exterior ter conhecimento disso mesmo.

A porta que liga o *hall* de ensaios à sala de comando também não tem fechadura, logo caso esta abra por alguma razão o nível 3 deixa de estar ativo e os ensaios que requerem um nível de segurança maior param imediatamente. Esta pode ser considerada também uma medida de proteção ativa e permite que caso exista alguém dentro do *hall* e o técnico não se aperceba, essa pessoa pode voltar a entrar na sala de comando, parando o ensaio. [3]

Capítulo 3

Descargas Atmosféricas e Proteções

Com o intuito de providenciar informação fundamentada acerca das proteções existentes contra descargas atmosféricas, é necessário obter algum conhecimento acerca dessas mesmas descargas, como tal, este capítulo debruçar-se-á sobre temas como a formação das nuvens que provocam essas mesmas descargas, a sua descrição, mas sem nunca negligenciar a história por detrás desses mesmos desenvolvimentos.

Assim, parte deste capítulo irá ser dedicado à História, aos desenvolvimentos e estudos relacionados com descargas atmosféricas e até mesmo à invenção de sistemas de proteção contra estes mesmos fenómenos.

3.1 História

Desde os primórdios que o Homem vive fascinado pelo imensidão do céu, que aliada a uma imaginação fértil e desprovida de conhecimento, dava aso à criação das mais variadas superstições e mitos. Isto torna-se evidente quando olhamos para mais de 5000 anos de representações de formas religiosas e mitológicas, associadas a diversas civilizações modernas e depreendemos que existe uma ligação ao fenómeno do raio ou do trovão, desde a representação de Buda que carregava consigo relâmpagos em forma de seta, falando do Deus egípcio Seth, que controlava esses mesmos trovões, ou um dos que nos é mais familiar, Zeus, que usava os seus "trovões para colocar a Humanidade na linha". Já, em honra ao Deus nórdico Thor, associado também aos relâmpagos, que eram provenientes do seu martelo, o quinto dia da semana, em inglês Thursday, é derivado de Thor's Day (Dia de Thor) [13] [14]. Tal imaginação fez com que a Humanidade respeitasse, e até um certo ponto receasse o relâmpago e o trovão, pois, tratar-se-iam de "castigos divinos"[15].

Na época medieval, muitas igrejas foram alvo de descargas atmosféricas, muito provavelmente atraídas pela torre onde normalmente se encontra o sino, a campanária. Ironicamente esses mesmos sinos possuíam uma inscrição em Latim, Fulgura Frango (eu parto os relâmpagos), pois acreditava-se que ao tocar os sinos, se dispersavam os relâmpagos, mas segundo Schonland (1964), que cita um livro Alemão, tal não acontecia, pois ao longo de um período de 33 anos morreram 103 pessoas que cumpriam com o seu dever.

Aparentemente, as únicas igrejas que não eram afetadas por estes "castigos divinos" eram aquelas que possuíam, de certa forma, uma proteção semelhante à invenção de Benjamin Franklin, vulgarmente conhecido como para-raios. Estas possuíam um género de superfície metálica ligada à Terra que permitia a corrente fluir sem causar qualquer dano ao edifício. A eficácia desta invenção pode facilmente ser comprovada pelo Campanário de São Marcos, em Veneza, que fora um recorrente alvo de descargas atmosféricas, até à implementação do sistema de Benjamin Franklin, em 1766, que falaremos em seguida.[13]

Graças a investigações de grandes cientistas, como Wall (1708), Gray (1735) ou Winkler (1746) , começa-se a desvendar a natureza elétrica associada às descargas atmosféricas. Estes estudos aliados àquilo que se pode chamar de um condensador primitivo, o Leyden Jar (Frasco de Leyden), pois possuía a capacidade de armazenar pequenas quantidades de energia, levaram a que Franklin sugerisse recolher e armazenar eletricidade das nuvens, através de uma torre isolada do chão. Um ano depois, consegue armazenar uma carga num Leyden Jar e determinar a sua polaridade, negativa. Nos próximos 170 anos não haveria mais progressos, neste campo, do que aqueles alcançados por Benjamin Franklin.[16]

Apenas em finais do século XIX, com o aparecimento de tecnologias como a fotografia e a espectroscopia foi possível aprofundar um pouco o conhecimento acerca do raio.

Figura 3.1: Ilustração da famosa experiência de Benjamin Franklin

3.2 Descargas atmosféricas

Muitas vezes, termos utilizados no dia-a-dia, termos que de certa forma já fazem parte do senso comum, não são considerados os mais corretos quando tomamos uma abordagem mais técnica, isto acontece também no caso das descargas atmosféricas. Usualmente, quando vemos um "flash" no céu ou ouvimos um grande estrondo consequência de uma tempestade, apelidamo-lo de relâmpago ou de raio, mas esta nomenclatura não é consensual dentro da comunidade cientifica, onde alguns defendem que, relâmpago deva ser aplicado apenas quando existem descargas entre nuvens ou

dentro da própria nuvem e raio para quando essa descarga é efetuada entre a terra e a nuvem. Portanto, utilizaremos descarga atmosférica de uma forma genérica [17].

Como brevemente referido no parágrafo anterior, existe mais do que um tipo de descargas atmosféricas, estas podem ocorrer dentro da própria nuvem (intra-nuvem), entre duas nuvens ou entre a nuvem e a terra. Dos tipos existentes, apenas as que ocorrem entre a nuvem e a terra possuem um maior interesse de ser estudadas, visto que à primeira vista, estas são as que podem provocar danos e, como tal, são as que merecem atenção aquando do dimensionamento de proteções.

3.2.1 Origem e Formação

As trovoadas devem a sua origem a uma grande deslocação de massas de ar quente, com suficiente humidade para elevadas altitudes, esta deslocação pode-se realizar de variadas maneiras.

A trovoada que usualmente acontece em épocas de maior calor, frequentemente denominada por trovoada de verão, acontece quando o solo, que após ter sido aquecido pelo Sol, começa a aquecer o ar circundante, mais concretamente as camadas mais próximas. Isto leva a que esse ar, agora mais quente e menos denso suba. As trovoadas de frente têm lugar quando o aparecimento de uma frente fria puxa as camadas de ar mais frio para junto do solo, forçando assim o ar mais quente a subir.

Por último, existem as tempestades orográfcas que acontecem quando massas de ar quente, devido à irregularidades do relevo, são obrigadas a subir à medida que atravessam superfícies cada vez mais elevadas.

Outros fenómenos físicos auxiliam nesta formação, dando origem a uma nuvem vertical com uma altura usualmente compreendida entre 5-12km e com um diâmetro de 5-10km, denominada por Cumulonimbus, associada às trovoadas, as quais serão aprofundadas mais a frente. [18]

O tamanho da nuvem faz com que as suas duas extremidades estejam a temperaturas diferentes, muitas vezes essa variação de temperatura poderá mesmo atingir os 70^{o}C. Consequentemente, existirão deslocações de massas de ar dentro da nuvem, mais concretamente correntes ascendentes no centro da nuvem e correntes descendentes nas extremidades, que elevam gotículas de água que ao arrefecerem transformam-se em pequenas partículas de gelo. A colisão das gotículas com estas partículas faz com que, através de processos eletrostáticos, como a fricção, haja uma separação das cargas elétricas, onde as cargas negativas se aglomeram na parte inferior da nuvem (gotículas de água), enquanto que as positivas permanecem na parte superior (cristais de gelo). Esta é uma das várias teorias existentes acerca da formação de nuvens, conhecido como modelo bipolar, que apesar de talvez não ser o mais aceite no seio da comunidade científica, é uma simplificação para uma melhor compreensão dos processos eletromagnéticos, e mesmo assim, permite uma boa aproximação da realidade.[17]

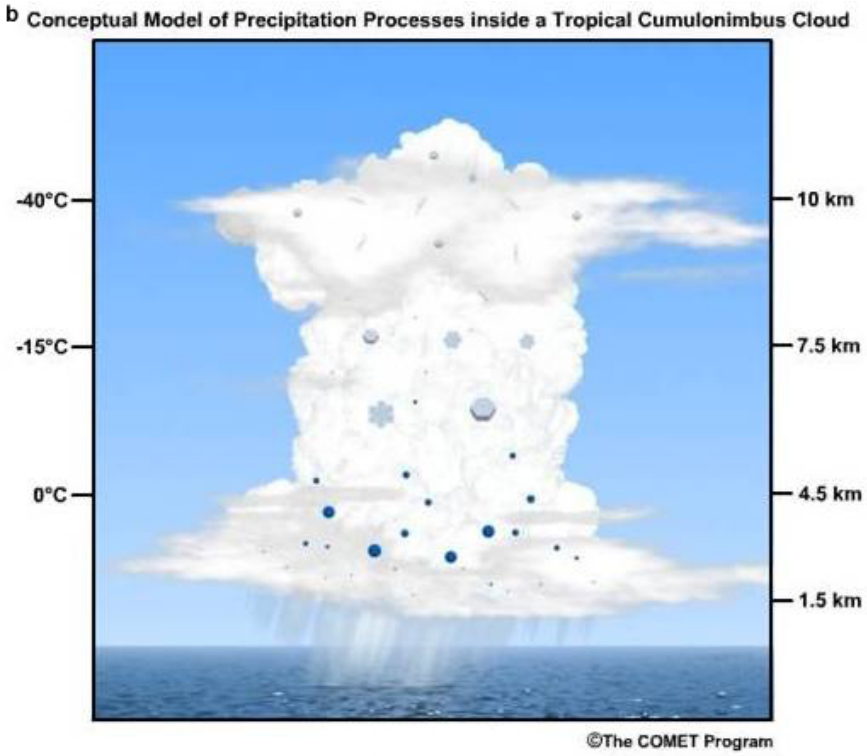


Figura 3.2: Modelo conceptual da precipitação em um cumulonimbus que ilustra o processo de Bergeron-Findiesen

Como a base da nuvem possui uma maior quantidade de cargas negativas, estas repelem as cargas de igual polaridade à superfície terrestre criando assim uma área sob a nuvem com a maior incidência de cargas positivas. Esta repulsão tem a capacidade de dissociar um átomo, a isto chamamos de ionização. A repetição deste processo desde a base da nuvem até à superfície terrestre cria um caminho ionizante pela qual se propagam as descargas elétricas.

Devido à dissociação das partículas, ao longo deste caminho, os eletrões presentes no ar dirigem-se para o solo, dissociando por sua vez outras partículas e assim sucessivamente num "efeito de cascata". Após existir uma descarga interna na nuvem, dá-se uma descarga em direção à superfície terrestre através do caminho referido anteriormente. À medida que ele se aproxima da terra, a uma distância compreendida entre os 10 e os 100m, provoca um aumento do campo elétrico nos objetos na sua vizinhança. Este aumento é grande o suficiente para exceder a rigidez dielétrica do ar, podemos afirmar, então, que se deu um escorvamento do ar, ou seja, o ar que até então seria um isolador tornou-se agora condutor. Começa-se a formar então o traçado ascendente. Os primeiros eletrões atingem agora a terra, libertando energia e por sua vez luz, depois os segundos e assim sucessivamente até atingirem de novo a base da nuvem. A esta formação dos líderes e primeira descarga dá-se o nome de líder (*step-leader*). [18]

Esta emissão de energia derivada da dissociação das partículas produz um aquecimento repentino do ar, que pode muitas vezes atingir temperaturas muito superiores à superfície solar. Em

consequência deste aquecimento, o ar expande-se, também de forma repentina, provocando um efeito sonoro estridente, o qual conhecemos por trovão.

Eventualmente, ambos os traçados, ascendentes e descendentes irão se encontrar e por ai dar-se-á o escoamento da corrente de retorno.

Por vezes, existem elementos na superfície terrestre que melhoram as condições para um aumento de campo, tal como montanhas, arranha-céus ou mesmo árvore, permitindo assim, que o step-leader que origina a descarga possa ser de origem ascendente, terra-nuvem.

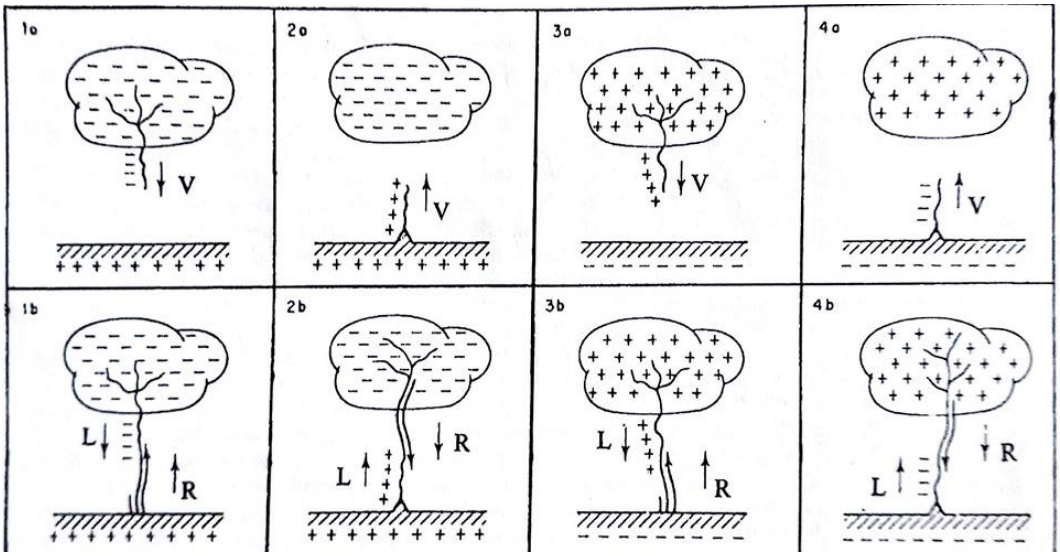


Figura 3.3: Diferentes Configurações de Descarga [19]

Existem várias configurações de descargas possíveis e estas distinguem-se em relação à sua polaridade (positivas ou negativas) e como referido anteriormente, origem, ascendentes (terra-nuvem) ou descendentes (nuvem-terra).

Relativamente à polaridade, as negativas representam a maior parte das descargas atmosféricas, cerca de 90%, enquanto que as positivas representam apenas 10%. Estas últimas têm tendência a serem mais destrutivas, pois caracterizam-se por serem de elevada intensidade. Mesmo assim, o dimensionamento de um sistema de proteções não leva em consideração este tipo de descargas. [20]

3.2.2 Formação da Trovoada

No ano de 1802 foi proposto pela primeira vez, pelo naturalista Lamarck, que se classificassem os vários tipos de nuvem. Em continuidade a esta proposta, que na altura não teve grande aceitação no seio da comunidade científica, foi criado, em 1887, o primeiro sistema de classificação de nuvens, que continua, ainda nos dias de hoje, em vigor. Devido a este sistema, é possível identificar até dez tipos diferentes de nuvens, os quais se baseiam, fundamentalmente, na altura e na forma da nuvem [21].

Apesar de por vezes, se dar algum ênfase aos diferentes tipos de nuvem, resolveu-se apenas falar, ainda que por brevemente, do tipo de nuvem relacionado com a formação de trovoada. A nuvem do tipo Cumulus, mais especificamente Cumulonimbus é uma nuvem vertical a qual estão associadas três distintas fases de formação:

1. Crescimento

   A fase de crescimento surge com a nuvem Cumulus (Cu), consideradas nuvens baixas, devido à sua base estar a altitudes mais baixas. São separadas do grupo de nuvens baixas devido à sua importância no estudo e compreensão dos movimentos verticais e processos de criação da nuvem que irá originar a trovoada. Nesta fase, observam-se correntes descendentes desde o topo da nuvem, podendo ocorrer precipitação sem atingir as camadas inferiores. A fusão destas correntes num sistema convectivo caracteriza a transição para a fase de maturação.

   É natural nesta fase haver colisões entre as correntes exteriores e as correntes descendentes provenientes de nuvens já desenvolvidas [21].

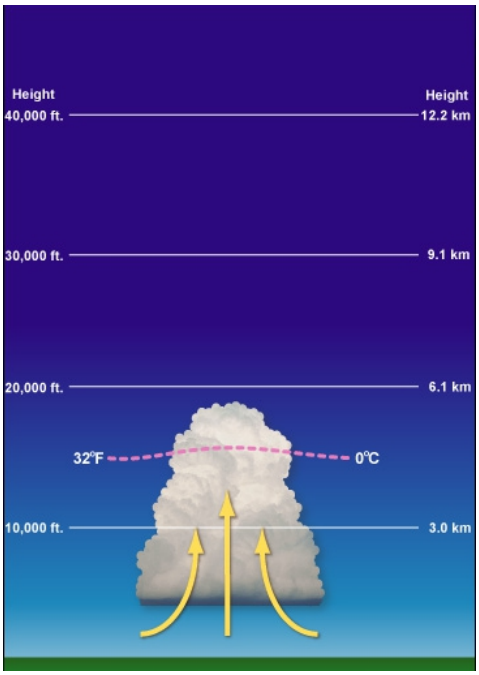


Figura 3.4: Fase de Crescimento da nuvem

2. Maturação

   Nesta fase verifica-se a ocorrência de precipitação e fortes correntes ascendentes e descendentes, por vezes em zonas próximas na nuvem. As correntes ascendentes podem estender-se até ao topo da troposfera, formando a bigorna no topo da nuvem. Este fenómeno ocorre devido à proximidade da estratosfera, onde o ar é mais estável.

As correntes descendentes de ar arrefecido, pela evaporação e fusão constante de gotas sobre arrefecidas formam novas cumulus (Cu). Devido aos fortes movimentos convectivos é normal nesta fase ocorrer fortes aguaceiros [21].

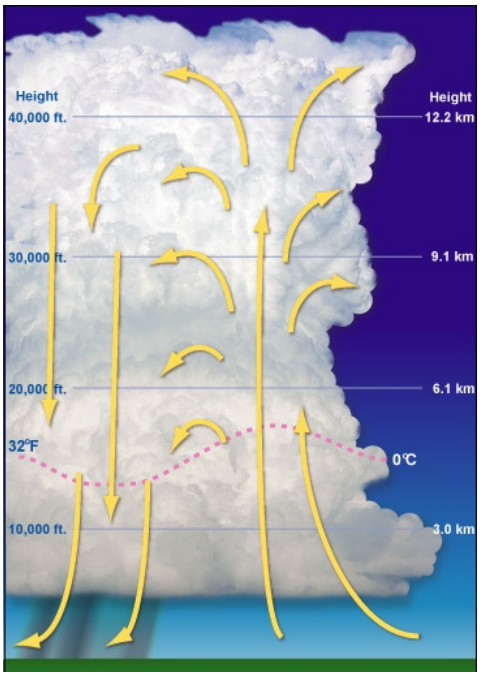


Figura 3.5: Fase de maturação da nuvem

3. Dissipação

Esta fase é caracterizada por correntes descendentes na parte inferior da nuvem, apesar de persistirem algumas correntes ascendentes na parte superior. O ar circundante mistura-se com a nuvem ocorrendo turbulência. O topo da nuvem, tipicamente em forma de bigorna, começa a dissipar-se.

Na parte inferior da nuvem observam-se rajadas externas à nuvem, mas consoante a nuvem começa a dissipar-se no ar envolvente as correntes ascendentes decrescem até que estabilizam. Nesta fase é possível identificar aguaceiros uniformes em todas as camadas verticais [21].

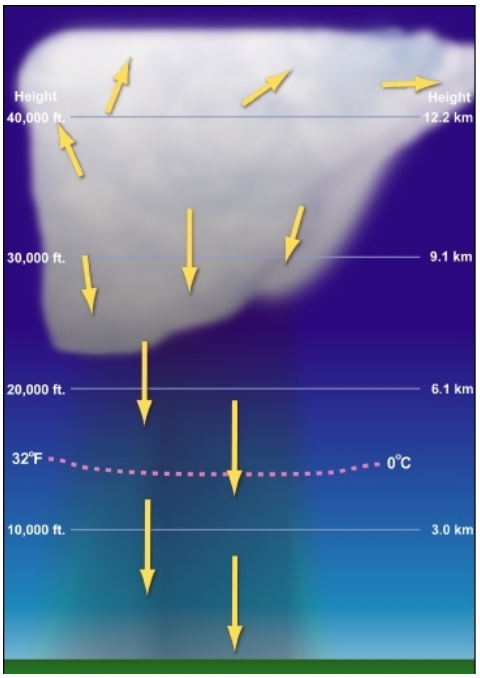


Figura 3.6: Fase de dissipação da nuvem

3.2.3 Estudos da Eletricidade na Descarga Atmosférica

1775

Beccaria, na sequência de estudos realizados anteriormente por *Lemonnier*, prova que a polaridade das cargas é positiva em condições de bom tempo (na ausência de nuvens) e negativa na presença de trovoada [22] [19].

séc. XVIII e XIX

Os estudos dos campos elétricos não são esquecidos e surgem várias propostas na tentativa de se medirem os campos presentes nas trovoadas. Destes estudos não advém grandes progressos, pois as nuvens podem atingir áreas de até $120 km^2$.

1795

Coulomb propõe que o ar poderá ser um condutor, mas esta ideia não é aceite.

1842

Peltier afirma que a superfície terrestre apresenta apenas cargas negativas, mas sem nunca conseguir demonstrar a origem dessas mesmas cargas.

1920

Wilson comprova que existe uma diferença de potencial entre a ionosfera e a superfície terrestre. Para isso serviu-se de um modelo que se baseia na afirmação, que as nuvens de trovoada são a força motriz que induz um fluxo através das nuvens entre a superfície terrestre e a ionosfera.

Início do séc.XX

Os primeiros modelos da distribuição de cargas no interior de uma nuvem começam a surgir, sendo que, a nuvem como um dipolo vertical é o mais aceite.

1937

Simpson e *Scrase* afirmam que na base da nuvem encontram-se as cargas negativas e por sua vez, no topo, as cargas positivas, sendo que o centro poderia alternar entre ambas as polaridades. Surge assim, pela primeira vez, a nuvem como um modelo tripolar. [23]

Mais recentemente...

Modelos relativos ao tripolo, descrevem que existem mais variedade de cargas na nuvem de trovoada e que a distribuição de cargas depende, essencialmente, das correntes ascendentes e descendentes.

3.3 Propriedades da Descarga importantes para Dimensionamento de Proteções

3.3.1 Propriedades da Descarga *VS.* Danos

O tipo e quantidade de danos elétricos que um equipamento ou objeto estão sujeitos depende, tanto das características da descarga como das propriedades do objeto. Do ponto de vista físico, as características mais importantes derivam de propriedades da forma de onda da corrente e das frequências dos campos eletromagnéticos [24] [25].

Relativamente à forma de onda, existem 4 propriedades distintas que são de extrema importância quando consideramos o tipo de dano ao qual estão relacionadas:

1. ***Peak Current* (Corrente de Pico)**: Para objetos que apresentam impedâncias predominantemente resistivas, como por exemplo uma árvore, a tensão nesses mesmos objetos relativamente à terra será proporcional à corrente, comportando-se segundo a lei de Ohm: U=RI. Facilmente se conclui que em objetos com elevada resistividade a tensão será maior.

2. ***Maximum rate-of-change of current* (Taxa máxima de variação da corrente):** Objetos que apresentam uma impedância, predominantemente indutiva, como é o caso de circuitos dum sistema eletrónico, a tensão de pico será proporcional à taxa de variação máxima da corrente. Logo, quanto maior for a derivada da corrente, maior será a tensão à qual este equipamentos estarão sujeitos, como podemos concluir pela observação da seguinte equação 3.1:

$$V = L * \frac{\delta i}{\delta t} \tag{3.1}$$

Com isto, verifica-se que mesmo uma pequena fração de corrente proveniente de uma descarga atmosférica poderá causar danos significativos a circuitos eletrónicos que partilhem a mesma terra.

3. ***Integral of the current over time*** **(Integral da corrente ao longo do tempo)**: A severidade de danos causados por aquecimento em folhas metálicas, sejam elas de aeronaves ou de telhados, numa primeira aproximação, é proporcional à carga transferida, que por sua vez é proporcional à energia transferida à superfície. Isto acontece, pois a tensão a que a superfície está sujeita é o produto entre a corrente e a diferença de tensão provocada durante o arco, sendo que esta queda, habitualmente, está compreendida entre 5 a 10V.

   Em regra geral, estas grandes transferências de energia acontecem quando as descargas são de longa duração (de dezenas até por vezes centenas de milisegundos), originando correntes compreendidas entre 100 e 1000A. Relativamente aos *return-strokes*, apesar de estes estarem relacionados com grandes transferências de energia, a duração dos mesmos é tão pequena que aparentemente não permite a penetração do calor no metal, logo os danos causados são insignificantes.

4. ***Action Integral*** **(Ação Integral)**: fundamentalmente, é o integral da corrente ao quadrado em relação ao tempo e crê-se que esteja relacionado com o aquecimento e consequente derretimento de objetos resistivos, que poderão ou não ser bons condutores.

   Uma boa aproximação relativa ao valor do *Action Integral* poderá ser feita pela seguinte equação:

$$\int_{to} I^2(t)R \, \mathrm{dt} \tag{3.3}$$

   Esta propriedade é também uma medida que permite determinar a capacidade que uma descarga possui de gerar calor no objeto atingido, então da equação 3.2, facilmente se compreende que objetos providos de pouca capacidade de conduzir energia elétrica, ou seja, com um R elevado estarão sujeitos a maiores temperaturas.

Relativamente aos campos eletromagnéticos existem duas propriedades fundamentais que podem ser determinantes no tipo e quantidade de danos causados a objetos sobre os quais forem induzidas correntes e consequentemente tensões:

1. ***Peak values of the eletric and magnetic fields*** **(Valores de pico dos campos elétricos e magnéticos)**: Objetos, como antenas, que se encontram ligadas à terra por meios capacitivos estão sujeitos a tensões induzidas proporcionais ao pico do campo elétrico.

2. ***Maximum rates-of-change of the fields*** **(Taxas de variação máximas dos campos)**:objetos que se encontram ligados à terra por vias de uma resistência, como é o caso de alguns cabos

subterrâneos, a tensão de pico é proporcional à taxa de variação máxima do campo elétrico ou magnético.

3.3.2 Corrente de pico de uma descarga - Distribuição clássica

Todas as normas, que compreendem a proteção contra descargas atmosféricas, sejam estas internacionais ou nacionais, apresentam uma distribuição clássica das correntes de pico de descargas negativas, essencialmente relativa aos *first strokes*. A corrente de pico, como demonstrado,3.3.1, é uma das principais propriedades que determina a quantidade de danos causados por uma descarga, logo facilmente se conclui que esta distribuição é uma das peças-chave no estudo de qualquer dimensionamento de proteção [24].

Esta distribuição está maioritariamente relacionada com estudos e recolha de dados feitos por *Berger* na Suiça na década de 70 e apresenta valores relacionados com **(1)**líderes negativos, **(2)** líderes positivos, **(3)** líderes positivos e negativos e **(4)** *return strokes*. Apesar de, a figura 3.7 não representar a distribuição original medida por Berger, apresenta um modelo atualizado baseado nesses mesmos estudos

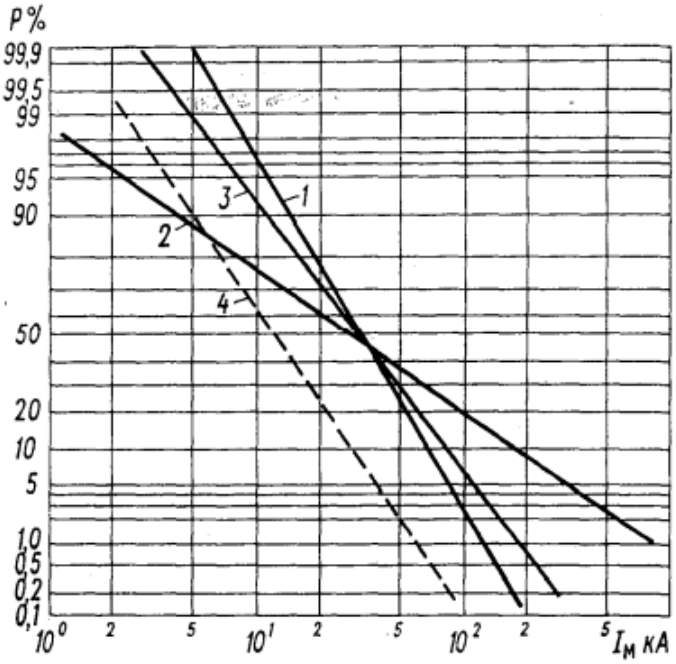


Figura 3.7: Distribuição acumulada de correntes de descargas proposta por *Berger* (atualizada)

Da distribuição apresentada em 3.7 podemos retirar várias ilações. Em primeiro lugar, observa-se que apenas uma pequena fração de descargas negativas excedem os 100kA de corrente de pico, por outro lado, 20% das descargas positivas excedem esse valor. Sabe-se também que, apenas 10% de todas as descargas atmosféricas são positivas.

Relativamente às descargas negativas, é esperado que das primeiras descargas, 95% excedam os 14kA, 50% os 30kA e apenas 5% excedam os 80kA. Os valores de segundas descargas são

significativamente mais baixos em termos de corrente de pico, portanto, são normalmente negligenciados aquando do dimensionamento de proteções [24].

Os estudos realizados por *Berger* e que resultaram no gráfico presente na figura3.7 são baseados em cerca de 100 medições e até hoje é um dos estudos mais precisos realizados. Mas, por vezes, com o objetivo de aumentar o número de amostragem, aos dados retirados por *Berger* são adicionados outros não tão precisos.

Por esta razão existem então, duas principais distribuições que são adotadas pelas normas e que permitem uma distribuição mais precisa. Estas são as distribuições propostas pelo *IEEE* e pela *CIGRE*, ambas representadas na figura 3.8

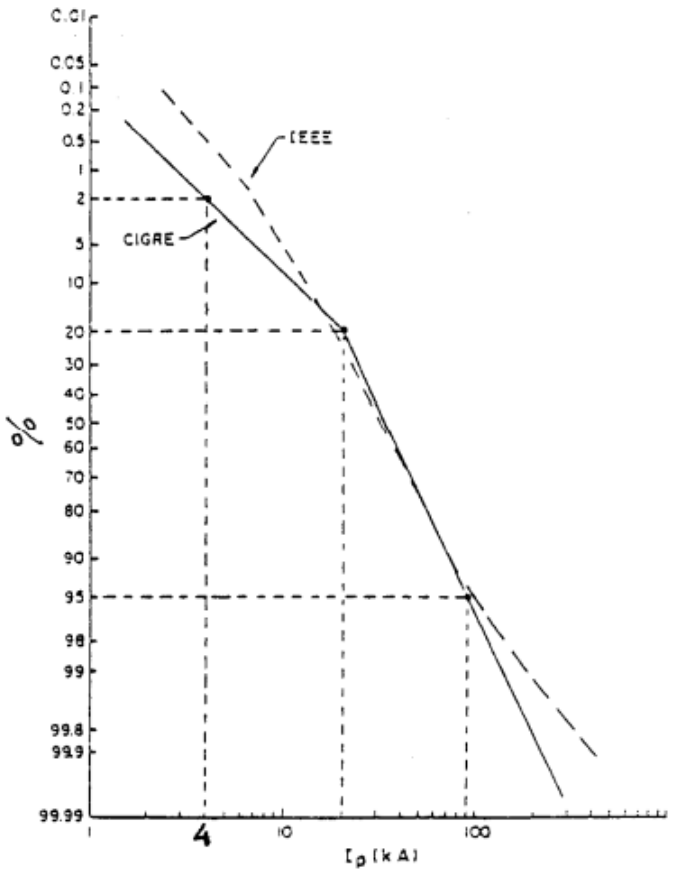


Figura 3.8: Distribuição acumulada de correntes de descargas proposta pelo IEEE e pelo CIGRE

Considerando a distribuição que apresentada pela CIGRE e que contém dados mais atuais relativos às descargas atmosféricas, pode-se agora, retirar novas ilações [26] [27].

A distribuição dos valores relativos às primeiras descargas negativas é agora feita da seguinte maneira: 98% das correntes de pico excedem os 4kA, 80% excedem os 20kA e apenas 5% excedem os 90kA.

No que respeita à distribuição apresentada pelo *IEEE*, "a probabilidade de se exceder"determinado

valor é dada pela seguinte equação 3.4:

$$P_I = \frac{1}{1 + (\frac{I}{31})^{2,6}} \tag{3.4}$$

Estes estudos não foram esquecidos e ao longo dos tempos foram realizados estudos mais profundos dentro do mesmo âmbito. Esses estudos, acerca de correntes de pico, foram levados a cabo em diferentes países, como o Brasil, o Japão ou mesmo África do Sul e recorrendo a diferentes técnicas [13].

A grande surpresa ou talvez não, foi a descoberta de grandes disparidades relativamente aos estudos realizados na Suíça por *Berger*. Uma das razões apresentada para esta diferença de valores reside no fato de, consequência da variedade de países onde estes foram realizados, exista também uma diferença significativa relativa às condições atmosféricas dos variados locais.

3.4 Índice Ceráunico

O índice ceráunico (IC) permite saber a densidade das descargas atmosféricas em determinado ponto do globo e é também utilizado para calcular os números de dias médio com trovoada no decorrer de um ano, recorrendo às estações meteorológicas clássicas. Sendo feita a medida sempre que, pelo menos um trovão se tenha registado num dado dia, caso contrário seria nulo [28].

A seguinte tabela, 3.9, apresenta a média nacional dos dias de trovoada por ano, desde o ano 2000 até ao ano de 2014, feita com base em valores, retirados das seguintes estações meteorológicas: Porto, Vila Real, Bragança, Coimbra, Castelo Branco, Lisboa, Portalegre, Évora e Faro.

	MEDIA NACIONAL												
	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	TOTAL
2000	0	0	1	1	4	0	0	0	0	0	1	2	10
2001	1	1	1	0	2	0	2	1	1	1	0	0	10
2002	0	0	1	2	1	2	0	1	2	1	1	1	12
2003	0	0	1	0	0	0	0	2	1	2	1	0	7
2004	0	0	0	0	2	0	0	0	1	1	0	0	5
2005	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	3
2006	0	0	1	0	0	3	2	0	0	1	1	0	9
2007	0	0	0	3	1	0	0	1	2	1	0	0	9
2008	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	4
2009	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	6
2010	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	7
2011	0	0	0	1	2	1	0	0	1	0	1	0	7
2012	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3
2013	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	5
2014	1	0	0	1	0	1	0	0	3	0	1	0	7
	0,2	0,3	0,3	0,8	1,1	0,7	0,4	0,4	1,0	0,8	0,4	0,3	**6,8**

Figura 3.9: Tabela com os dias de trovoada por ano, desde 2000 a 2014

Com o objetivo de melhorar e apoiar significativamente as previsões do estado do tempo e em particular a ocorrência de trovoadas, o Instituto Português do Mar e da Atmosfera tem em funcionamento, desde Junho de 2002, uma rede de deteção e localização de descargas elétricas atmosféricas (raios), no território continental e áreas oceânicas adjacentes.

Esta rede é constituída por quatro detetores (localizados em Braga, Castelo Branco, Alverca e Olhão), que medem a intensidade e orientação das variações do campo eletromagnético terrestre associado a raios direção do pico eletromagnético (*MDF- Magnetic Direction Finding*) e tempo de chegada (*TOA – Time of Arrival*) utilizando antenas eletromagnéticas ortogonais NS, EW e horizontal e relógio de precisão GPS [29].

A informação registada por cada um dos detetores é transmitida instantaneamente para um centro de processamento cujo resultado principal é o instante e local onde ocorreu o raio. A frequência e características dos raios (polaridade, intensidade e multiplicidade) e a área afetada permitem apoiar e melhorar as previsões do tempo a muito curto prazo, em particular das situações que dão origem a tempo severo i.e, trovoadas e precipitação intensa.

A informação obtida com esta rede é utilizada em climatologia de trovoadas e densidade de raios, que permite apoiar estudos de gestão do território e alterações climáticas.

No âmbito da exploração desta rede é efetuado o intercâmbio de dados com quadro detetores do Instituto Nacional de Meteorologia de Espanha, o que permite melhorar o rigor na localização de descargas elétricas atmosféricas e a eficiência de deteção em todo o território continental [30].

3.5 Proteções

Esta dissertação pretende responder a algumas perguntas relacionadas com o comportamento de dispositivos de proteção contra descargas atmosféricas, nomeadamente, dispositivos ESE. Logo, é imperativo que parte desta contextualização passe pela compreensão da Norma e de que forma é que esta auxilia o processo de decisão de instalação de uma proteção.

Ao longo desta secção pretende-se dar a conhecer alguns parâmetros utilizados pelas Normas durante este processo, mais especificamente a *NP 4426* [31], que é uma adaptação da *EN 62305 Parte 2* [32]. relativamente aos dispositivos de emissão de pré descarga. É também do intuito desta dissertação, nomeadamente desta secção transcrever das respetivas Normas toda a informação relativa ao processo de decisão.

3.5.1 Parametrização e necessidade de proteção segundo a NP 4426

3.5.1.1 Danos e perdas

Fonte dos Danos

A corrente da descarga atmosférica (do raio) é a principal fonte dos danos. As seguintes origens são definidas pelo ponto de impacto (ver figura: 3.11):

- **S1:** Impacto direto na estrutura;

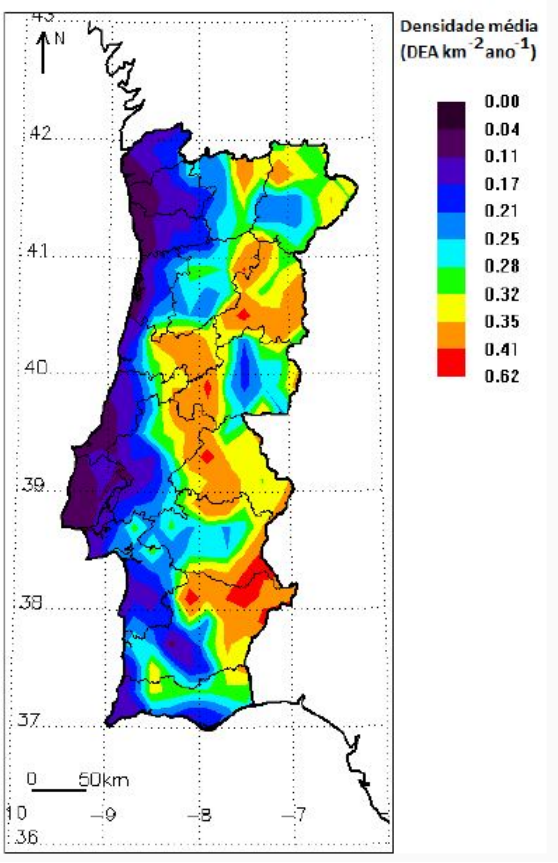


Figura 3.10: Mapa das descargas elétricas medidas pela rede de sensores entre 2003 e 2009.

- **S2:** Impacto na vizinhança da estrutura;
- **S3:** Impacto direto em serviços ligados à estrutura;
- **S4:** Impacto na vizinhança dos serviços ligados à estrutura;

Tipos de Danos

Os danos causados pela descarga atmosférica dependem de características dos objetos a proteger, como o tipo de construção, conteúdo e função, tipo de serviço e medidas de proteção existentes.

Para aplicações práticas da análise de risco, é aconselhável distinguir três tipos básicos de danos que podem aparecer como consequência de descargas (ver figura: 3.11):

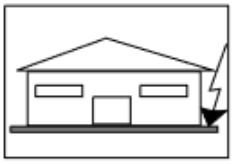
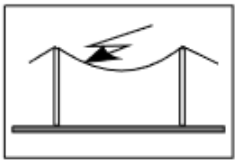
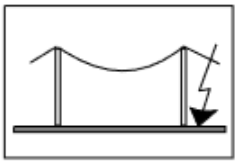
- **D1:** Danos em pessoas e animais;
- **D2:** Danos físicos;
- **D3:** Falha nos sistemas elétricos e eletrónicos;

Tipos de Perdas

Cada tipo de dano, seja de forma singular ou associada, pode provocar perdas diferentes nos objetos a proteger. O tipo de perda, de forma semelhante ao tipo de dano, depende de características do próprio objeto e do seu conteúdo.

Os tipos de perdas que vamos considerar são os seguintes (ver figura: 3.11):

- **L1:** Perdas de vidas humanas;
- **L2:** Perdas de serviços públicos;
- **L3:** Perda de bens culturais, antigos;
- **L4:** Perda de valores económicos (estruturas e seus conteúdos);

		Estrutura	
Ponto de impacto	**Fonte do dano**	**Tipo de dano**	**Tipo de perda**
	S1	D1 D2 D3	L1, L42) L1,L2, L3, L4 L11), L2, L4
	S2	D3	L11), L2 , L4
	S3	D1 D2 D3	L1, L42) L1, L2, L3, L4 L11), L2, L4
	S4	D3	L11), L2, L4

1) Só para estruturas com risco de explosão, hospitais ou outras estruturas onde falhas dos sistemas internos possam de imediato pôr em risco vidas humanas.

2) Só para propriedades onde se possam perder animais.

Figura 3.11: Fontes de Danos; tipos de danos e tipos de perdas de acordo com o ponto de impacto. [31]

3.5.1.2 Risco e componentes de Risco

Risco (R)

O risco é o valor médio anual de perdas prováveis. Para cada tipo de perda que possa surgir numa estrutura ou num serviço, deve ser avaliado o risco relevante:

Os riscos a serem avaliados podem ser:

- **R1:** Risco de perda de vidas humanas;
- **R2:** Risco de perda de serviços públicos;
- **R3:** Risco de perdas de bens culturais antigos;
- **R4:** Risco de perdas de valores económicos;

Para avaliação do risco, R, é necessário calcular e definir as componentes relacionadas com o mesmo (risco parcial dependendo da fonte e do tipo de perda). Cada risco é a soma de todas as componentes de risco e que podem ser agrupadas segundo a fonte e tipo de dano.

Componentes do Risco para uma estrutura devido a impacto direto

- R_A**:** Componente relacionada com danos provocados em seres vivos causadas pelo contacto e tensões de passo em zonas até 3 metros no exterior do edifício. Podem ocorrer perdas do tipo L1 e L4 (caso existam explorações no interior, provocando perdas animais);
- R_B**:** Componente relacionada com danos provocados por faíscas perigosas no interior da estrutura, provocando fogo ou explosão, podendo também pôr em perigo o ambiente. Neste caso existe a possibilidade de todo o tipo de perdas (L1, L2 e L3);
- R_C**:** Componente relacionada com falha de sistemas internos causados por um impulso electromagnético de descarga (LEMP). São consideradas perdas do tipo L2 e caso se trate de estruturas que possam por em perigo vidas humanas em caso de falha dos sistemas, como por exemplo Hospitais, são também adicionas perdas do tipo L1;

Componentes do Risco para uma estrutura devido a impacto na vizinhança

- R_M**:** Componente relacionada com falha de sistemas internos causados por LEMP. São consideradas perdas do tipo L2 e caso se trate de estruturas que possam por em perigo vidas humanas em caso de falha dos sistemas, como por exemplo Hospitais, são também adicionas perdas do tipo L1;

Componentes do Risco para uma estrutura devido a impacto sobre um serviço ligado à estrutura

- R_U**:** Componente relacionada com danos provocados em vidas por contacto no exterior da estrutura, devido à corrente injetada na linha que alimenta a estrutura. Perdas do tipo L1, no caso de propriedades agrícolas;
- R_V**:** Componente relacionada com danos físicos (fogo ou explosão) provocados por faíscas perigosas entre instalações externas e partes metálicas, geralmente no ponto de entrada da linha na estrutura. Podem ocorrer todo o tipo de perdas (L1, L2 e L3);
- R_W**:** Componente relacionada com falhas no sistema interno causadas por sobre tensões induzidas nas linhas de entrada e transmitidas à estrutura. São consideradas perdas do tipo L2 e caso se trate de estruturas que possam por em perigo vidas humanas em caso de falha dos sistemas, como por exemplo Hospitais, são também adicionas perdas do tipo L1;

3.5.1.3 Composição dos componentes do risco relacionados com a estrutura

As componentes do risco a considerar para cada tipo de perda na estrutura são as seguintes e estão combinadas também na figura 3.12:

- **R1: Risco de perda de vidas humanas**

$$R1 = R_A + R_B + R_C + R_M + R_U + R_V + R_W + R_Z \tag{3.5}$$

- **R2: Risco de perdas de serviço público**

$$R2 = R_B + R_C + R_M + R_V + R_W + R_Z \tag{3.6}$$

- **R3: Risco de perdas de bens culturais antigos**

$$R3 = R_B + R_V \tag{3.7}$$

- **R4: Risco de perdas de valor económico**

$$R1 = R_A + R_B + R_C + R_M + R_U + R_V + R_W + R_Z \tag{3.8}$$

Fonte de dano	Impacto direto numa estrutura S1			Impacto na vizinhança da estrutura S2	Impacto direto numa linha ligada à estrutura S3			Impacto na vizinhança de uma linha ligada à estrutura S4
Componente do Risco	*R*A	*R*B	*R*C	*R*M	*R*U	*R*V	*R*W	*R*Z
Risco para cada tipo de perda								
*R*1	*	*	*1)	*1)	*	*	*1)	*1)
*R*2		*	*	*		*	*	*
*R*3		*				*		
*R*4	* 2)	*	*	*	* 2)	*	*	*

[1] Apenas para estruturas com risco de explosão para hospitais com equipamentos elétricos de salvamento de vida e outras estruturas onde falhas no sistema interno ponham em perigo imediato, vidas humanas.

[2] Apenas para propriedades onde possa ocorrer a perda de animais.

Figura 3.12: Componentes de risco a serem consideradas para cada tipo de perda numa estrutura [31]

3.5.2 Avaliação do Risco

Procedimento Básico

Devem ser considerados os seguintes procedimentos:

- identificação do objeto a proteger e suas características;
- identificação de todas as possíveis perdas que possam ocorrer no objeto e riscos relacionados correspondentes (R1 a R4);
- avaliação do risco "R"para cada tipo de perda (R1 a R4);
- avaliação da necessidade de proteção, pela comparação do risco R1, R2 e R3 para uma estrutura com o Risco Tolerável (R_T);
- avaliação do custo efetivo da proteção em comparação com o custo total de perdas sem medidas de proteção. Neste caso, a análise dos componentes do risco R4 para a estrutura deve de ser calculado com o intuito de avaliar esses custos;

Estrutura a ser considerada para o cálculo do risco

As estruturas a considerar incluem:

- a própria estrutura;
- instalações na estrutura;
- conteúdo da estrutura;
- pessoas na estrutura ou que estejam em zonas afastadas até 3 metros da mesma;
- vizinhança afetada pelos danos da estrutura;

Risco Tolerável (R_T)

É da responsabilidade da autoridade que tem a jurisdição da estrutura, a definição do valor tolerável do risco. Valores representativos de R_T, toleráveis, onde as descargas envolvem perda de vidas humanas ou perda de valores sociais ou culturais são dados na figura 3.13 :

Tipo de perda	R_T (y–1)
Perdas de vidas humanas ou danos permanentes	10–5
Perda de serviço ao público	10–3
Perda de heranças culturais	10–3

Figura 3.13: Valores típicos de Riscos Toleráveis [31]

Procedimento específico para avaliar a necessidade de proteção

Os seguintes riscos devem ser considerados na avaliação da necessidade de proteção relativamente a um objeto ou estrutura:

- Calcular risco R1, R2 e R3 para a estrutura ou objeto;

  Para cada um dos riscos calculados seguir os seguintes passo:

- Identificação dos componentes de R_x que compõem o risco;
- Cálculo dos componentes identificadores do risco R_x;
- Calcular o risco total, R (ver 3.5.2);
- Identificação do risco tolerável, R_T (ver 3.5.2);

- Por fim, comparação de R com R_T:

  Se $R \leq R_T$ a proteção contra descargas atmosféricas não é necessária.
  Se $R > R_T$ devem ser adotadas medidas de proteção, de moda a reduzir $R \leq R_T$ para todos os riscos aos quais o objeto estará sujeito.

Procedimento para avaliação do custo efetivo da proteção

Associado a qualquer investimento está sempre o custo inerente. Logo, é necessário avaliar se a instalação, neste caso de um sistema de proteção, é rentável ou não.

A avaliação da comparação do risco R_4 para uma estrutura ou objeto permite ao utilizador avaliar o custo das perdas económicas com ou sem a adoção de medidas de proteção.

O procedimento para identificar o custo efetivo duma proteção segue os seguintes passos:

- Identificação das componentes do risco R_X que compõem o risco R4 para a estrutura;
- Cálculo da identificação dos componentes do risco "R_X"na ausência das novas/adicionais medidas de proteção;
- Cálculo do custo anual de perdas para cada componente do risco R_X
- Cálculo do custo anual C_L das perdas totais na ausência das medidas de proteção;
- Adoção da seleção das medidas de proteção;
- Cálculo das componentes do risco R_X que seleciona as medidas de proteção presentes;
- Cálculo anual do custo das perdas residuais devido a cada componente do risco R_X na estrutura ou serviço protegido;
- Comparação de custo:

  Se $C_L \leq C_{RL} + C_{PM}$ a proteção contra descargas atmosféricas pode ser considerada não rentável.
  Se $C_L > C_{RL} + C_{PM}$ medidas de proteção podem relevar-se económicamente viáveis ao longa da vida da estrutura ou serviço.

3.5.3 Raio de Proteção de um PDI

O raio de proteção de um para-raios ionizante, segundo a *NP 4426* está relacionado com a sua altura (**h**) em relação à superfície a proteger, ao seu tempo de avanço de ionização e ao nível de proteção selecionado.

$$R_p(h) = \sqrt[2]{2rh - h^2 + \Delta(2r + \Delta)}, \qquad para \quad h \geq 5m \tag{3.9}$$

e

$$R_p = h * \frac{R_p(5)}{5}, \qquad para \quad 2m \leqslant h \leqslant 5m \tag{3.10}$$

Onde,

- $R_p(h)(m)$ corresponde ao raio de proteção de uma dada altura h
- $h(m)$ é a altura da extremidade do PDI relativamente ao plano horizontal do ponto mais alto do objeto a proteger
- $r(m) = 20\ m$ Para proteção de nível I
- $r(m) = 30\ m$ Para proteção de nível II
- $r(m) = 45\ m$ Para proteção de nível III
- $r(m) = 60\ m$ Para proteção de nível IV
- $(m)\ \Delta = \Delta T * 10^6$

3.5.4 Diferentes Tipos de Proteção

O tipo de proteção a utilizar, depende de variados fatores, que foram sendo referidos em capítulos anteriores e que serão aprofundados ao longo desta secção. Fatores como o tipo de estrutura ou sistema onde será instalada a proteção, ou o sistema de terras que a mesma possui são fatores chaves na altura do dimensionamento de proteções.

O sistema de terra é um dos elementos mais essenciais num sistema de proteção contra descargas atmosféricas, pois será o responsável por escoar, em segurança, o poder destrutivo de uma descarga para a terra. Este sistema é transversal a todo o tipo de proteção e referido em praticamente todas as normas. A norma considerada durante esta dissertação, , [31] contém as definições e tipo de ligações à terra, sendo que se baseia na *parte 7* da norma *EN50164* [33].

O sucesso do sistema de proteção introduzido por Benjamin Franklin dura já há 200 anos, esta inovação de outrora, permitia, através duma haste de Franklin (PHS), captar, controlar e conduzir até à terra o incrível, mas destrutivo, poder de uma descarga atmosférica. Esta descoberta despoletou uma série de estudos envolvendo os sistemas de proteções e com novas ideias desenvolvem-se novas controvérsias.

A discrepância de ideias começa bem cedo em Inglaterra, quando o *Rei George III* instala hastes de ponta arredondada em detrimento das pontiagudas propostas por *Benjamin Franklin*, afirmando que esta atraem as descargas. Assim, começa um intensivo estudo relativo às diferenças entre ambas as hastes e de que maneira estas influenciam o campo elétrico [19].

Intrigado por estas afirmações *Llewelyn* realiza pesquisas extensivas e chega à conclusão que de facto existem diferenças significativas. As linhas equipotenciais relativas às hastes pontiagudas apresentam uma distribuição quase paralela e muito próxima uma das outras. Enquanto que, as linhas equipotenciais de uma haste arredondada formam um ângulo de 45º, que se estende desde a

ponta da haste até ao comprimento em que se encontra a haste, onde depois se tornam paralelas ao chão. Era do conhecimento de *Llewelyn* que a quantidade de iões presentes na vizinhança de uma estrutura poderia afetar a forma de como esta era atingida, assim sendo, resolveu ir mais longe e estudou o efeito do vento na emissão de iões. Concluiu que uma ponta pontiaguda entra em efeito de coroa com campos relativamente baixos, cerca de 100 V/m, enquanto que numa arredondada isso só acontece com campos de 10000 V/m.

É então, em 1901, que se cria o *British Lightening Commitee*, onde, um dos primeiros pontos do caderno de encargos seria definir a área de proteção relativa às pontas de proteção contra descargas. Conclui-se que essa área de proteção formava um ângulo de 45º com a ponta da haste e se prolongava até a uma distância no solo igual à altura da haste, como se exemplifica na figura 3.14. Ao longo de anos de experiência verifica-se que zonas de edifícios abrangidas pelo cone de proteção, continuam mesmo assim , a serem atingidas por descargas nas partes laterais. [19].

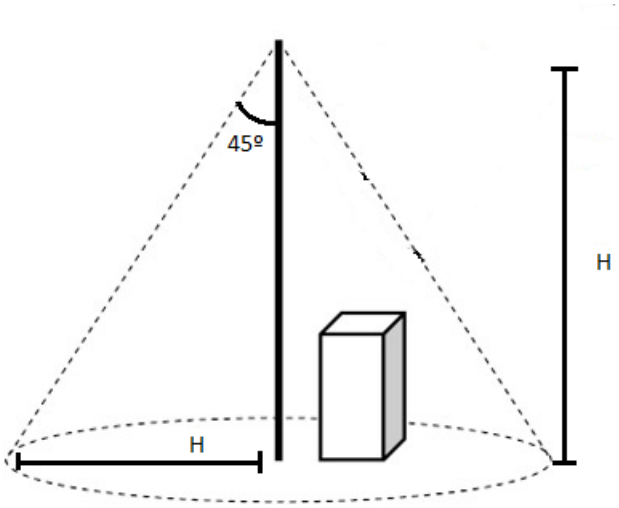


Figura 3.14: Zona de proteção ou Cone de proteção

Baseados no facto de que os líderes negativos tendem a avançar em degraus de 45,7m, à medida que progridem da nuvem em direção ao solo, e que quando estes se encontram a essa mesma distância de um objeto tendem a ser atraídos por esse mesmo objeto, pensa-se que se terá encontrado uma razão para que mesmo os edifícios mais altos sejam atingidos abaixo do topo. Daí, em 1970, advém um novo método conhecido como o método das esferas rolantes.

O principal conceito por detrás deste método consiste numa "distância de impacto"que pode ser definida como sendo a distância da ponta do líder descendente até ao objeto a ser atingido, no instante em que se começa a formar um traçado ascendente. O comprimento desta distância será o mesmo usado no raio das esferas que pode ser definido através da expressão 3.11. [34]

$$S = 8 * K * I^{0,65} \tag{3.11}$$

Onde:

- ***K*** Constante

$$\left\{ \begin{array}{cc} K = 1 & \text{cabos ou terreno} \\ K = 1,2 & \text{proteção já instalada} \end{array} \right\}$$

- ***I*** corrente do arco de retorno em kA.

- ***S*** raio da esfera rolante, dada em metros.

Para uma determinada "distância de impacto"(*striking distance*, podemos definir uma circunferência imaginária de raio igual a essa distância e rolá-la ao longo da superfície terrestre e dos objetos a proteger. Todos os pontos onde essa circunferência toca podem ser considerados seguros como se exemplifica na figura 3.15.

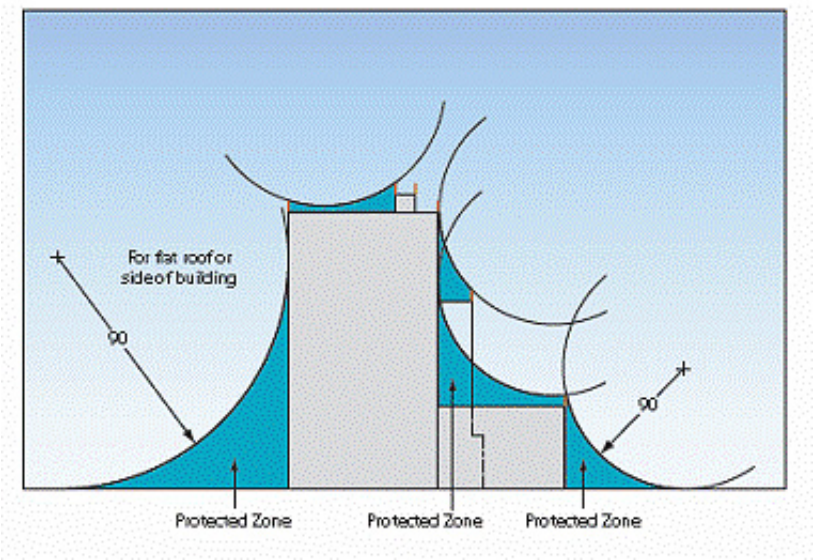


Figura 3.15: Exemplo da aplicação do Método das Esferas Rolantes (RSM)

Este modelo negligencia aspetos importantes relativos à física por detrás das descargas atmosféricas. No entanto, permite desenvolver técnicas simples e bastante úteis para efeitos de dimensionamento de proteções. Acresce o facto de que este método continua ainda hoje a ser utilizado, pois tem vindo a demonstrar a sua eficiência [24].

3.5.4.1 Para-raios de Franklin e Gaiola de Faraday

Apesar de estes serem dois tipos de proteções distintas, que já deram provas da sua eficácia quando postos à prova de maneira independente, na maioria das vezes, estes são instalados em conjunto. Abordar-se-á em primeira mão, ambas as proteções separadamente, e em seguida será dada uma explicação acerca das vantagens desta instalação combinada.[19]

para-Raios de Franklin

O para-raios de Franklin ou pára-raios de haste simples (PHS), além do sistema de terra é o tipo de proteção mais comum aquando dum dimensionamento, isto porque, além de ser extremamente simples, já existem há aproximadamente 200 anos. O para-raios inventado por *Benjamin Franklin* sofreu poucas alterações ao longo dos tempos e consiste, basicamente, em pontas feitas de um material condutor, como cobre banhado, níquel/crómio ou até em aço inoxidável, que se encontram ligadas à terra da forma mais direta possível.

Estas pontas caracterizam-se, para além da sua simplicidade, pelo seu formato pontiagudo.

A configuração de proteção e montagem pode ser mais uma vez revista na figura 3.14.

Gaiola de Faraday

Uma gaiola de Faraday, a grosso modo, consiste no envolvimento de um objeto através de um material condutor, normalmente metálico, criando assim, um escudo eletrostático. Em 1876, *James Clark Maxwell* sugeriu que o sistema criado por *Franklin* atraía mais descargas do que a vizinhança e propôs que um edifício cheio de pólvora fosse cercado por uma rede metálica, com espessura suficiente, formando aquilo que se conhece hoje em dia por gaiola de Faraday. Ele afirmava que mesmo que a estrutura fosse atingida por uma descarga, a corrente poderia ser mantida no exterior, mesmo se esta não tivesse ligada à terra. Nos dias de hoje, o efeito de uma gaiola de Faraday está presente na construção da maior parte dos carros e aeronaves.[24]

Este tipo de proteção, quando utilizada com propósitos de proteção contra descargas atmosféricas consiste na disposição dos condutores em forma de rede, formando assim a gaiola. Blindar edifícios com uma rede deste género é impraticável na maior parte dos casos, portanto é necessário ligar os elementos de construção como vigas de aço, cabos e fundações construindo assim a gaiola. A impraticabilidade de uma rede tão densa, faz com que os elementos constituintes dessa gaiola estejam a uma distância significativa uns dos outros o que não permite uma proteção absoluta, pois quanto maior for esse espaçamento, menos eficiente se torna a gaiola [18].

Este escudo eletrostático tem por objetivo atenuar quaisquer rádios frequências ou interferências eletrostáticas, que possam interferir com o funcionamento da aparelhagem dentro dessa gaiola. Normalmente, este tipo de proteção é utilizado em estruturas muito grandes, como parques industriais e também para produções fabris de eletrónica sensível, ou edifícios equipados com aparelhagem eletrónica.

Devido às várias razões apresentadas anteriormente, as gaiolas de Faraday utilizadas hoje em dia, não garantem proteção absoluta e a sua instalação é muitas vezes combinada com a instalação de pontas de Franklin. Isto porque, o custo da construção de uma gaiola que garantisse eficácia absoluta seria muito elevado.[19]

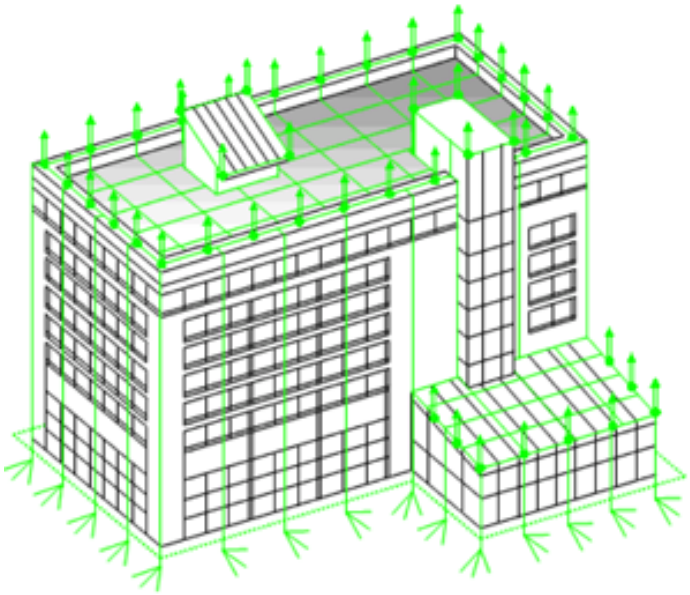


Figura 3.16: Exemplo de dimensionamento de uma gaiola de Faraday para proteção de uma infra-estrutura

3.5.4.2 Para-raios equipados com dispositivos de pré-emissão de descarga (PDI)

À medida que um líder negativo se aproxima da superfície, cria-se, devido a um aumento do campo elétrico induzido por este na vizinhança das "asperidades"do relevo, um traçado ascendente. Este traçado, ao unir-se com o traçado descendente origina um caminho por onde se escoa a corrente da descarga. Os defensores deste tipo de proteção ionizante afirmam que este dispositivo tem a capacidade de despoletar o efeito de coroa, independentemente da posição do líder descendente.[35] [36] Assim sendo, o tempo que demora a unir ambos os traçados é reduzido, consequentemente a área de proteção é maior. Segundo estas afirmações, se se utilizassem terminais aéreos providos destes dispositivos, não seriam necessários tantos terminais, nem condutores de baixada como os utilizados nos métodos convencionais (PHS). [37] [38][39]

Existem dois diferentes dispositivos de pré-emissão de descarga e a diferença entre eles reside na maneira como ionizam o ar à sua volta. Os sistemas podem ser radioativos ou não radioativos. No entanto, o primeiro já não é comercializado devido ao perigo que representavam. Não se abordará este tipo de sistema durante esta dissertação, pois é de todo irrelevante devido à sua desatualização.

Em seguida, apresentar-se-ão três diferentes tipos de para-raios não radioativos.

Eletrónicos

Este tipo de para-raios, como o nome indica, tem embutido um circuito eletrónico, constituído por elementos passivos, que geram impulsos elétricos com o objetivo de ionizar o ar na vizinhança. Como são impulsos, facilmente se compreende que o ar circundante não esteja a ser

constantemente ionizado, pois também não há necessidade para tal. No entanto, isto pode gerar um problema, pois não assegura que o ar esteja ionizado no momento em que se dá a descarga.

Este tipo de proteção foi o utilizado e submetido a ensaios durante esta dissertação e em que os constituintes do circuito eletrónico são maioritariamente resistências, condensadores e bobines, montados de forma semelhante ao circuito da figura 3.17 [37]

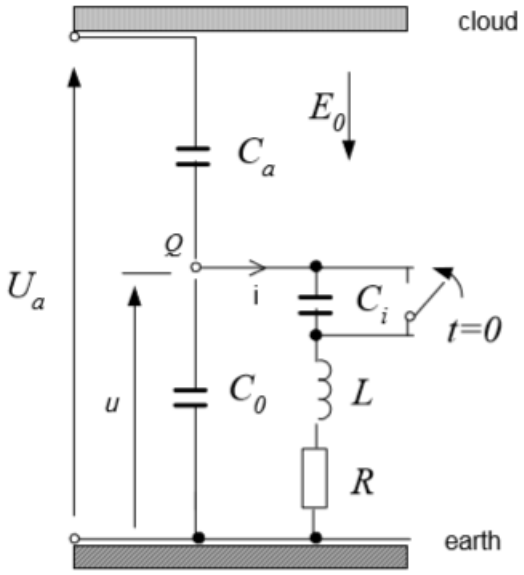


Figura 3.17: Circuito Equivalente de um dispositivo PDI

Relativamente à alimentação deste tipo de dispositivos, esta pode ser bastante complexa, devido a variados fatores relacionados com o seu funcionamento. Principalmente para a evitar interferências nos campos elétricos e magnéticos, pois são dois dos pontos fulcrais que, supostamente, tornam vantajosos este tipo de proteção. Em seguida apresentam-se algumas propostas de alimentação dos para-raios:

- **Alimentação proveniente do campo eletromagnético:** Um impulso de alta tensão é induzido pelo campo eletromagnético numa bobine. [37]

- **Alimentação proveniente do campo elétrico:** A ionização do ar é causada por impulsos elétricos produzidos por um gerador. O traçado descendente, que acontece na iminência de uma descarga provoca, como referido anteriormente, alterações no campo elétrico, que por sua vez, carregam os condensadores que alimentam o gerador. Este sistema de alimentação é o mais vulnerável devido aos efeitos térmicos e eletromagnéticos sobre os componentes eletrónicos;

- **Energia Solar:** Aproveitando a energia do Sol, este sistema, habitualmente, apresenta pequenos painéis fotovoltaicos para recolha de energia, que posteriormente será armazenada

em condensadores;

Piezoelétricos

A base de funcionamento deste tipo de proteção consiste na ionização do ar através de impulsos utilizando a energia do vento. O vento comprime o elemento piezoelétrico na ponta gerando uma tensão mecânica que, por sua vez, é transformada numa tensão elétrica. É esta tensão elétrica, que após ser amplificada e após o consequente aumento do campo elétrico gera um impulso, são estes impulsos que ionizam o ar na vizinhança.

Um dos fatores que tornam estes para-raios pouco viáveis é a sua dependência do vento. Na figura 3.18 podemos ver um exemplo de um para-raios desta natureza.

Figura 3.18: Exemplo de um para-raios com dispositivo piezoelétrico

Perfil Especial

Contrariamente aos exemplos apresentados anteriormente, este tipo de haste não possui nenhum dispositivo de despoletação de efeito coroa, nem eletrónico, nem radioativo. O princípio de funcionamento é a chave para o avanço à ionização, baseia-se na sua forma geométrica e nos materiais utilizados. A base de funcionamento é um dielétrico, que quando submetido a um campo elétrico, origina nos seus terminais uma diferença de potencial. Na iminência de uma descarga, o campo é maior, logo esta diferença de potencial atinge valores que levam à disrupção elétrica.

Capítulo 4

Caracterização dos Ensaios

4.1 Introdução

Após uma pequena introdução histórica, bem como um enquadramento do Laboratório de Alta Tensão e também da tecnologia de Sistema de Proteção contra descargas atmosféricas nos dias de hoje, abordar-se-á agora a parte laboratorial.

A fim de se puderem comparar os resultados obtidos laboratorialmente, tanto a nível nacional como internacional, todos os trabalhos laboratoriais devem seguir por certos requisitos aquando dos ensaios, aos quais se dá o nome de norma. As normas podem ser nacionais ou internacionais, havendo por vezes apenas pequenas variações de país para país. Por todas estas razões, o início deste capítulo passará por uma pequena abordagem à norma a utilizar.

Esta abordagem passará, em primeiro lugar, por uma breve descrição dos procedimentos operacionais das montagens, em seguida falar-se-á dos ensaios realizados, de onde se irão apresentar os resultados e respetiva análise.

4.2 Considerações à Norma Portuguesa 4426 (NP4426)

Como referido ainda que por brevemente no parágrafo anterior, existe uma grande necessidade de uniformização em alguns serviços e/ou competências, de maneira a se tornar mais fácil a troca de dados entre diferentes entidades de diferentes países. Deste modo, as normas são desenvolvidas por organismos que têm como objetivo isso mesmo, através da facultação de certos documentos técnicos bem como de *know-how*.

Tal como as normas, estes organismos podem funcionar a nível nacional, bem como a nível internacional. A nível internacional, a organização mais conhecida é a Organização Internacional de Normalização (*ISO – International Organization for Standardization*), a qual possui um ramo ligado à eletrotecnia, a Comissão Electrotécnica Internacional (*IEC – International Electrotechnical Comission*). Já a nível nacional existe o IPQ (*Instituto Português da Qualidade*), membro tanto do IEC, bem como do ISO [40]. Este instituto é o Organismo Nacional de Normalização (*ONN*) em Portugal, ou seja, é responsável pela gestão eficaz do processo normativo, tendo em

vista a edição de documentos normativos, promoção das condições adequadas à participação das partes interessadas no desenvolvimento, manutenção, divulgação, distribuição e gestão do acervo normativo nacional.

Em diversos países existem normas nacionais que, em muitos casos são semelhantes, às suas homónimas internacionais, relativamente a conteúdos técnicos. No entanto, estas poderão evidenciar certas diferenças editoriais relativas ao uso de símbolos/unidades e diferenças resultantes de conflitos nas regulações governamentais ou requerimentos específicos da indústria local, causados fundamentalmente por fatores climáticos, geográcos, sociais e técnicos. Deste modo, conclui-se que as normas internacionais podem ser aplicadas de forma direta ou adaptadas às condições específicas em análise, tendo em conta os fatores mencionados anteriormente. [40]

A Normalização propicia a redução de custos para fornecedores e clientes, aumenta a transparência do mercado, ajudando a criar novos negócios e mantendo os existentes, pois são um meio de garantir aos clientes que os produtos/serviços detêm o adequado grau de qualidade, segurança e respeito pelo ambiente.

Numa economia aberta como é o caso da portuguesa, as atividades de Normalização são de extrema importância para reforço e credibilidade das transações comerciais, sejam elas efetuadas no mercado nacional ou além fronteiras, pois estas facilitam igualmente as trocas comerciais na medida em que, para além da diminuição dos custos, reduzem as assimetrias de informação entre a oferta e da procura. [40]

Os trabalhos laboratoriais realizados nesta dissertação têm por base a Norma Portuguesa 4426, *Proteção contra Descargas Atmosféricas, Sistemas com dispositivo de ionização não radioativo.*

O preâmbulo da NP 4426 afirma que esta foi elaborada pela Comissão Técnica Electrotécnica CTE 81, "Protecção contra descargas atmosféricas e seus efeitos", cujo secretariado é assegurado pelo ONS/IEP. Afirma também que, a mesma se destina a substituir a NP 4426:2003 e a sua Emenda 1:2009, pois após a publicação da série de Normas EN62305, mais particularmente a 3ª parte, onde se definem requisitos para protecção de estruturas contra descargas atmosféricas, sentiu-se uma necessidade de atualizar a norma portuguesa. [31]

Tendo em consideração que os dispositivos providos de ionização (PDI) são relativamente recentes e toda a controvérsia que os envolve, a NP 4426 faz questão de assinalar na sua introdução que as normas internacionais relativas a estes dispositivos de proteção são inexistentes. Desta forma, e perante esta lacuna a revisão mencionada no parágrafo anterior à NP4426, tornou-se essencial para fornecer os requisitos de conceção de um para-raios com dispositivo de avanço da ionização bem como as regras de instalação de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas utilizando este dispositivo.

De salientar, que quer as normas nacionais como internacionais relativas a PDI e PHS, respetivamente, não garantem total proteção contra descargas, ou seja, estas proteções, mesmo que realizadas segundos as normas, apenas reduzem o risco de impacto direto na estrutura. [31]

4.2.1 Conceitos e Definições presentes na NP 4426

Para entendimento da NP4426 apresentam-se agora, alguns conceitos e abreviaturas:

Sistema de Proteção contra descargas atmosféricas com dispositivo de ionização(SPDI)

Sistema completo baseado em um ou mais PDI e todos os elementos necessários para conduzir a corrente da descarga atmosférica à terra com toda a segurança a fim de proteger uma estrutura, um edifício ou uma área aberta contra os impactos diretos das DA;

SPDI,isolado

SPDI,na qual o captor e o condutor de baixada são colocados de modo a que a corrente da descarga atmosférica, não possa circular na estrutura a proteger.

SPDI,não isolado

SPDI,na qual o captor e o condutor de baixada são colocados de modo a que a corrente da descarga atmosférica pode fluir através da estrutura a proteger.

Para-raios de haste simples(PHS) de referência

Haste metálica de forma geométrica definida na presente norma, a fim de servir como referência;

Para-raios com dispositivo de ionização(PDI)

Para-raios que nas mesmas condições gera um traçador ascendente de inicialização mais rápido que um para-raios de haste simples(PHS);

Eficácia do PDI(ΔT)

Diferença em microssegundos entre o tempo de emissão do traçador ascendente de um elemento captor PDI e um elemento captor de haste simples(PHS), medido em laboratório sob as condições definidas no presente documento e revisto mais à frente;

Corrente de Choque(I_{imp})

Corrente de pico (I_{pico}), definida por uma carga "Q"e uma energia especíca;

Corrente causadora de avaria ou dano (I_a)

Valor mínimo de pico da corrente da descarga atmosférica que causa danos;

Condutor de Baixada

Parte do sistema de proteção contra descargas atmosféricas que se destina a conduzir a corrente de descarga do PDI para a terra;

Condutor de baixada específico

Condutor de baixada conforme a *EN 50164-2*, mas que não faça parte dos componentes naturais da estrutura;

Sistemas Eletrónicos

Sistema composto pelos componentes eletrónicos sensíveis, tais como equipamentos de comunicações, computadores, sistemas de controlo e sistemas de medição, sistemas de rádio e as instalações de eletrónica de potência;

Zona de proteção contra descargas atmosféricas (ZPDI)

Zona onde o ambiente eletromagnético da descarga atmosférica é definido;

Zona Protegida

Zona protegida por um sistema de proteção contra descargas atmosféricas, com dispositivo de ionização não radioativo;

Zona de uma estrutura (Z_s)

Parte de uma estrutura, cujas características são homogéneas e em que um conjunto de parâmetros são utilizados para avaliar uma componente de risco;

Nível de Proteção contra descargas atmosféricas (N_p)

Valor associado ao conjunto de parâmetros da corrente de descargas atmosféricas, indicando a probabilidade de que os valores de conceção máximo e mínimo associados não serão ultrapassados se a descarga aparecer de uma forma natural;

Tensão nominal de Impulso (U_w)

Valor da tensão de impulso definido pelo fabricante e para o equipamento ou parte dele, caracterizando a capacidade específica do seu isolamento suportar a sobretensão;

Impulso Eletromagnético da descarga atmosférica (Lemp)

Efeitos eletromagnéticos da corrente da descarga atmosférica;

Sistema de medidas de proteção contra Lemp (SMPI)

Instalação completa de medidas de proteção contra Lemp para os sistemas interiores;

Protetor de Sobretensões (SPD)

Dispositivo destinado a limitar as sobretensões transitórias e a escoar as correntes da descarga atmosférica. Incluí pelo menos um componente não linear;

Ligação equipotencial

Interligação ao SPDI das partes condutoras separadas duma instalação por ligações diretas ou através de protetores de sobretensões, reduzindo as diferenças de potencial causadas pela corrente da descarga atmosférica;

Superfície Equivalente de exposição duma estrutura (Ad)

Superfície do solo plana sujeita ao mesmo número de descargas atmosféricas que a estrutura a proteger;

Perda (L_x)

Valor médio de perdas (pessoas e bens) resultantes de um tipo especíco de dano devido a um evento perigoso, em relação ao valor (de pessoas e bens) do objeto a proteger;

Probabilidade de dano (P_x)

Probabilidade de um evento perigoso causar danos num objeto a proteger;

Frequência de eventos perigosos, devido a descargas sobre uma estrutura (N_D)

Número médio anual de eventos perigosos previsíveis causados por descarga atmosférica numa estrutura;

Frequência de eventos perigosos causados por descargas atmosféricas com impacto sobre um serviço (N_L)

Número médio anual de eventos perigosos, previsíveis, causados por descargas atmosféricas devido a um impacto sobre um serviço;

Frequência de eventos perigosos causados por descargas atmosféricas na proximidade de uma estrutura (N_M)

Número médio anual de eventos perigosos previsíveis, devido a impacto de descargas atmosféricas na proximidade de uma estrutura;

Frequência de eventos perigosos causados por impacto de descarga atmosférica na proximidade de um serviço (N_I)

Número médio anual de eventos perigosos previsíveis, devido a impacto de descarga atmosférica na proximidade de um serviço;

Risco (R)

Medição da perda anual média provável, de pessoas e bens, devido a descargas atmosféricas, em relação ao valor de pessoas e bens do objeto a proteger;

Componente de Risco(R_X)

Risco parcial que depende da causa e do tipo de dano;

Risco Tolerável (R_T)

Valor máximo de risco que pode ser tolerado pelo objeto a proteger;

4.3 Preparação da Montagem

Com o objetivo de recriar as condições elétricas encontradas durante uma trovoada e durante a ocorrência de descargas atmosféricas, é necessária a utilização de um certo conjunto de equipamentos, de voltar a referir que a utilização deste equipamentos segue a NP 4426.[31]

Plataforma Metálica

Este prato é basicamente uma plataforma metálica circular que tem por objetivo simular a base da nuvem. Esta é feita de alumínio, e, com vista a diminuir o campo elétrico, esta foi coberta na sua periferia por uma manga de alumínio. Segundo a norma é necessário que esta estrutura metálica tenha "como mais pequena dimensão horizontal (diâmetro), a distância prato/solo". No caso do utilizado no LAT-FEUP, com o intuito de cumprir distâncias de segurança, definiu-se a uma altura 2,05m, sendo o seu diâmetro de 3m. Esta decisão de exceder em aproximadamente 1m o diâmetro necessário, prende-se com o facto de tornar este equipamento mais polivalente para mais tipos de ensaios. figura 4.1.

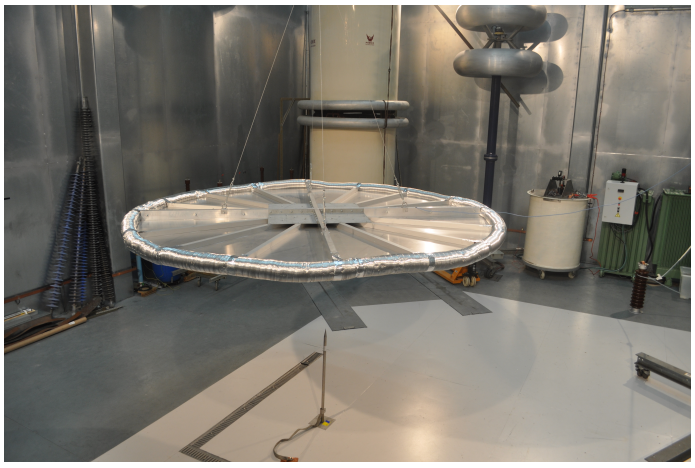


Figura 4.1: Plataforma metálica utilizada durante os ensaios

Fonte de Tensão DC

Em conjunto com o prato, e como fora referido anteriormente, a fonte de tensão ajuda a simular o campo elétrico presente na base de uma nuvem. A fonte encontra-se ligada à plataforma, carregando-a com uma tensão DC.

A norma exige que a tensão aplicada a este esteja compreendida entre os 20kV/m e os 25kV/m, deste modo e com a uma altura de 2,05m, decidiu-se carregar o prato com uma tensão DC de aproximadamente 45kV. Esta tensão traduzir-se-á por uma tensão DC de 21,95kV/m, ou seja, uma tensão dentro dos requisitos que a norma exige.

Durante os ensaios realizados para esta dissertação foram utilizadas duas fontes de tensão DC diferentes. A primeira que já havia sido utilizada em ensaios semelhantes no passado, segundo a sua ficha técnica, apenas tinha a capacidade de debitar uma tensão máxima de 40kV (4.2).

Figura 4.2: 1ª Fonte de Tensão DC utilizada

No decorrer dos ensaios a fonte apresenta anomalias, apesar de nunca ter dados sinais disso, visto que os dispositivos de proteção, como os fusíveis estavam intactos.

O único equipamento que o LAT-FEUP possuía capaz de atingir tão elevada tensão DC estava agora inutilizável e imperativo arranjar uma solução. Esta fonte de tensão é um equipamento não muito recente e sabe-se que não seria fácil encontrar alguém com conhecimentos para resolver o problema. Logo, decidiu-se imediatamente tentar remediar o problema, e, com os nossos conhecimentos e limitações descobrir qual seria o/os componente/s que pudessem ter ficado danificados e, se possível, substituí-los. Desta forma decidiu-se abrir a fonte DC para verificação das possíveis anomalias que pudessem ter ocorrido, constatando que o problema, possivelmente residia na parte da alta tensão, que se encontrava isolada numa caixa blindada . Como não conseguimos abrir esta caixa, e mesmo que se conseguisse, não era certo que conseguíssemos resolver o problema, então, a melhor opção passaria por tentar que alguma empresa conceder por algum tempo uma fonte de tensão DC.

Esta opção, por melhor que fosse, não iria ser muito fácil de atingir devido a diversos fatores. Em primeiro lugar, uma fonte de tensão DC com esta capacidade, além de ser um equipamento dispendioso, não é um equipamento muito habitual e que muitas empresas possuam, pelo menos em Portugal. É um equipamento que habitualmente é utilizado para testar cabos de Alta tensão e caso as empresas precisem de realizar ensaios a esses cabos não o poderiam disponibilizar. Em segundo lugar, alguns destes equipamentos são incrivelmente pesados e de dimensões que tornariam a logística de o trazer para o nosso laboratório muito complicada.

Felizmente, a EFACEC, disponibilizou-nos o equipamento (4.3) e este ainda tinha a capacidade de atingir tensões mais elevadas. Esta fonte de tensão é constituída por diversos módulos e permite elevar a tensão até 240kV. Esta fonte DC não possuía proteção no seu secundário, referente à alta tensão, por essa razão era imperioso que o sistema de proteção fosse eficaz, o que se veio a constatar no decorrer dos ensaios.

Figura 4.3: 2ª Fonte de Tensão DC utilizada

Onda de Manobra

A norma especifica que o campo impulsional deverá ser simulado por uma onda de choque de manobra negativa com um tempo de subida compreendido entre os 100μs e os 1000μs. Nos ensaios realizados, decidiu-se aplicar uma onda de manobra (250/2500μs) porque além de ser uma onda bastante energética também é considerada uma onda tipo, segundo a *EN60060-1.* [2]

Com o objectivo de se moldar a forma de onda, utilizando-se diferentes tipos de configuraçoes de resistências, tais como:

- Resistência de carga 8,4 $k\Omega$;
- Resistência em paralelo 8,4 $k\Omega$;
- Resistência em série 20 Ω;
- Resistência em série com o gerador que será aprofundada mais à frente em 4.3

Sistema de proteção a fonte de tensão DC

Esta dissertação tem como objetivo aprofundar os estudos realizados numa anterior dissertação realizada no LAT-FEUP pelo Engenheiro Tomás Sapage, pretendendo também melhorar alguns aspetos que não se conseguiram atingir no passado. Um dos aspetos a que me refiro e que foi referido como ponto fulcral nos trabalhos a desenvolver no futuro passa pela reconfiguração do sistema de proteção à fonte e esta, na minha opinião, foi uma grande vitória desta dissertação.

A configuração das montagens durante os ensaios prevê que tanto a fonte de tensão, bem como o gerador de choque estejam ligados ao prato, desta forma, torna-se evidente que é necessário proteger os equipamentos mais sensíveis, como é o caso da fonte de tensão, contra qualquer sobretensão que possa ocorrer no sistema.

O sistema de proteção utilizado em ensaios passados [1] previa a utilização de duas resistências de 50 $M\Omega$ e um elemento de proteção *Gas Discharge Tube (GAS)*. Já outra configuração realizada por um laboratório francês[37] (figura 4.4) previa apenas uma resistência de 100$M\Omega$, portanto decidiu-se que o nosso sistema apresentaria apenas duas resistências de 50$M\Omega$ em série com a fonte de tensão. Tanto para estas duas resistências, bem como para a resistência de frente, foram criadas resistências aquosas, sobre as quais aprofundar-se-á na secção 4.3.

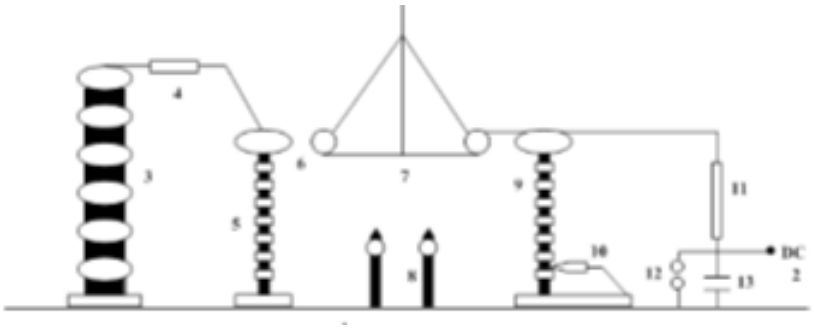


Figura 4.4: Esquema de montagem sugerido por [37]

Onde:

1. Chão Revestido de material Condutor;
2. Fonte de Alta Tensão DC;
3. Gerador de Marx;
4. Resistência de Frente;
5. Condensador Rectificador de Onda;
6. Insulation Gap (funciona de forma análoga ao nosso espinterómetro);
7. Prato;
8. Para-raios;
9. Divisor de tensão;
10. Ponta de prova;
11. Resistência de proteção à fonte;
12. Espinterómetro;

Sistema de proteção do gerador de choque

Analogamente à fonte DC é também necessário proteger o gerador de Marx contra eventuais sobretensões, portanto utilizaram-se explosores entre o divisor de tensão do gerador e a plataforma.

Para configurar esta proteção é necessário definir uma distância entre as esferas, de maneira a que não se dê o contornamento do ar para um certo valor de tensão. Com o auxílio da norma internacional *IEC 60052 (2002): Voltage measurement by means and standard of air gaps*, definiu-se uma distância para uma tensão eficaz de 98,99kV. [7] [41] [42] O esquema de montagem das ligações ao explosor podem ser verificadas nas próximas imagens, 4.5 4.6:

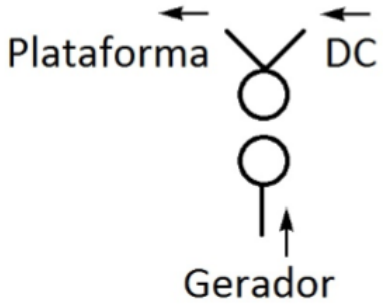


Figura 4.5: Esquema de ligações ao explosor [1]

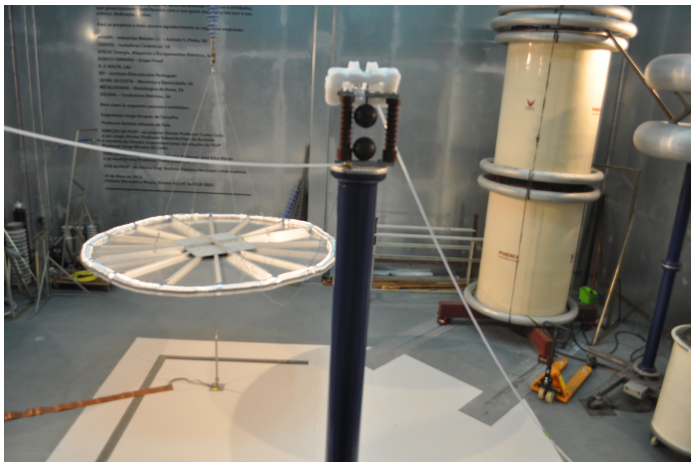


Figura 4.6: Montagem dos explosores utilizada no LAT-FEUP para proteção do gerador

Divisor de tensão DC

Ambas as resistências que protegem a fonte de tensão são aquosas e o comportamento das mesmas sobre tensão não é conhecido, acresce o facto de ambas as resistências serem elevadas. Por todas estas razões achou-se necessário recorrer a um divisor de tensão para confirmar que os desvios de tensão não era muito significativos e desse modo garantir que o prato esta carregado à tensão desejada.

Segundo a ficha de características do divisor de tensão DC, este tem uma capacidade interna de $12pF$ e uma resistência interna de $480M\Omega$, permitindo suportar frequências de funcionamento de 1MHz. [1]

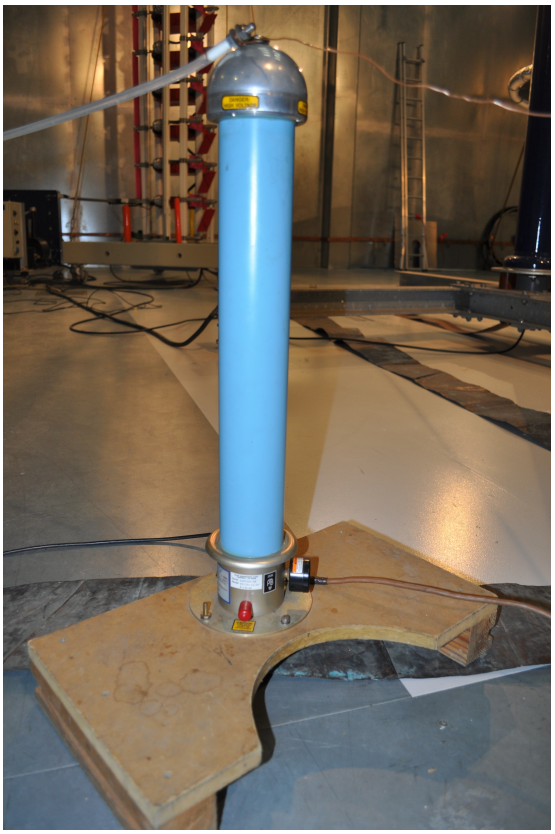


Figura 4.7: Divisor de tensão DC utilizado durante os ensaios

Sistema de Terras

Para efetuar leituras de valores de tensão recorre-se aos divisores de tensão, aparelhos onde essas leituras são coordenadas em relação à terra. Logo, é de extrema importância que a distribuição de terras no hall onde vão decorrer os ensaios seja feita de maneira correta.

Por sua vez, esta distribuição no LAT-FEUP encontra-se dividida em duas partes:

Terra de Ensaio

A terra de ensaio é responsável pela ligação entre o para-raios e o gerador, bem como o divisor de tensão e o regulador. Este conjunto de ligações é geralmente apelidado de ponto estrela, pois representa um ponto comum de ligação.

Terra do Laboratório

O próprio laboratório possui uma sistema de terras, a terra de serviço ou terra do laboratório que tem como principal função proteger toda a aparelhagem não afeta ao ensaio, como por exemplo, o transformador e seu divisor de tensão, sistema de chuva, entre outros.

Resistências

Para a montagem do sistema relativo aos ensaios foi necessária a elaboração de dois tipos diferentes de resistências.

A primeira, faz a ligação do gerador ao divisor de tensão, denominada por resistência de frente. As outras duas são as responsáveis pela proteção da fonte DC.

Resistência de frente

Foi necessário fazer a ligação do gerador de choque ao divisor de tensão cumprindo certos requisitos, como manter a distância de segurança do gerador ao divisor e fazer com que o tempo de frente da onda estivesse compreendida entre os 200μs e os 300μs. A primeira solução encontrada consistia em construir resistências aquosas, sendo fundamental encontrar uma solução que possuísse determinadas características elétricas.

Portanto, o problema consiste em construir uma mangueira com um comprimento de aproximadamente 4m e com uma resistência de $45k\Omega$:

Sabendo que:

$$R = \rho * \frac{L}{A} \tag{4.1}$$

Onde:

- R = $45k\Omega$;
- L = 4m;
- ρ é a resistividade elétrica a encontrar.

- A = secção.

Sabe-se também que a condutividade é o inverso da resistividade:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \tag{4.2}$$

Depois de algumas pesquisas encontram-se duas soluções que utilizamos diariamente e que poderão possuir características elétricas muito semelhantes às desejadas, o vinagre e o soro fisiológico.

Em primeiro lugar, o vinagre ou ácido acético (CH_3COOH) é uma mistura homogênea entre o ácido acético e água e, sabendo que, a condutividade elétrica está diretamente relacionada com a quantidade de compostos iônicos e, consequentemente, eletrões livres presentes numa solução. Quanto maior for a presença destes iões, mais facilmente se conduz a energia elétrica e no caso dos ácidos a capacidade de condução é medida pelo grau de ionização, que no caso do vinagre é bastante baixo, o que o torna praticamente ideal. Um grande inconveniente na utilização desta solução prende-se no fato de que o ácido acético, como muitos outros ácidos, é volátil, ou seja tende a mudar para o estado gasoso muito facilmente, o que além de alterar os valores de resistência das mangueiras, liberta um odor muito forte.

Apesar de se ter conseguido atingir valores dentro dos limites desejados, rapidamente se constatou que essa mesmo volatilidade fazia que com o tempo, a resistência se degradasse rapidamente e dessa maneira tornava a sua utilização impraticável.

Depois de se chegar à conclusão que a utilização de vinagre não era viável decidiu-se passar para a segunda opção, soro fisiológico ou N_aC_l. A solução utilizada apresenta 0.9% em massa de N_aC_l dissolvida em água destilada, o que no fundo não diverge muito da solução encontrada para a resistência de frente, pois reside na dissolução de sal de cozinha em água destilada, mas com uma concentração muito reduzida, a qual dificilmente se conseguiria reproduzir.

Depois de se adquirir quantidade suficiente desta solução para se encher as mangueiras e com a noção que a condutividade elétrica poderá variar consoante a marca do soro fisiológico começa-se mais uma vez a construir as mangueiras num processo de tentativa erro. De notar que esta constante recorrência a este processo só acontece, porque nem o LAT-FEUP, nem o Departamento de Engenharia Eletrotecnia, se encontram equipados com aparelhos que permitam a medição da condutividade elétrica de soluções.

É então, que surge mais um problema na construção das mangueiras. Estas devem ser fechadas dentro da solução que contêm, deste modo evita-se a criação de bolhas de ar dentro da mangueira o que leva a descargas parciais e mesmo a alteração dos valores de resistência. A tarefa de as selar dentro da solução de soro fisiológico foi bastante complicada, porque sem nenhuma explicação aparente a solução demonstra ser mais propícia à criação de pequenas bolhas.

Seladas as mangueiras é altura de medir a sua resistência utilizando um multímetro, o que apresenta valores de resistência de cerca de $55K\Omega$ para ambas as resistências. Valores estes que se encontram dentro dos limites a alcançar, mas na altura de dar o aperto final nas roscas nas

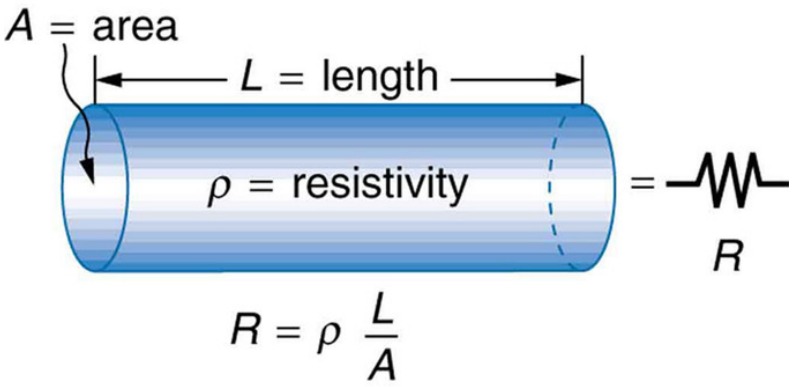


Figura 4.8: Exemplo para elaboração das resistências

extremidades das mangueiras e depois voltar a confirmar os seus valores, repara-se que estes valores eram afetados significativamente. Volta-se a refazer as mangueiras e a situação volta-se a repetir sem nenhuma explicação aparente. Mais uma vez a solução encontrada não era a ideal, mas desta vez não se conseguiu chegar à origem do problema.

Considerando as equações, 4.1 e 4.2 e sabendo que a condutividade da água da companhia é de 246 μs/cm, era necessário aumentar este valor. Como referido anteriormente, os principais responsáveis pela condução de energia elétrica são os compostos iônicos e compostos catiônicos que são, no fundo, materiais sólidos que se dissolvem na água, como sulfatos, cloretos, entre outros. Logo, conclui-se que a simples adição de cloreto de sódio (sal de cozinha), poderia aumentar a condutividade elétrica da água.

Depois de várias tentativas falhadas, conseguiu-se encontrar a solução desejada com cerca de 22g de cloreto de sódio para 2L de água, onde se obteve uma resistência de aproximadamente 47kΩ.

A partir de pesquisas feitas anteriormente, acerca de resistências aquosas, chega-se à conclusão que as propriedades elétricas da solução que se encontra dentro da mangueira poderiam ser afetadas pelas mudanças de temperatura ambiente. A isto, acresce o fato de que as contínuas descargas, às quais as resistências estão sujeitas, aliadas a ensaios muito longos, poderão elevar a sua temperatura.

Por todas estas razões foi necessário refazer a resistência de frente mais do que uma vez, porque ou a temperatura ambiente se tinha alterado significativamente ou as descargas tinham aquecido demais a solução. Devido a estas alterações de temperatura, os tempos de frente da onda de manobra não se encontravam dentro dos limites da norma.

De seguida, apresentam-se as novas concentrações das soluções encontradas e que, basicamente, são uma tentativa de adaptar essas concentrações à temperatura ambiente desse dia, numa base de tentativa-erro. É de realçar que o valor das resistências não se alteravam frequentemente.

1. 2L de água da torneira + 15,9g :

   A resistência apresenta um valor de aproximadamente 65 $k\Omega$;

Figura 4.9: Exemplo das resistências utilizadas

Resistência de proteção à fonte

Analogamente à resistência de frente, a construção de estas duas resistências baseia-se na equação (4.1). A grande diferença reside apenas na condutividade da solução, pois estas novas resistências são cerca de 1000x superiores à anterior.

Com o objetivo de atingir $50M\Omega$ em cada resistência, as opções passam por dimensionar a mangueira de maneira diferente ou então, encontrar uma solução com a condutividade ideal. Através de uma folha de Excel conseguiu-se determinar variadas soluções, tanto para diâmetro ou comprimento da mangueira, bem como para a condutividade da solução a utilizar, decidiu-se, então, manter as dimensões e descobrir uma solução que possuísse a condutividade certa.

Estas resistências são de elevada resistividade, logo era imperativo encontrar uma solução com uma baixa condutividade (4.2). O valor ideal de condutividade seria cerca de 10,19 μS/cm, ou seja, cerca de 20x inferior à condutividade da água da torneira não sendo possível, desta vez, acrescentar sais dissolvidos, visto que, esta solução só aumentaria a condutividade da água. Desta forma, será necessário outra alternativa.

Nesta fase, as ideias de como construir as resistências eram escassas e parecia que a única opção passaria por dimensionar de outra maneira as mangueiras. Ou se alterava o diâmetro ou o comprimento da mangueira. Em relação à primeira opção as limitações são evidentes, pois apesar de haver uma gama variada de mangueiras com distintos diâmetros, esta não é tão vasta que nos permita encontrar um tamanho ideal. Relativamente ao comprimento era imperativo aumenta-lo de tal maneira que as suas dimensões tornavam a sua utilização dentro do laboratório impraticável.

Volta-se à fase inicial, encontrar uma solução com a resistividade pretendida.

Sabe-se que a condutividade elétrica da água da torneira é cerca de 20x superior à pretendida e sabe-se também que a condutividade da água destilada é muito baixa, por vezes de 5 μS/cm, uma vez mais dependente da marca. Com relativamente poucos conhecimentos de química decidiu-se encher ambas as mangueiras, uma apenas com água da torneira e outra com água destilada. O objetivo seria, chegar a uma solução com uma percentagem de ambas as águas que permita atingir

a resistência necessária.

A mangueira com apenas água da torneira apresenta uma resistência de cerca de 2 $M\Omega$, enquanto que a outra apresenta uma resistência de aproximadamente 135 $M\Omega$. Ingenuamente, decide-se através de cálculos tentar encontrar as percentagens necessárias de cada tipo de água, teoricamente deveria funcionar, mas na prática não funcionou. Existia a possibilidade de o problema não ser assim tão linear, isto porque os sais presentes na água da torneira poderiam alterar as características da água destilada e o problema não era resolúvel através de uma simples regra de três simples.

Visto que a água da torneira apresenta uma condutividade demasiado alta, a resolução do problema poderia passar por uma tentativa de remover uma certa quantidade de compostos, presentes na água, responsáveis pela condução elétrica, recorrendo a algum tipo de processo como uma destilação. Agora, o problema ultrapassa ainda mais a minha área de conhecimento e dos colegas do LAT-FEUP e nem com recurso a pesquisa se conseguiu resolve-lo. Foi então fundamental recorrer ao Departamento de Engenharia Química.

No Departamento de Engenharia Química reunimo-nos com uma professora que explicou a diferença entre soluções orgânicas e inorgânicas e porque é que a nossa tentativa de misturar as duas soluções não era tão linear como se pensava. Aí, também se soube que a nossa ideia de destilação da água da torneira não era descabida de todo e que, teoricamente, funcionaria, mas encontrou-se uma solução mais acessível.

A alternativa passava por misturar ambas as águas, mas com ajuda de instrumentos de medida, tanto de quantidade e mais fundamentalmente, de condutividade. Começa-se com uma solução base que contem 40mL de água destilada para a mesma proporção de água da torneira, onde se obtém uma condutividade de 139 μS/cm, gradualmente adiciona-se água destilada para diminuir este valor, atingindo assim 11,2 μS/cm. Este valor não é exatamente o pretendido, mas é uma boa aproximação e resolvemos reproduzir esta solução no laboratório, mas em maior quantidade.

Após se calcular as percentagens necessárias de cada tipo de água para uma maior quantidade de solução final, enchem-se as mangueiras e uma vez mais medem-se as resistências. As resistências estava então muito baixas, aproximadamente 8 $M\Omega$. Talvez a água destilada que se utilizou apresentasse uma condutividade bastante diferente da utilizada na solução de amostra ou existe mesmo a possibilidade da água da torneira poder variar as suas propriedades de dia para dia. Era imperioso replicar uma quantidade suficiente para encher as mangueiras, mas recorrendo mais uma vez a um condutivímetro.

Há mais uma tentativa de se recorrer ao Departamento de Química da Faculdade de Engenharia, mas devido a um atraso na resposta da parte deles, sentiu-se a necessidade de avançar e arranjar alternativas, ainda que se tivesse que recorrer a outras instituições. Foi então, no Departamento homónimo do Instituto Superior de Engenharia do Porto, que com o auxílio dos Engenheiros Tomás Albergaria e Ana Peixoto, se procede de maneira semelhante ao trabalho desenvolvido anteriormente. Desta vez, começa-se com uma solução base de 50ml de água destilada e 20ml de água da torneira obtendo uma condutividade de 69,4 μS/cm, gradualmente se baixa esta condutividade

pela adição de água destilada. Obtém-se então uma solução de condutividade 10,18 μS/cm que consiste na adição de 535ml de água destilada para 20ml de água da torneira.

De volta ao laboratório refazem-se as resistências e obtemos uma resistência de aproximadamente 50 $M\Omega$ em cada uma, chega-se agora à solução ideal.

Com o passar do tempo, mais uma vez as resistências são afetadas pela temperatura e as mangueiras começam a apresentar pequenas bolhas de água. Estas não são tão afetadas como a resistência de frente, talvez devido às suas elevadas resistências.

É então necessário refazer as resistências por mais duas vezes durante as semanas de preparação das montagens e durante a realização dos ensaios, com as seguintes concentrações:

1. 1,7L de água destilada + 50ml de água da torneira:

   Ambas as resistências apresentam um valor de aproximadamente 50 $M\Omega$;

2. 1,7L de água destilada + 40ml de água da torneira:

   R_1 = 60,7 $M\Omega$;

   R_2 = 57,5 $M\Omega$.

4.4 Início dos Ensaios

4.4.1 Verificação e Validação da Montagem

Depois de analisado todo o sistema pertencente à montagem da aparelhagem a ensaiar e antes de iniciar os ensaios, é essencial realizar uma verificação e validação dessa mesma aparelhagem para conhecer assim o seu comportamento sob tensão. Acresce o fato que é ainda mais imperioso, conhecer o comportamento das resistências aquosas quando sujeitas a descargas e a queda de tensão nas mesmas.

Estes primeiros ensaios com o intuito de verificar o comportamento dos componentes do circuito foram divididos por partes, assim, caso exista algum problema será identificado mais facilmente.

Sistema DC

Segundo a norma, a plataforma circular tem que estar alimentada a cerca de 40kV. Para tal, é fundamental que a queda de tensão no sistema de proteção da fonte, constituído pelas duas resistências aquosas, não seja muito elevada. Com este primeiro ensaio ao sistema DC pretende-se descobrir isso mesmo.

Os ensaios foram realizados de forma gradual, onde se elevava a tensão de 10 em 10kV, de maneira a encontrar a queda de tensão nas resistências. O esquema para este ensaio (4.10) contém apenas a fonte de tensão DC, as resistências e o divisor de tensão, onde se lê a tensão à qual o

prato está alimentado. O gerador encontra-se isolado pelos explosores com um gap para tensões superiores a 50kV.

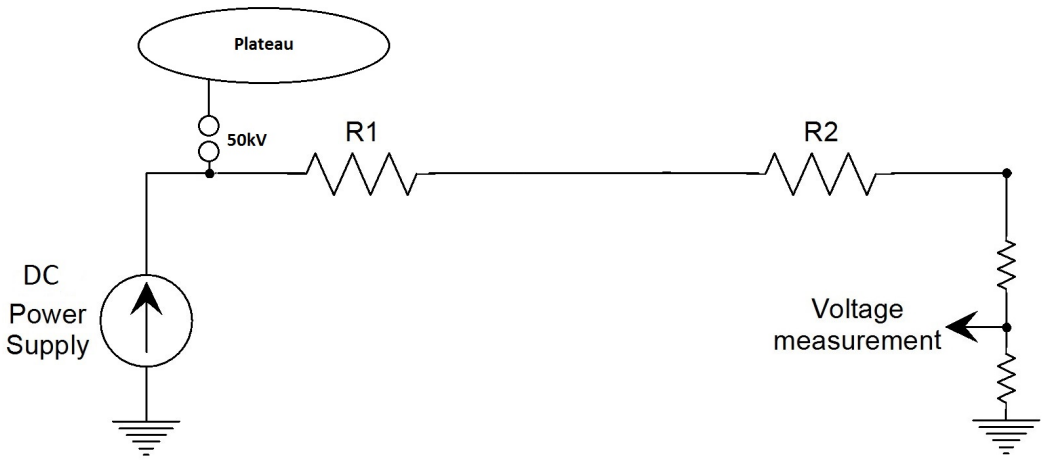


Figura 4.10: Esquema de Montagem para determinar queda de tensão nas resistências

Durante a primeira montagem, não se colocaram as resistências com o intuito de verificar se a leitura no divisor de tensão e no leitor da fonte de tensão coincidiam, nas restantes montagens as resistências foram colocadas em série com a fonte.

Na tabela 4.1 apresentam-se os valores das quedas de tensão da série das resistências:

Tabela 4.1: Valores de queda de tensão nas resistências

Tensões (kV)		Queda de tensão		
Fonte DC	Divisor	(kV)	(%)	Observações
10	10,2	-	-	sem resistências
10	8,86	1,14	11,4	-
20	16,8	3,2	16	-
30	25,5	4,5	15	-
40	33,83	6,17	15,425	-

Analisando os dados da tabela acima, facilmente se conclui que a tarefa de alimentar o prato a 45kV recorrendo à primeira fonte de tensão poderá ser impossível. Esta queda de tensão de 15% faz com que a tensão máxima aplicada ao prato fique aquém do valor esperado, consegue-se atingir uma tensão de aproximadamente 40kV. De notar que com a nova fonte DC conseguimos aplicar uma tensão de 45kV ou mesmo superior, ainda que existam estas quedas de tensão.

Sistema Completo

Esta foi a terceira e última fase de validação da montagem, onde, com toda a montagem final do sistema, gradualmente, se começa a aplicar a onda de manobra. Esta elevação gradual de tensão durante os ensaios ao choque acontece, pois existe uma grande preocupação em preservar a fonte DC, que, apesar de ter o seu sistema de proteção reconfigurado, poderá estar sujeita a sobretensões.

De seguida, volta-se a testar a fonte DC e aqui existem duas fases distintas da montagem do ensaio, que se caracterizam pela utilização de duas fontes com diferentes capacidades.

Na primeira, com uma tensão de aproximadamente 40kV, o que se traduz por 19,512 kV/m, ou seja, os requisitos da norma não são cumpridos por muito pouco. E uma segunda fase, já com uma nova fonte de tensão, onde se cumprem os requisitos da *NP4426*, [31] com uma tensão de 21,95 kV/m.

Com toda a aparelhagem validada, bastava agora, realizar um pequeno número de ensaios com o intuito de verificar como se comportariam os sistemas de proteção internos à própria fonte. Ambas as fontes de tensão possuem dois mostradores distintos, que permitem ler os valores de corrente e tensão. À medida que se efetuavam ensaios ao choque era essencial verificar de que maneira essas descargas alteravam estas duas grandezas, especialmente a corrente. Apesar de as descargas provocarem uma pequena variação nos valores, estas não era suficientes para ativar os sistemas de proteção.

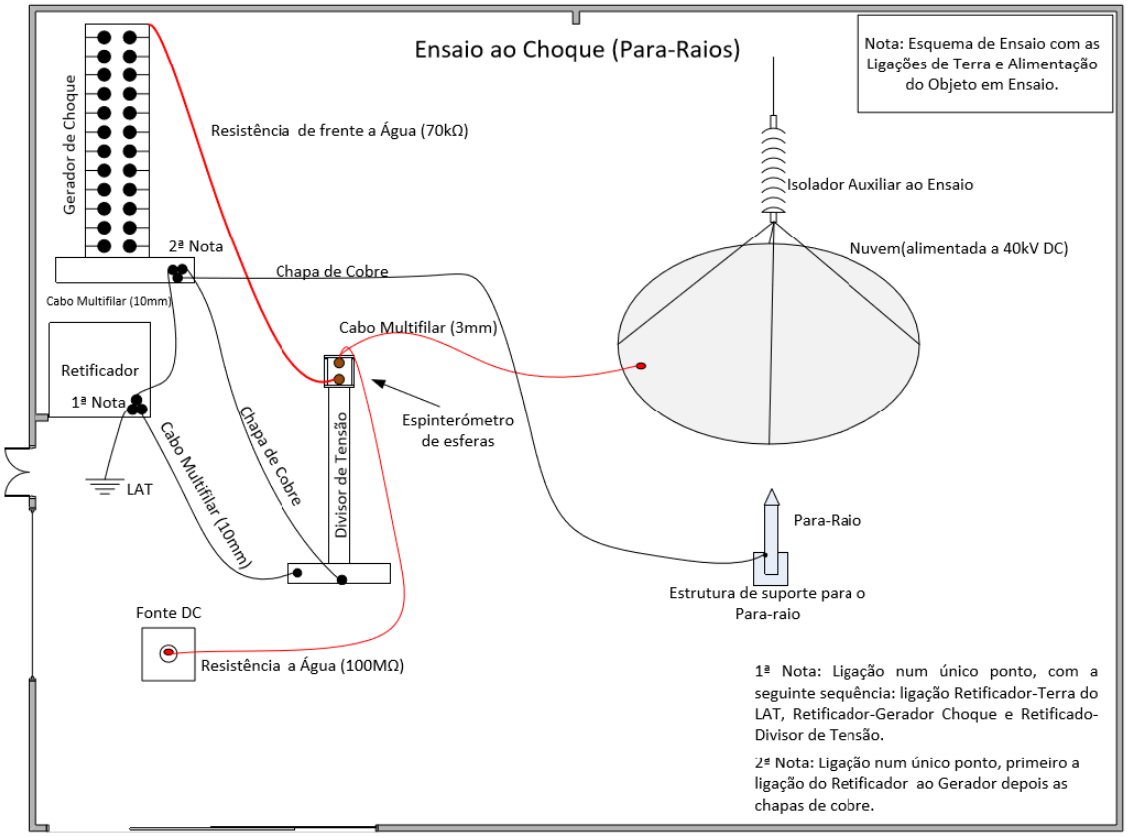


Figura 4.11: Esquema de Montagem

4.4.2 Requisitos Inerentes à NP 4426

Ao longo deste subcapítulo pretende-se dar a conhecer algumas das metodologias e configurações utilizadas nos ensaios, sempre respeitando as condições impostas pela norma *NP 4426*.

Em primeiro lugar, apresentar-se-ão alguns dos requisitos inerentes à norma e em seguida explicar-se-ão, ainda que de maneira breve, os ensaios. Os principais requisitos impostos pela norma dividem-se em 3 partes:

1. Dimensões;

2. Condições Atmosféricas;

3. Forma de Onda.

Dimensões

As dimensões referidas pela norma dizem respeito, essencialmente, à plataforma circular, aos para-raios e contatos com o sistema terra.

Relativamente à montagem do prato, este deverá ser uma plataforma circular metálica, montada paralelamente em relação ao solo e a uma distância mínima de 2m. A norma [31] especifica também outras condições dimensionais como:

- A altura dos para-raios (h) é superior ou igual a 1m. A diferença de altura entre as duas pontas deve ser inferior a 1%;

- A distância prato superior/solo (H) deve ser superior a 2m. A relação h/H deve ser compreendida entre 0.25 e 0.5;

- O prato superior tem como mais pequena dimensão horizontal, a distância prato/solo (H);

- A ponta de diâmetro 28mm, suporte dos para-raios, assenta sobre um suporte quadrado, com lado mínimo de 0.2m.

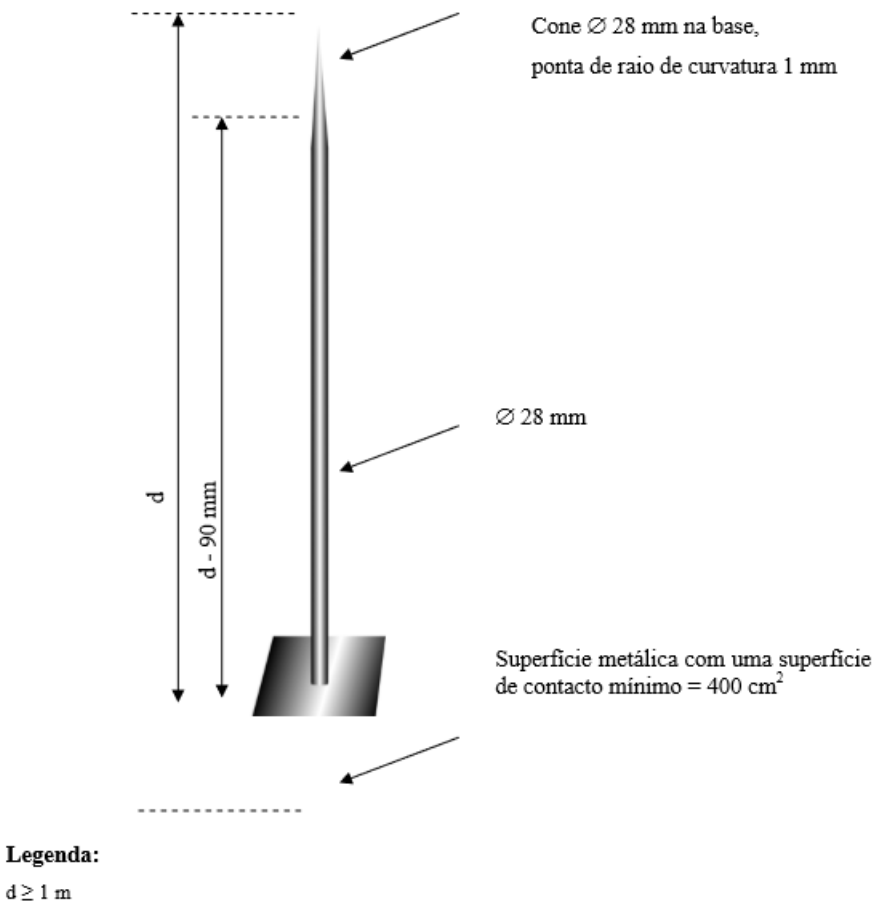


Figura 4.12: Representação das distâncias [31]

Na preparação dos ensaios, todas as condições dimensionais impostas pela norma foram cumpridas, existe apenas uma pequena alteração relativamente à base de suporte quadrada. A norma exige que esta possua um mínimo de 0,2m de lado, mas no caso do LAT-FEUP, o solo é coberto com uma chapa metálica, logo esta condição deixa de ser necessária. Apesar disso, confrontados com a necessidade de segurar os para-raios foram utilizadas bases quadradas com lado de 50cm.

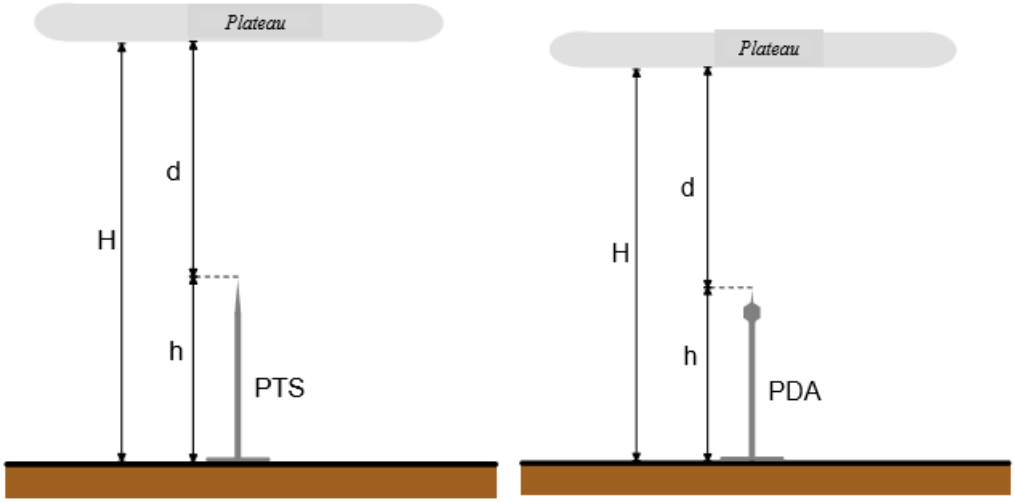


Figura 4.13: Arquitectura da Solução Proposta

Condições Atmosféricas

A norma relativa aos ensaios em laboratórios de Alta Tensão, *IEC 60060 -1* [2], prevê que os ensaios possam ser realizados, desde que os valores das condições atmosféricas se encontrem dentro de uma determinada gama e, no final desses ensaios, prevê-se também a aplicação de fórmulas de correção.

Mas, segundo a NP 4426 não podem existir variações significativas desde o início dos ensaios, sendo que estes valores deverão ser apontadas tanto no início, como durante a troca de para-raios e no final dos ensaios. A grande diferença, no entanto, reside na não necessidade de aplicar qualquer factor correctivo.

Tabela 4.2: Variações das condições atmosféricas para ambos os ensaios, admitidas pela NP 4426 [31]

Condições Atmosféricas	
Parâmetros	Variações
Pressão	+/- 2%
Temperatura	+/- 10%
Humidade Relativa	+/- 20%

Tensão a Aplicar e Forma de Onda

As próximas duas grandezas a controlar e previstas na norma são a forma de onda e a amplitude da tensão.

Como previsto na *IEC 60060*, no Anexo A, a determinação da tensão a aplicar deverá basear-se no método Up and Down. Apesar de ambas as normas referirem este processo, a *NP4426* exige uma precisão final de 1%, logo é fundamental proceder a algumas alterações ao método usado pela norma geral. [31] [2]

Visto que as condições atmosféricas variaram significativamente ao longo dos últimos meses, era fundamental garantir que a tensão a aplicar era a mais correta, logo foi necessário determinar mais que uma tensão.

Para ambos os ensaios foram feitos cerca de 100 disparos, que, caso não se desse a descarga subia-se a tensão, caso se desse, 7 vezes consecutivas, descia-se a tensão. A determinação da tensão a aplicar ao fim dos 100 disparos baseia-se na seguinte fórmula

$$U_p = \sum_{i=1}^{l} (k_i * \mathrm{U}_i) \,/\, \mathrm{m} \qquad to \tag{4.4}$$

Consoante as condições atmosféricas, obtiveram-se diferentes valores de tensão a aplicar, em primeiro lugar, 53kV, tensão com a qual se fez a maior parte dos ensaios e em segundo lugar, 52,5kV.

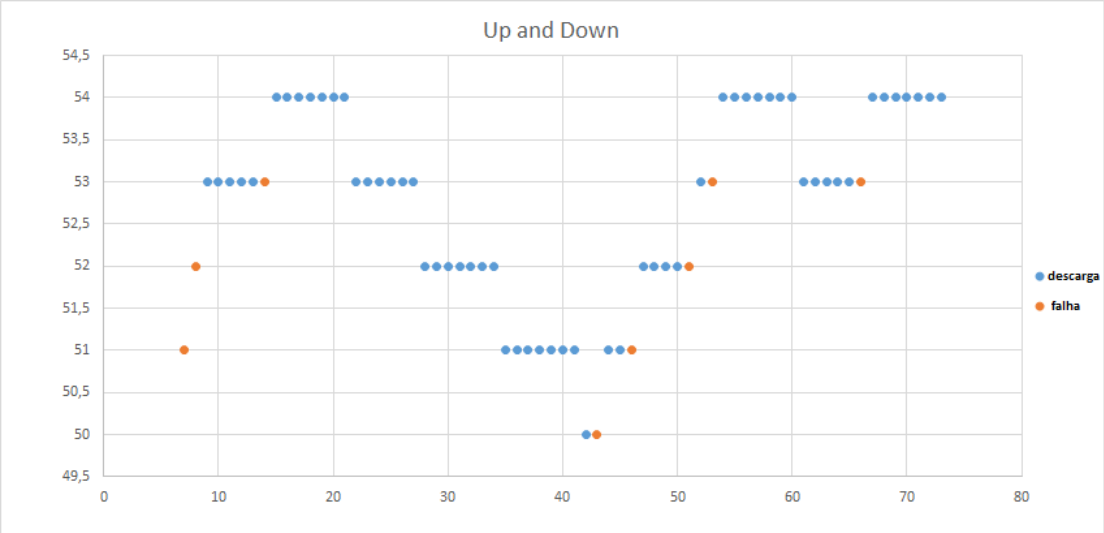


Figura 4.14: Gráfico Up and Down

Em relação à forma de Onda existem alguns valores que são necessários obter, tais como:

- valor da tensão por andar;
- tensão máxima de descarga (DIAS);
- tempo de crista virtual (T_{cr}) (Dias);
- tempo de cauda virtual (T_c) (DIAS) ;
- tempo de captura do traçador ascendente (T_b) (Operador);
- tensão DC no prato.

Relativamente ao tempo de captura do traçador ascendente (T_b), apesar de ser referido na norma, não existem meios no LAT que permitam a sua determinação. O sistema presente no laboratório tem algumas limitações e permite, apenas, alterar a escala de tempo, de tensão e se necessário a polaridade da onda.

Outras Considerações

A norma exige que entre cada descarga se faça um intervalo de dois minutos, com o objetivo de garantir que o campo e caminho criados pela descarga se volta a estabilizar, não interferindo assim com a próxima descarga

Os ensaios a realizar só serão validados caso se obtenham 50 descargas válidas, ou seja, descargas onde se dá a disrupção do ar, tanto para o para-raios de haste simples, assim como para os para-raios com dispositivos de ionização. É sempre necessário realizar ensaios para pelo menos dois dispositivos em cada caso de estudo, com o intuito de comparar resultados.

Durante estes ensaios é fundamental registar três ondas completas: uma inicial, uma entre para-raios e outra no final do ensaio. Quando se faz o registo destas ondas, habitualmente faz-se também o registo das condições atmosféricas dentro do laboratório, visto que é necessário entrar dentro do hall de ensaios para retirar o para-raios.

Para cada choque válido regista-se então, a tensão de pico (U_{peak}), os tempos de crista (T_{cr}) e cauda(T_c) e medir o tempo de captura do traçador ascendente (T_b), como referido anteriormente, não temos meios para determinar este último valor.

As últimas considerações são relativas ao tratamento de dados e posterior aplicação dos critérios de validação de PDI's. Segundo a norma, um para-raios equipado com dispositivo de pré-emissão de descarga só poderá ser validado se cumprir os seguintes critérios:

- $T_{PDI} < T_{PHS}$;
- $\sigma_{PDI} < 0.8\ \sigma_{PHS}$
- T_{PHS} - $T_{PDI} \geq 10\mu$s

O tempo de avanço à ionização, representado por ΔT é a diferença dos tempos médios de cada para-raios, como é possível verificar na seguinte equação:

$$\Delta T = T_{PHS} - T_{PDI} \qquad (\mu s)$$

4.5 Resultados

Os ensaios realizados durante esta dissertação envolveram quatro para-raios diferentes. Para um estudo mais rigoroso, todos os para-raios ionizantes foram comparados com o mesmo para-raios de haste simples fornecido pela empresa X. Os restantes três para-raios utilizados são todos ionizantes e foram disponibilizados pelas empresas X e Y, sendo que a última disponibilizou um de 40μs e outro de 60μs. A empresa Y afirma que estes valores significam que o tempo de captura deverá ser superior em 40μs e 60μs, respetivamente, relativamente a um para-raios de haste simples.

Ambas as empresas disponibilizaram estes dispositivos de proteção ao LAT-FEUP sob condições de confidencialidade inerentes tanto aos resultados como à própria tecnologia presente nas hastes, por esta razão apenas se fará referência às empresas como X e Y.

Durante a realização da dissertação consegui-se ensaiar exaustivamente os vários para-raios, introduzindo variações tanto a nível das condições atmosféricas, terras, fabricantes de para-raios ionizantes e diferentes gamas de para-raios.

Todos os ensaios seguiram os métodos e critérios impostos pela NP 4426 relativamente à montagem e ensaios dos para-raios. Os para-raios fornecidos por ambas as empresas apresentados na figura 4.15, são o PHS, o PDI fornecido pela empresa X e os PDI's fornecidos pela empresa Y, da esquerda para a direita respetivamente.

Figura 4.15: Para-raios utilizados nos ensaios

Apesar de terem sido realizados diversos ensaios ao mesmo para-raio, onde naturalmente existiram alterações a nível das condições atmosféricas, estas não afetaram significativamente a performance de qualquer um dos dispositivos. Por esta razão, e, embora se tenham realizado mais ensaios, esta secção irá dedicar-se exclusivamente a avaliar o comportamento de cada para-raio ionizante no ensaio onde este obteve melhores resultados. Todos os outros resultados dos ensaios e respetivas formas de onda podem ser verificados no anexo A.

4.5.1 Resultados obtidos para o para-raios ionizante fornecido pela Empresa X

Tabela 4.3: Resultados obtidos no melhor ensaio ao PDI da empresa X (3º Ensaio)

Tempos de captura (μs)			
Ensaios	Mínimo	Máximo	Médio
(PHS)	74,7	181,6	112,302
(PDI)	78,4	184,5	107,946
T2 (μs)			
(PHS)	80,5	234,7	120,966
(PDI)	83,6	208,4	116,258

A tabela 4.3, apresenta os resultados, nomeadamente o mínimo, máximo e tempo médio, obtidos no ensaio onde este para-raio obteve o melhor desempenho.

Dito isto, o próximo passo será analisar os resultados segundo a NP 4426 [31], verificando se este cumpre todos os requisitos para ser validado como para-raios ionizante.

Tabela 4.4: Análise requisitos Impostos pela NP 4426 [31]

Análise requisitos Impostos pela NP 4426		
Empresa X	PHS	PDI
ΔT (μs)	4,356	
Falhas Tipo	25,24983	31,48938

Após a análise de ambas as tabelas e tendo em conta os requisitos apresentados em 4.4.2, é agora possível retirar algumas ilações acerca do comportamento do para-raios fornecido pela empresa X.

Em primeiro lugar, verifica-se que a performance do para-raios ionizante foi melhor do que o de haste simples, pois o seu tempo médio de captura é inferior, assim sendo, o primeiro critério para validação como para-raios ionizante está cumprido. De notar, que esta diferença é de aproximadamente 4μs, ou seja, torna este para-raios inválido como dispositivo ionizante, pois o segundo critério não está cumprido, dado que teria de ser menor ou igual.

Relativamente ao terceiro e último requisito, este para-raios também não o consegue cumprir, pois as falhas tipo na distribuição do PDI são muito elevadas. A explicação para o não cumprimento deste critério pode passar pelo prolongamento excessivo das ondas, que se verifica pelos elevados valores de tempo de cauda.

Em suma, este para-raios não foi validado como ionizante segundo a NP 4426 [31].

4.5.2 Resultados obtidos para o para-raios ionizante de 40μs fornecido pela Empresa Y

O próximo dispositivo a ser analisado foi disponibilizado pela empresa Y e caracteriza-se pelo facto do seu tempo de captura puder ser aproximadamente 40μs superior a um PHS semelhante.

Tabela 4.5: Resultados obtidos no melhor ensaio ao PDI (40μs) da empresa Y (4º Ensaio)

Tempos de captura (μs)			
Ensaios	Mínimo	Máximo	Médio
(PHS)	68,1	170,2	91,01569
(PDI)	77,5	109,5	92,146
T2 (μs)			
(PHS)	74	184,2	98,48431
(PDI)	82,9	117,2	99,234

Tabela 4.6: Análise requisitos Impostos pela NP 4426 [31]

Análise de requisitos impostos pela NP 4426		
Empresa Y 40μs	PHS	PDI
ΔT (μs)	-1,130313725	
Falhas Tipo	20,68019	8,845919

À primeira vista, este não parece de todo ser o ensaio em que este PDI apresenta a melhor performance, porque, como podemos verificar pelos valores apresentados na tabela 4.6, o mesmo não cumpre sequer o primeiro critério imposto pela norma, quando em outros ensaios ele o cumpre. A escolha deste ensaio como melhor baseia-se em diversas razões.

Em primeiro lugar, este é o ensaio em que este dispositivo apresenta os menores valores relativos aos tempos de captura. Embora, quando comparado com o PHS este tenha uma performance muito aquém das expectativas, é de notar que de todos os ensaios este, foi onde o PHS também obteve os menores tempos de captura. Por esta razão, quando comparados, este PDI apresenta uma performance muito fraca, o que não é o caso.

Relativamente ao segundo critério, se este não cumpre o primeiro, consequentemente não cumprirá o segundo.

Outro aspeto essencial a analisar são as falhas tipos, terceiro critério, onde este PDI apresenta um desempenho excecional, que facilmente se verifica pelo curtos tempos de cauda. Este é o único requisito que, durante este ensaio, o para-raios cumpre.

Mais uma vez, outro dispositivo ensaiado que não cumpre todos os requisitos inerentes à norma.

4.5.3 Resultados obtidos para o para-raios ionizante de 60μs fornecido pela Empresa Y

O último dispositivo do qual se pretende analisar o comportamento, é o PDI fornecido também pela empresa Y, desta vez de 60μs. À partida este será o dispositivo que deverá obter uma melhor performance em todos os ensaios. Comece-se então pela análise dos resultados obtidos.

Tabela 4.7: Resultados obtidos no melhor ensaio ao PDI (60μs) da empresa Y (7º Ensaio)

Tempos de captura (μs)			
Ensaios	Mínimo	Máximo	Médio
(PHS)	80,1	191,3	111,19
(PDI)	78	147,5	99,984
T2 (μs)			
(PHS)	86,7	209	119,842
(PDI)	84	161,6	107,916

Tabela 4.8: Análise requisitos Impostos pela NP 4426 [31]

Análise requisitos Impostos pela NP 4426		
Empresa Y 60μs	PHS	PDI
ΔT (μs) (μs)	11,206	
Falhas Tipo	17,90276	16,93053

Em primeiro lugar, deve-se começar por dizer que este dispositivo apresentou um óptimo desempenho em ambos os ensaios realizados, ainda que estes tenham sido realizados com tensões diferentes. A escolha deste ensaio prende-se com o facto de este ter sido realizado à mesma tensão por andar que todos os outros, ou seja, os 53kV.

Passando agora para a análise do seu comportamento, verifica-se que o primeiro critério é cumprido com distinção, visto que o tempo médio de captura do PDI é inferior ao do PHS. Em segundo lugar, pela avaliação do ΔT confirma-se que este é o para-raios com melhor performance entre os três testados, como seria de esperar. A diferença entre os tempos de ambos os para-raios consegue ser superior à exigida pela norma, os 10μs, com isto pode-se concluir que o segundo requisito está também cumprido.

Em relação ao último critério, uma vez mais, este dispositivo cumpre-o, tornando-se assim o único para-raios ionizante ensaiado durante esta dissertação que consegue ser validado como tal, segundo a norma [31].

De notar, que também no outro ensaio realizado com uma tensão por andar de 52,5kV, este dispositivo passa também com distinção, cumprindo os três requisitos impostos para a sua validação. No entanto, não foi possível atingir um ΔT tão elevado como seria de esperar.

4.5.4 Resultados obtidos para os para-raios ionizante que sofreram um aumento da resistência da terra

Um dos trabalhos futuros propostos pela dissertação [1] passava pela a análise do comportamento dos mesmos PDI's, mas quando sujeitos a influência de valores mais elevados de terra. É sabido, que as terras têm um papel fundamental no bom funcionamento de qualquer para-raios, mas a influência que diferentes valores de resistências podem provocar no desempenho dos mesmos ainda não foi amplamente discutida, ainda menos no caso dos PDI's.

Apenas dois PDI's foram sujeitos a estes ensaios, nomeadamente o fornecido pela Empresa X e o PDI de 40μs fornecido pela Empresa Y, sendo que o segundo PDI disponibilizado também pela Empresa Y, ainda não tinha chegado na altura que se realizaram estes ensaios, por essa razão, não foi ensaiado.

Outro ponto essencial, passaria por utilizar diversos valores de resistências, mas devido a limitações de material no laboratório, apenas foi possível levar a cabo ensaios com uma resistência de 10Ω.

A resistência utilizada, que se acrescentaria à parte inferior dos para-raios, está representada na figura 4.16.

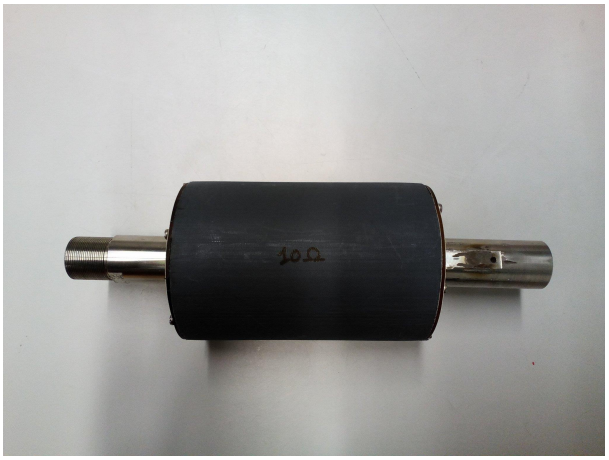


Figura 4.16: Resistência de 10Ω utilizada para análise da influência de diferentes valores de terra no desempenho de dispositivos de proteção

A próxima tabela 4.9 contém os resultados obtidos durante o ensaio a ambos os PDI's, de referir que os ensaios foram realizados um depois do outro, o que permitiu que não existissem grandes variações relativas às condições atmosféricas.

Tabela 4.9: Resultados obtidos no ensaio com a terra de 10Ω ao PDI (40μs) da empresa Y e ao da Empresa X (5º Ensaio)

Tempos de captura (μs)				
Ensaios	Mínimo	Máximo	Médio	Empresa
(PHS)	70,4	127,6	104,874	
(PDI)	79,4	190,7	104,29	Y
(PHS)	70,4	127,6	104,874	
(PDI)	80,6	154,6	107,018	X
T2 (μs)				
(PHS)	75,5	135,1	111,48	
(PDI)	84,9	206,2	110,922	Y
(PHS)	75,5	135,1	111,48	
(PDI)	85,3	190,8	115,152	X

Relativamente a este ensaio, optou-se por não avaliar o desempenho de ambos os PDI's segundo a norma, isto porque, o aumento do valor da terra, à partida, fará com que os para-raios tenham um pior desempenho, como será explicado mais à frente na subsecção 5.2. Apesar disso, pode-se afirmar que nenhum dos para-raios seria validado, como facilmente se compreende pelos valores apresentados acima.

As conclusões a retirar dos resultados apresentados nesta subsecção encontram-se no próximo capítulo 5.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

Terminado agora o trabalho laboratorial e após a análise dos resultados obtidos durante os ensaios aos para-raios é altura de retirar algumas conclusões inerentes à montagem utilizada, fazer algumas considerações à norma e essencialmente avaliar o desempenho dos dispositivos equipados com pré-emissão de descarga comparativamente aos dispositivos tradicionais, hastes de Franklin.

5.1 Conclusões Relativas à Montagem

A configuração do esquema de montagem inicial havia sido proposto por uma empresa, aos colaboradores do LAT-FEUP no decorrer de uma outra dissertação anteriormente realizada. Mas como referido em 4.3 esta empresa não se tinha dedicado a estudar aprofundadamente o sistema de proteção à fonte DC. Houve também uma tentativa de melhorar este nível de proteção na dissertação [1], mas os esforços realizados nesse sentido ficaram além das expectativas do próprio, tornando isso um dos pontos essenciais relativo a trabalhos futuros.

Por tudo isto, um dos objetivos desta dissertação passaria por melhorar o sistema de proteção DC.

O sucesso do sistema de proteção usado ao longo desta dissertação comparativamente com o utilizado anteriormente, reside no facto da solução encontrada para encher as mangueiras encarregues desta proteção não apresentar sinais de precipitação. À primeira vista, este é um fator importantíssimo , pois o facto de não haver precipitação faz com que não existam grandes alterações na forma de onda de choque de manobra. Assim, um dos problemas encontrados anteriormente está agora resolvido.

Conduziram-se também estudos relativamente às quedas de tensão, nas resistências aquosas, com o intuito de determinar se o prato estaria carregado com a tensão prevista na norma [31]. Apesar da omissividade da mesma relativamente a este sistema de proteção, o sistema desenvolvido nesta dissertação demonstrou a sua capacidade, tanto a nível de proteção da fonte, como também de carregar o prato segundo a norma, sem apresentar grandes quedas de tensão.

Um dos problemas que, talvez se possa apontar a esta montagem, passa pela viabilidade da utilização deste sistema de proteção a longo prazo, devido à deterioração da solução, que por sua

vez poderá alterar as propriedades elétricas da mesma, comprometendo tanto a proteção como o carregamento do prato.

5.2 Conclusões a retirar dos Ensaios

Como já referido várias vezes ao longo desta dissertação, a validação de um para-raios como ionizante, segundo a NP4426 [31] passa pela comparação da sua performance com um para-raios semelhante, mas de Franklin, ou seja, sem nenhum eletrónica passiva envolvida.

Por esta razão, a primeira ilação a retirar dos trabalhos desenvolvidos será acerca do comportamento das hastes simples.

Tabela 5.1: Tempos de Captura e de Cauda de todos os ensaios aos PHS, e respetiva diferença

PHS				
Observ.	Ensaio Nº	Tcr (μs)	Tc (μs)	Diferença
	1	118,368	126,128	7,76
	2	119,616	128,504	8,888
	3	112,302	120,966	8,664
	4	91,01569	98,48431	7,468627
Terra	5	104,874	111,48	6,606
	6	125,294	133,71	8,416
	7	111,19	119,842	8,652

Da observação da tabela 5.1 é percetível uma certa coerência ao longo dos ensaios relativa à diferença entre os tempos de captura e dos tempos de cauda, independentemente da variação das condições atmosféricas. Esta diferença, que tende sempre para os mesmos valores, é indicativa da fiabilidade que os ensaios ao desempenho das hastes simples proporcionam a fim de ser comparados com os para-raios ionizantes. Este nível de fiabilidade é essencial porque vai ser um fator único e determinante na validação desses mesmos dispositivos.

Tabela 5.2: Tempos de Captura e de Cauda de todos os ensaios aos PDI da Empresa X, e respetiva diferença

PDI Empresa X				
Observ.	Ensaio Nº	Tcr(μs)	Tc(μs)	Diferença
	1	126,716	136,926	10,21
	2	114,41	119,366	4,956
	3	107,946	116,258	8,312
Terra	4	107,018	115,152	8,134

No caso dos PDI's fornecidos pela empresa X existe uma maior disparidade relativa à diferença entre os tempos de captura e os tempos de cauda, como se pode observar na tabela 5.2. Esta disparidade parece demonstrar uma certa inconsistência na eficiência da captura do traçado descendente, o que leva a que no primeiro ensaio, esse dispositivo tenha uma performance pior do que o dispositivo tradicional, enquanto que nos restantes ensaios este prove ser mais eficiente, apesar de nunca preencher os três requisitos que, segundo a norma são necessários para serem validados como PDI's.

Esta inconsistência, por sua vez, torna a validação, ou não, deste dispositivo mais difícil.

No caso dos dispositivos disponibilizados pela empresa Y voltamos a encontrar uma certa coerência nos valores registados, pois a diferença entre os tempos, para ambas as hastes ronda sempre os mesmos valores, como se observa nas seguintes tabelas:

Tabela 5.3: Tempos de Captura e de Cauda de todos os ensaios aos PDI (40μs) da Empresa Y, e respetiva diferença

PDI Empresa Y (40us)				
Observ.	Ensaio Nº	Tcr(μs)	Tc(μs)	Diferença
	1	110,58	118,048	7,468
	2	92,146	99,234	7,088
Terra	3	104,29	110,922	6,632

Tabela 5.4: Tempos de Captura e de Cauda de todos os ensaios aos PDI (60μs) da Empresa Y, e respetiva diferença

PDI Empresa Y (60us)				
Observ.	Ensaio Nº	Tcr(μs)	Tc(μs)	Diferença
	1	113,714	120,466	6,752
	2	99,984	107,916	7,932

Outra das conclusões que esta dissertação tinha por objetivo atingir prendia-se com compreender, de que forma, as condições atmosféricas poderiam ou não alterar os tempos de captura dos traçados. Esta conclusão surgiu à medida que se dava seguimento aos ensaios e que se verificava que as condições atmosféricas iam variando de série para série de ensaios, o que gerou uma janela de oportunidade para se tentar concluir algo acerca da influência das mesmas nos resultados.

Se nos focarmos nas variações, dessas mesmas condições atmosféricas, permitidas pela NP 4426 [31], concluí-se que estas não devem alterar significativamente esses valores, dado à grande margem permitida. Visto que a margem relativa à variação de pressão é a mais reduzida, é de esperar que este seja o parâmetro que possa influenciar mais significativamente o comportamento deste dispositivos. Acontece que, as variações de pressão atmosférica sentidas no LAT-FEUP nunca atingiram valores muito díspares, logo não foi possível retirar qualquer conclusão relativamente a este parâmetro.

No caso da humidade relativa, parâmetro que segundo a norma, pode sofrer variações de até 20% do início ao fim de uma série de ensaios, não seria de esperar que este pudesse influenciar os tempos de avanço à ionização destes dispositivos. Este parâmetro foi o que mais sofreu alterações no decorrer dos ensaios. Mas, caso isto acontecesse, o que seria de esperar é que a uma maior humidade relativa se pudesse associar tempos de captura mais reduzidos, devido a uma maior presença de água, o que lhe permite tornar-se um melhor condutor.

O que se verifica é que ao comparar ensaios ao mesmo dispositivo ionizante, mas que decorreram com condições de humidade relativa diferentes, por vezes, uma maior humidade está efetivamente associada a melhores tempos de captura, mas não é o caso para todos os ensaios realizados. Por esta razão, concluí-se também que o grau de liberdade permitido pela NP 4426 [31] e que não é permitida na norma internacional , prova fazer sentido.

A influência dos valores de resistência da terra para a qual se dará o escoamento da descarga elétrica era outro dos pontos essenciais que esta dissertação fazia tenção de abordar.

Teoricamente, com o intuito de neutralizar a carga, a corrente elétrica tem tendência a percorrer o caminho que apresenta menor resistência, logo, à partida seria de esperar que se se aumentasse o valor de resistência de terra, os dispositivos apresentassem um atraso relativo aos tempos, tanto de captura como de cauda.

A verdade é que ao analisar os resultados obtidos, tanto nos PHS como nos PDI submetidos a este tipo de variação, isto não acontece. Na maior parte dos ensaios, os dispositivos com maior valor de terra, até apresentam uma maior eficiência, como se verifica na tabela 5.5.

De todo o modo e perante as limitações tanto a nível de calendário, pois era necessário realizar os ensaios o mais prontamente possível, como a nível de material, visto que só possuíamos uma terra, não é possível retirar grandes ilações acerca da influência da terra

Tabela 5.5: Tempos de Captura de vários tipos de para-raios (a amarelo os tempos dos para-raios onde se aumentou a terra)

PHS	PDI	
Tcr(μs)	Tcr(μs)	Tcr (μs)
118,368	126,716	110,58
119,616	114,41	92,146
112,302	107,946	104,29
91,01569	107,018	
104,874		
125,294		
111,19		

Outro ponto a considerar passa pelo comportamento deste tipo de dispositivo na presença de descargas positivas. Apesar de como referido anteriormente, as descargas positivas nuvem-terra serem escassas, a possibilidade destas ocorrerem é bem real, como tal é necessário, pelo menos abordar este tópico.

No laboratório existe a possibilidade de escolher o tipo de polarização da onda a utilizar durante o ensaio dos para-raios, e, embora a norma apenas preveja a validação de para-raios recorrendo a descargas negativas, decidiu-se analisar o comportamento dos para-raios ionizantes perante esta situação.

Sabe-se, ainda que não muito aprofundadamente, que o circuito presente dentro das hastes que se ensaiaram, é, na sua essência um circuito RLC. Onde, o condensador é carregado com uma certa polaridade, que por sua vez, despoleta o avanço à ionização. Sabe-se também, que os terminais de um condensador não se alteram, nomeadamente os terminais deste condensador não se alteram consoante a presença de cargas positivas ou negativas à superfície terrestre. Isto por si só, parece apresentar um problema.

O que acontece, e que já foi explicado anteriormente, é que a ponta de um dispositivo tradicional fica carregada com uma polaridade oposta à da descarga, isto acontece devido às diferentes concentrações de carga à superfície terrestre que induzem uma polaridade negativa ou positiva na ponta. Cargas opostas, atraem-se, logo apresenta um caminho seguro para o escoamento da descarga. No caso de um dispositivo ionizante isto não parece acontecer, visto que o condensador, responsável pela indução de campo à ponta, está desenhado de maneira a carrega-la positivamente, espera-se que a concentração de cargas positivas perante uma descarga igualmente positiva, provoque a um efeito repelente. Esta teoria verifica-se na seguinte imagem:

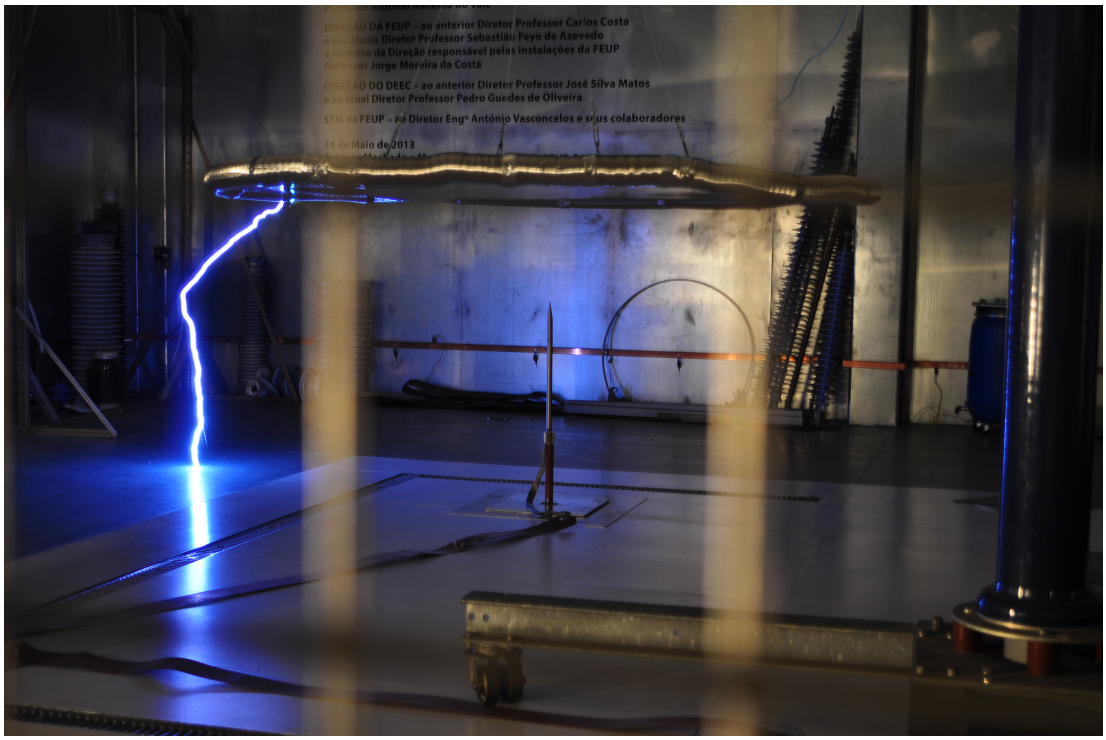


Figura 5.1: Exemplo do comportamento de um PDI perante uma descarga positiva [1]

O principal objetivo desta dissertação passa pela análise do comportamento de dispositivos providos com pré-emissão de descarga e apesar de todas as conclusões retiradas anteriormente, apontarem para o comportamento deste tipo de proteção perante a variação de diversos parâmetros, a conclusão mais importante a retirar prende-se com a eficiência destes dispositivos relativamente aos dispositivos tradicionais.

Segundo a norma, na qual o desenvolvimento desta dissertação se baseia, NP 4426 [31], apenas um dos para-raios ionizantes ensaiados preenche os três requisitos necessários para a sua validação, o para-raios de 60μs fornecido pela empresa Y. Isto significa que teoricamente e pelo menos num ambiente laboratorial, este dispositivo é mais eficiente e por sua vez, proporciona uma maior área de proteção. De notar, mais uma vez que estes resultados obtidos neste ambiente não deverão ser extrapolados para condições naturais, como as que são características da formação de descargas elétricas.

No entanto, a não validação, segundo a norma, dos restantes PDIs, pode não significar que estes sejam menos eficientes, significa talvez, que não apresentam uma eficiência tão significativa como seria de esperar. Isto, porque apesar de não preencherem os três requisitos necessários, falham apenas por um.

5.3 Limitações

As limitações mais significativas inerentes ao desenvolvimento desta dissertação passam essencialmente por dois pontos, que por sua vez podem se relacionar.

A primeira e mais importante limitação relaciona-se com a falta de material do LAT-FEUP para a realização de ensaios desta complexidade. Em primeiro lugar, a necessidade de elaborar um sistema de proteção para a fonte DC, pois comprar resistências que permitissem o nível de proteção necessária ficaria dispendioso. Este foi um processo demorado e com muitos obstáculos, que iam aparecendo à medida que outros eram ultrapassados. Relativamente, ainda a material, com a avaria da única fonte de tensão DC presente no LAT-FEUP houve a necessidade de solicitar uma alternativa a uma empresa que a pudesse disponibilizar. Este problema levou a uma paragem nos ensaios bastante demorada. A falta de mais terras com o intuito de alongar os estudos relativos à sua influência foi outro factor limitativo.

O segundo ponto limitativo é, no fundo, uma consequência do primeiro, pois perante todos estes problemas, a janela temporal começou a encurtar. Consequentemente isto não permitiu que se realizassem todos os ensaios pretendidos, de maneira a dar continuidade aos trabalhos futuros mencionados em [1].

5.4 Contribuições desta Dissertação

Face à falta de ensaios, tanto em ambiente laboratorial, como sob condições naturais, que permitam a validação ou não de dispositivos com avanço à ionização, esta dissertação pretende ser vista como mais uma contribuição para preencher esta lacuna e dar aso a uma melhor compreensão do comportamento deste tipo de dispositivos. E isto foi atingido.

Esta dissertação, a par de outras realizadas no mesmo âmbito no LAT-FEUP e que conta com a contribuição dos seus colaboradores, pretende e consegue, permitir ao laboratório expandir esta área do conhecimento. Todas as configurações de montagens utilizadas ficam para a posterioridade como alternativa, mais económica, para a realização deste ou de outro tipo de ensaios.

Em relação à NP 4426, a presente dissertação pensa conseguir validar alguns dos parâmetros por eles propostos para validação deste tipo de dispositivos.

5.5 Trabalhos Futuros

Dado que a presente dissertação tinha por objetivo dar continuidade aos trabalhos desenvolvidos anteriormente no LAT-FEUP e que podem ser consultados em [1], como consequência, houve uma tentativa de se endereçar os problemas encontrados no passado, na esperança de os resolver. Problemas estes que se encontravam englobados nos trabalhos futuros a desenvolver.

Posto isto, a presente dissertação serviu para resolver muitos desses problemas e teve a capacidade de levar a cabo alguns desses estudos propostos, nomeadamente, a reconfiguração da proteção da fonte DC, a variação das condições atmosféricas, o estudo da influência de terras, o

cumprimento da NP 4426 [31], tanto na configuração das montagens, como da análise de resultados, entre outras.

De todo o modo, há a necessidade de continuar a melhorar, de dar também continuidade aos estudos que foram realizados, aprofundando-os, e por outro lado introduzir novos estudos. Por essa razão, apresentam-se agora sugestões a possíveis trabalhos futuros.

Resistências Aquosas

Este foi um dos principais elementos da montagem utilizada para os diversos ensaios e, como tal, sugere-se que um estudo mais aprofundado acerca da sua viabilidade enquanto resistências para proteção ou com qualquer outro propósito seja levado a cabo. Isto porque, estas resistências apresentam uma alternativa mais económica á maioria das resistências.

O estudo sugerido passaria por estudar as alterações a que a solução dentro da mangueira poderia estar sujeita quando submetida a diferenças condições, sejam estas de tensão, atmosféricas ou de qualquer outra origem.

Condições Atmosféricas

Apesar de ter havido uma tentativa de avaliar o desempenho dos dispositivos a ensaiar sob diferentes condições atmosféricas, fica-se com a sensação que um estudo tão aprofundado como seria expectável não foi passível de acontecer. Isto porque não existiram grandes variações ao longo da realização desta dissertação, para tal seria necessário mais tempo, aproveitando épocas do ano que possa existir uma maior amplitude tanto a nível térmico, como de humidade.

Ensaiar mais do que um para-raios simultaneamente

Esta sugestão já fora dada na dissertação [1] e é a configuração utilizada nos trabalhos desenvolvidos no artigo [37].

O objetivo passaria por ensaiar dois ou mais para-raios simultaneamente e avaliar a preferência relativa à descarga, caso esta preferência fosse significativa aumentar e/ou diminuir as alturas com o intuito de compreender se um PDI consegue realmente oferecer uma maior área de proteção.

Resistências Terra

Esta foi outra das sugestões apresentadas no trabalho desenvolvido em [1]. Apesar de esta dissertação abordar e ensaiar a influência que as terras poderão ter no desempenho dos diferentes dispositivos, não foi levado a cabo um estudo tão exaustivo como era desejável.

Por estas razões, outra das sugestões passaria por alterar ainda mais os valores de resistência.

Anexo A

Resultados dos ensaios aos Para-raios

Este anexo contém os resultados obtidos em todos os ensaios e as respetivas formas de onda.

A.1 Demonstração de resultados da 1ª série de ensaios

A.1.1 Condições atmosféricas e Outras observações

Tabela A.1: Condições Atmosféricas da 1ª Série de Ensaios

Condições Atmosféricas			
	Humidade (%)	Temperatura (°C)	Pressão (mbar)
Iniciais	45	11,9	1013
Entre	47	11,4	1013
Finais	47	11,2	1014

A.1.2 Resultados

A.1.2.1 PHS

Tabela A.2: Resultados obtidos para a primeira série de ensaios ao PHS

Nº Shot Total	Nº Shot Válido	U_{charge} (kV)	Breakdown or not	U_{pico}	T_c	T_2
1		53	N	-484	249	2299
2	1	53	Y	-440	114	120,8
3	2	53	Y	-448	126,4	133,1
4	3	53	Y	-489	200,7	200,9
5	4	53	Y	-467	137,6	145,8

6	4	53	N	-492	222,5	
7	5	53	Y	-478	152,9	162,2
8	6	53	Y	-464	125,9	134,4
9	7	53	Y	-489	172,8	187,6
10	8	53	Y	-478	137,4	145,8
11	9	53	Y	-478	133,9	140,7
12	10	53	Y	-456	106,1	113,5
13	11	53	Y	-448	97,8	104,4
14	12	53	Y	-470	116,5	123,2
15	13	53	Y	-462	106,8	114,9
16	14	53	Y	-456	101,2	108,6
17	15	53	Y	-443	91,5	98,3
18	15	53	N	-497	198,6	
19	16	53	Y	-462	109,3	116
20	17	53	Y	-470	116,4	123,4
21	18	53	Y	-494	166,5	175,7
22	19	53	Y	-489	142,4	152,2
23	20	53	Y	-448	94,4	102,2
24	20	53	N	-497	199,1	
25	21	53	Y	-443	93,5	99,5
26	22	53	Y	-445	93,3	98,7
27	23	53	Y	-453	98,8	104,3
28	24	53	Y	-489	143,5	153,3
29	25	53	Y	-470	111,9	118,2
30	26	53	Y	-456	130,5	138,6
31	26	53	N	-489	225,1	
32	26	53	N	-492	227	
33	26	53	N	-492	227,3	
34	27	53	Y	-464	138,2	145,7
35	28	53	Y	-440	106,3	113,7

36	29	53	Y	-456	114,7	121,5
37	30	53	Y	-448	102,9	110
38	31	53	Y	-470	122,2	129,4
39	32	53	Y	-462	106,5	113,5
40	32	53	N	-494	190,1	
41	33	53	Y	-467	113,7	120,4
42	34	53	Y	-464	108,1	116,9
43	35	53	Y	-470	111,5	119,9
44	36	53	Y	-464	98,4	105,8
45	37	53	Y	-467	104,1	112
46	37	53	N	-494	184,5	
47	38	53	Y	-478	119	128,4
48	39	53	Y	-453	89,3	94,5
49	40	53	Y	-456	91	97,8
50	40	53	N	-497	178	
51	41	53	Y	-451	87	92,7
52	42	53	Y	-481	113,2	119
53	43	53	Y	-494	149,5	162,2
54	44	53	Y	-470	97,6	104,2
55	45	53	Y	-467	94,3	101,2
56	45	53	N	-497	173	
57	46	53	Y	-497	166	180,6
58	46	53	N	-497	175,4	
59	47	53	Y	-484	117,3	126,2
60	48	53	Y	-467	97,4	104,7
61	49	53	Y	-494	144,2	157,9
62	50	53	Y	-478	104	111,9
63		53	N	-492	204	2197

A.1.2.2 PDI

Tabela A.3: Resultados obtidos para a primeira série de ensaios ao PDI

Nº Shot Total	Nº Shot Válido	U_{charge} (kV)	Breakdown or not	U_{pico}	T_c	T_2
1		53	n	-489	253	2302
2	1	53	n	-491	187,1	194,2
3	2	53	y	-475	161,3	170,5
4	3	53	y	-437	110,2	116,6
5	4	53	y	-462	128,2	135,6
6	5	53	Y	-451	114,1	120,6
7	6	53	Y	-445	106,9	114,4
8	7	53	Y	-481	150,1	158,1
9	8	53	Y	-467	124,5	132
10	8	53	N	-494	215,9	
11	9	53	Y	-492	186,4	204,1
12	10	53	Y	-473	132	140,7
13	10	53	N	-494	215,2	
14	11	53	Y	-448	105,9	112,6
15	12	53	Y	-473	130,8	138
16	13	53	Y	-453	105,7	112
17	14	53	Y	-470	120,9	127,9
18	15	53	Y	-456	106,3	115,2
19	16	53	Y	-453	102,7	110
20	17	53	Y	-456	104,2	110,5
21	18	53	Y	-456	103,6	110,3
22	19	53	Y	-456	102,3	108,4
23	20	53	Y	-464	108,1	114,5
24	21	53	Y	-478	125,8	134,3
25	22	53	y	-462	145	152
26	23	53	y	-470	151	159,4
27	24	53	y	-451	120	128

28	25	53	y	-475	146,6	154,4
29	26	53	y	-494	220,8	277,1
30	27	53	y	-473	133	140,6
31	28	53	y	-475	133,2	140,5
32	29	53	y	-494	216,3	282,2
33	30	53	y	-456	108,2	116,9
34	31	53	y	-453	104	110,5
35	32	53	y	-475	126,2	134,2
36	33	53	y	-489	150,9	162,9
37	34	53	y	-486	141,7	149,8
38	35	53	y	-494	168,8	187,2
39	36	53	y	-492	158	173
40	37	53	y	-467	110,6	117,1
41	38	53	y	-453	98,6	105
42	39	53	y	-475	119,2	126,8
43	40	53	y	-464	106,5	113
44	41	53	y	-475	118,5	127
45	42	53	y	-456	98,2	104,5
46	43	53	y	-484	128,4	135,6
47	44	53	y	-484	129,8	138,2
48	45	53	y	-478	122,8	131,1
49	46	53	y	-462	103,5	110,3
50	47	53	y	-464	105,1	112,6
51	48	53	y	-462	102,8	108,2
52	49	53	y	-481	125,4	134
53	50	53	y	-464	105,7	112,8
54	51	53	y	-467	107	115,1
55		53	n	-492	230	2240

A.1.3 Registo das formas de onda

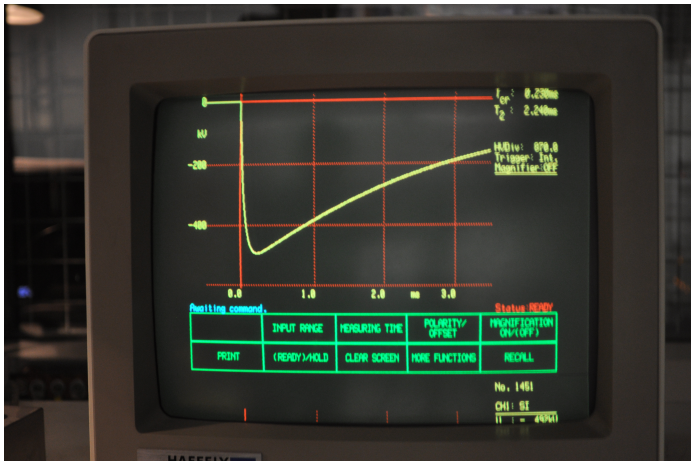


Figura A.1: Onda Completa do Início da primeira série

Figura A.2: Onda Completa entre para-raios na primeira série

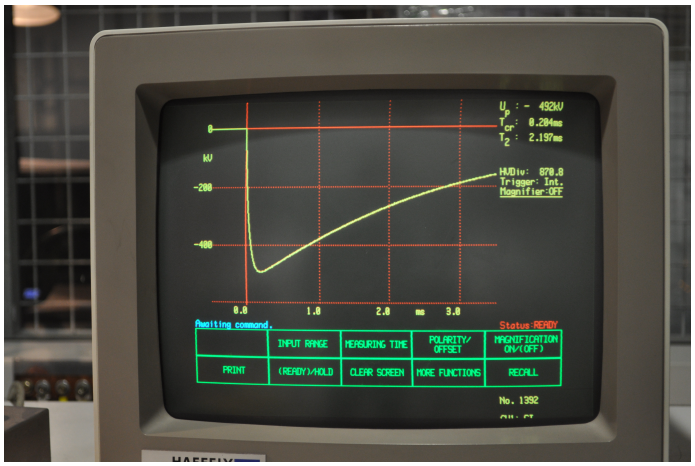


Figura A.3: Onda Completa do Fim da primeira série

Figura A.4: Onda registada no disparo válido nº30 ao PTS da primeira série

Figura A.5: Onda registada no disparo válido nº39 ao PTS da primeira série

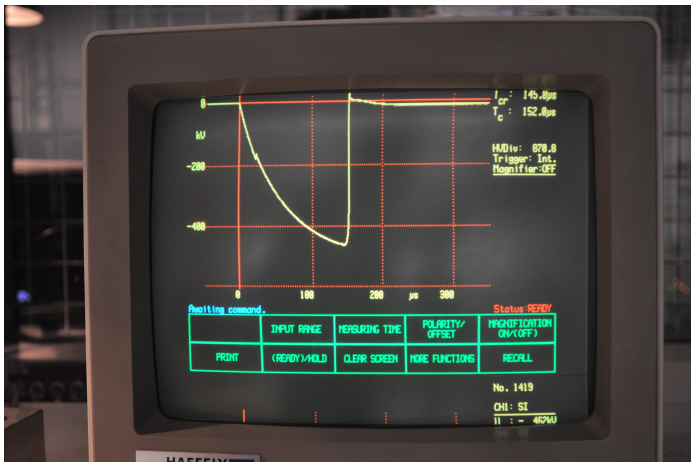


Figura A.6: Onda regista no disparo válido nº21 ao PDI da primeira série

A.2 Demonstração de resultados da 2ª série de ensaios

A.2.1 Condições atmosféricas e Outras observações

Tabela A.4: Condições Atmosféricas da 2ª Série de Ensaios

Condições Atmosféricas			
	Humidade (%)	Temperatura (°C)	Pressão (mbar)
Iniciais	66	13,5	1011
Entre	66	13,7	1011
Finais	66	13,6	1012

A.2.2 Resultados

A.2.2.1 PHS

Tabela A.5: Resultados obtidos para a segunda série de ensaios ao PHS

Nº Shot Total	Nº Shot Válido	U_{charge} (kV)	Breakdown or not	U_{pico}	T_c	T_2
1		53	n	-503	254	2278
2	1	53	y	-486	175,4	184,6
3	1	53	n	-503	247,3	
4	2	53	y	-486	167,7	175,4
5	3	53	y	-492	168,7	177,3
6	3	53	n	-505	229,8	
7	4	53	y	-464	125,5	132,2
8	5	53	y	-486	146,9	155,1
9	6	53	y	-500	169,5	177,9
10	7	53	y	-481	129,4	134,4
11	8	53	y	-497	151,4	160,3
12	9	53	y	-470	111,3	115,6
13	10	53	y	-478	117,8	124,4
14	11	53	y	-464	102,5	109,5
15	12	53	y	-508	174,2	188,3
16	13	53	y	-475	107	112

17	14	53	y	-467	100	105,2
18	15	53	y	-478	108,2	115,7
19	15	53	n	-511	198,6	
20	16	53	y	-470	103,4	109,2
21	17	53	y	-448	86,4	90,3
22	18	53	y	-492	123,2	130
23	19	53	y	-511	193,1	223,9
24	20	53	y	-486	114,8	122,5
25	21	53	y	-511	182,5	210,4
26	22	53	y	-484	109,3	116,8
27	23	53	y	-448	82,5	87,1
28	24	53	y	-505	140,9	150,5
29	25	53	y	-497	121,6	128,6
30	26	53	y	-475	98,1	103,5
31	27	53	y	-500	126,7	134,1
32	28	53	y	-459	86,5	90,5
33	29	53	y	-451	81	85,6
34	30	53	y	-473	84,8	99,8
35	31	53	y	-489	108,6	116
36	32	53	y	-459	85	90
37	33	53	y	-470	98,1	104,9
38	34	53	y	-497	118,5	124,7
39	35	53	y	-475	95	100,6
40	36	53	y	-481	100,1	106,2
41	37	53	y	-494	113,1	121,4
42	38	53	y	-492	111,4	118,8
43	38	53	n	-514	186	
44	39	53	y	-473	97,9	103,4
45	40	53	y	-514	191,5	254,6
46	41	53	y	-497	123,1	130,4

47	42	53	y	-470	94,4	100,1
48	43	53	y	-475	97,5	104,6
49	44	53	y	-508	143,3	152,2
50	45	53	y	-467	90,9	96
51	46	53	Y	-478	98,4	104,1
52	47	53	Y	-473	94,4	100,1
53	48	53	Y	-467	90,1	95
54	48	53	n	-514	185,9	
55	49	53	y	-497	122	127,4
56	50	53	y	-492	117,2	124
57		53	N	-508	212	2203

A.2.2.2 PDI

Tabela A.6: Resultados obtidos para a segunda série de ensaios ao PDI

Nº Shot Total	Nº Shot Válido	U_{charge} (kV)	Breakdown or not	U_{pico}	T_c	T_2
1		53		-508	212	2203
2	1	53	y	-484	151,4	159,5
3	2	53	y	-475	133	140,1
4	3	53	y	-456	108,3	114,5
5	4	53	y	-453	104,4	110,1
6	5	53	y	-484	129,8	138,6
7	6	53	y	-508	176,9	104
8	7	53	y	-500	153,2	161,6
9	8	53	y	-500	154,4	164,4
10	9	53	y	-486	130	136
11	10	53	y	-500	153	161,6
12	11	53	y	-470	107,7	113,4
13	12	53	y	-484	130,2	136
14	13	53	y	-478	113,4	118,5
15	14	53	y	-470	105,1	111

16	15	53	y	-484	115,9	122,2
17	16	53	y	-470	103,7	109,9
18	17	53	y	-484	115,6	121,2
19	18	53	y	-492	124,4	131,7
20	19	53	y	-473	102,8	108,9
21	20	53	y	-486	115,3	121,6
22	21	53	y	-462	94,6	99,6
23	22	53	y	-459	92,2	97,5
24	23	53	y	-492	121,2	126,4
25	24	53	y	-478	106,2	111,4
26	25	53	y	-489	117,3	124,8
27	26	53	y	-486	114,3	122,5
28	27	53	y	-470	98,1	103
29	28	53	y	-478	104,8	111
30	28	53	n	-511	200,8	
31	29	53	y	-473	106,5	112,6
32	30	53	y	-492	124,3	129,8
33	31	53	y	-473	104,7	109,7
34	32	53	y	-484	113,3	119,1
35	33	53	y	-489	119,2	125,5
36	34	53	y	-467	98,1	104,5
37	35	53	y	-500	133,3	139,8
38	36	53	y	-459	91,7	96,8
39	37	53	y	-456	80,8	96,8
40	38	53	y	-481	109,6	117,7
41	39	53	y	-470	100,3	106,8
42	40	53	y	-484	112,1	119,6
43	41	53	y	-473	100,7	106,4
44	42	53	y	-464	94,5	99,8
45	43	53	y	-500	130,9	137,7

46	44	53	y	-456	88,7	92,7
47	45	53	y	-484	110,2	118,5
48	46	53	y	-462	91,5	96,8
49	47	53	y	-467	96,3	101,2
50	48	53	y	-475	102,9	109,3
51	49	53	y	-503	139,3	146,4
52	50	53	y	-464	94,4	99,8
53		53	N	-508	214	2207

A.2.3 Registo das formas de onda

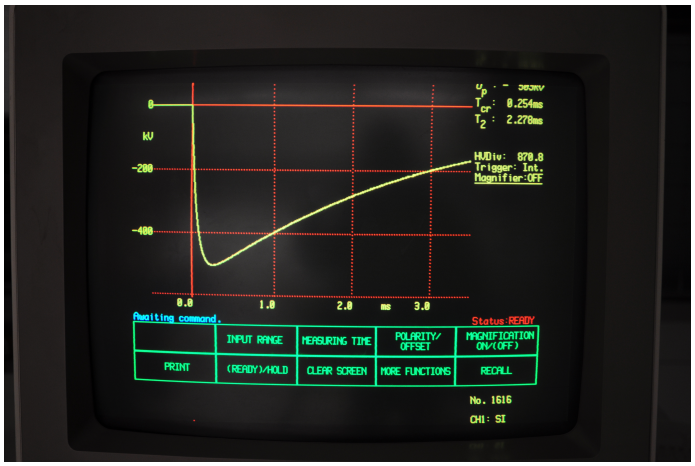


Figura A.7: Onda Completa do Início da segunda série

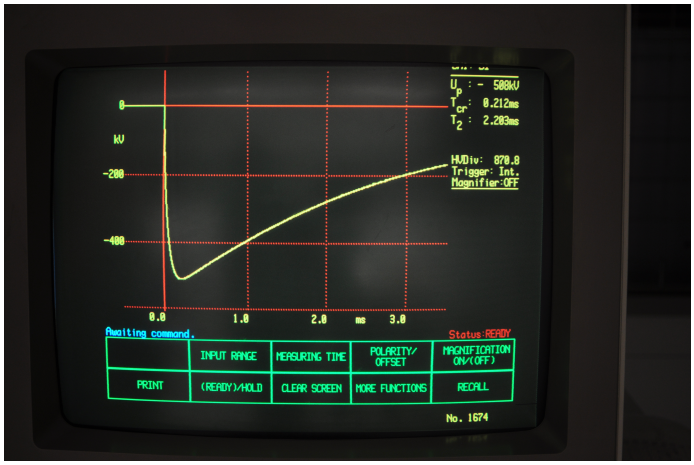


Figura A.8: Onda Completa entre para-raios na segunda série

Figura A.9: Onda Completa do Fim da segunda série

Figura A.10: Onda registada no disparo válido nº24 ao PTS da segunda série

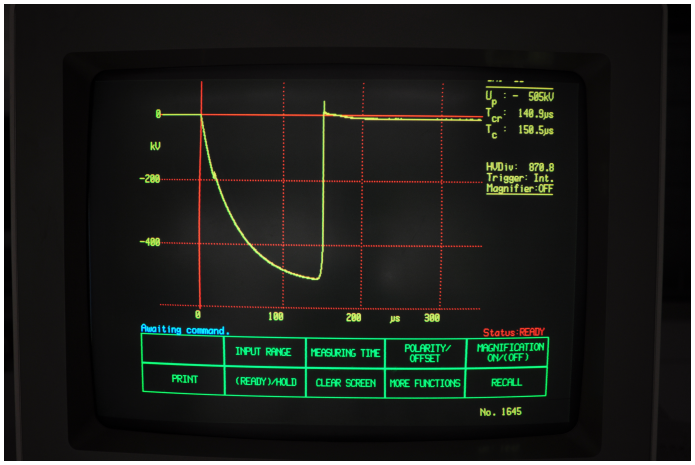


Figura A.11: Onda registada no disparo válido nº17 ao PDI da segunda série

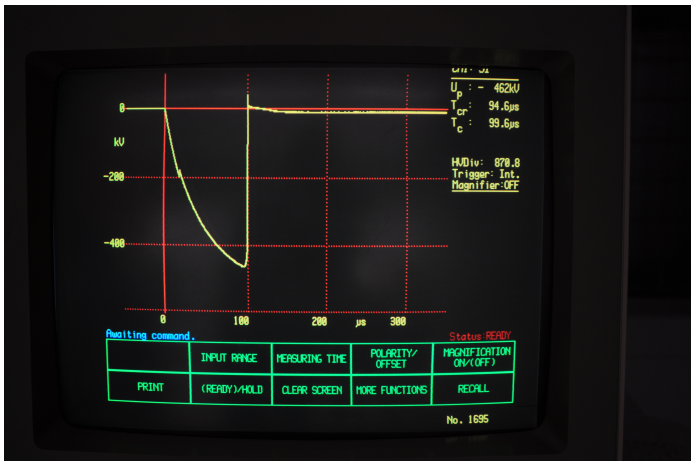


Figura A.12: Onda regista no disparo válido nº46 ao PDI da segunda série

A.3 Demonstração de resultados da 3ª série de ensaios

A.3.1 Condições atmosféricas e Outras observações

Tabela A.7: Condições Atmosféricas da 3ª Série de Ensaios

Condições Atmosféricas			
	Humidade (%)	Temperatura (°C)	Pressão (mbar)
Iniciais	54	12,3	1014
Entre	46	13,6	1011
Finais	42	13,7	1012

A.3.2 Resultados

A.3.2.1 PHS

Tabela A.8: Resultados obtidos para a terceira série de ensaios ao PHS

Nº Shot Total	Nº Shot Válido	U_{charge} (kV)	Breakdown or not	U_{pico}	T_c	T_2
1		53		-503	275	2313
2	1	53	n	-500	271	
3	2	53	y	-475	164,6	172,2
4	3	53	y	-486	174,1	183,9
5	4	53	y	-486	164,9	173
6	4	53	n	-470	242,4	
7	5	53	y	-489	161,7	170,8
8	6	53	y	-451	109,7	117,7
9	7	53	y	-508	219,2	234,7
10	8	53	y	-459	107	113,8
11	9	53	y	-453	98,8	104,8
12	10	53	y	-462	101,3	108,9
13	11	53	y	-505	158,6	170,7
14	12	53	y	-475	107,5	115,4
15	13	53	y	-486	116,3	123,8
16	14	53	y	-453	86,6	92,3

17	15	53	y	-467	94	100,6
18	16	53	y	-510	169,6	185,8
19	17	53	y	-464	88,6	95,3
20	18	53	y	-478	101	109,1
21	19	53	y	-475	96,5	103
22	20	53	y	-451	79,9	85,8
23	21	53	y	-478	95,2	100,6
24	22	53	y	-478	99,1	107,1
25	23	53	y	-467	89,5	94,8
26	24	53	y	-481	99,5	106
27	25	53	y	-497	119	127,1
28	26	53	y	-497	117,3	125,1
29	27	53	y	-464	89,7	95,6
30	28	53	y	-484	104,9	114,4
31	29	53	y	-448	80,7	86,5
32	30	53	y	-494	119,1	128,4
33	31	53	y	-462	89,6	96
34	32	53	y	-494	119	125
35	33	53	y	-494	119,5	127,3
36	34	53	y	-475	96,7	104,6
37	35	53	y	-489	110,3	120,2
38	36	53	y	-470	94,9	100,8
39	37	53	y	-508	145,7	158
40	38	53	y	-456	85,1	91,6
41	39	53	y	-470	90,9	96,8
42	40	53	y	-470	90,8	97
43	40	53	n	-514	187	
44	41	53	y	-505	137,5	149,8
45	42	53	y	-492	110,9	117,7
46	43	53	y	-459	84,3	89,5

47	44	53	y	-478	96	103,3
48	45	53	y	-484	100,6	106,9
49	46	53	y	-462	83,9	91,4
50	47	53	y	-516	181,6	234,7
51	48	53	y	-478	92,4	97,8
52	49	53	y	-448	74,7	80,5
53	50	53	y	-464	83,6	91,6
54	51	53	y	-500	113,2	120,6
55		53	N	-514	201	2194

A.3.2.2 PDI- Empresa X

Tabela A.9: Resultados obtidos para a terceira série de ensaios ao PDI da empresa X

Nº Shot Total	Nº Shot Válido	U_{charge} (kV)	Breakdown or not	U_{pico}	T_c	T_2
1		53		-508	261	2270
2	1	53	n			
3	2	53	y	-484	166,1	176,8
4	3	53	y	-481	150	158
5	4	53	y	-484	216,7	244,4
6	5	53	y	-456	112	119,2
7	6	53	y	-478	120,6	128
8	7	53	y	-464	111,3	119,1
9	8	53	y	-475	118,1	126,5
10	9	53	y	-459	101,3	107,2
11	10	53	y	-484	120,6	128,3
12	11	53	y	-470	105,7	112
13	12	53	y	-462	98	104,6
14	13	53	y	-478	108,8	116,7
15	14	53	y	-451	88,1	94
16	15	53	y	-514	184,5	196,5
17	16	53	y	-492	120,9	128,9

18	17	53	y	-475	103,6	109,9
19	18	53	y	-470	98,5	107,4
20	19	53	y	-470	97,3	104,2
21	20	53	y	-440	78,5	84,9
22	21	53	y	-459	89,3	96,3
23	22	53	y	-492	118,2	126,8
24	22	53	n			
25	23	53	y	-456	89,8	96,1
26	24	53	y	-456	89,8	96,2
27	25	53	y	-440	79,5	86
28	26	53	y	-500	130,8	140,8
29	27	53	y	-492	117	126,2
30	28	53	y	-478	107,1	115,1
31	29	53	y	-464	94,7	102,5
32	30	53	y	-451	85,4	91,2
33	31	53	y	-462	91,1	97,5
34	32	53	y	-453	85,8	90,6
35	33	53	y	-514	181,9	208,4
36	34	53	y	-464	92	97,5
37	35	53	y	-456	86,3	93,2
38	36	53	y	-462	90,4	97,6
39	37	53	y	-459	87,4	94,1
40	38	53	y	-462	88	94,2
41	39	53	y	-443	78,4	83,6
42	40	53	y	-453	83,2	89,4
43	41	53	y	-516	180	195,6
44	42	53	y	-467	92,2	98,2
45	43	53	y	-478	99,5	108,1
46	44	53	y	-451	81,5	86,3
47	45	53	y	-456	84,5	90

48	46	53	y	-467	90,9	99,1
49	47	53	y	-448	79,7	85,5
50	48	53	y	-511	151,7	168,4
51	49	53	y	-467	91,5	99,4
52	50	53	y	-464	89,5	96,1
53	51	53	y	-464	89,6	96,3
54		53	N	-511	210	2241

A.3.2.3 PDI (40μs) - Empresa Y

Tabela A.10: Resultados obtidos para a terceira série de ensaios ao PDI (40μs) da empresa Y

Nº Shot Total	Nº Shot Válido	U_{charge} (kV)	Breakdown or not	U_{pico}	T_c	T_2
1		53		-502	248	2262
2	1	53	n	-503	251,3	
3	2	53	y	-478	146,6	156,2
4	2	53	n	-484	240,3	
5	3	53	y	-464	127,5	135,5
6	4	53	y	-486	147,7	154
7	5	53	y	-503	178,1	188,3
8	6	53	y	-470	119,1	126
9	7	53	y	-492	143,9	155,4
10	8	53	y	-470	113	119,8
11	9	53	y	-456	99,8	106,3
12	10	53	y	-456	96,9	102,1
13	11	53	y	-484	119,8	127,6
14	12	53	y	-473	106,7	114,1
15	13	53	y	-478	111,2	118,2
16	14	53	y	-500	136,3	143,9
17	15	53	y	-464	97,6	105
18	16	53	y	-478	106,7	112,6
19	17	53	y	-462	94,1	100

20	18	53	y	-451	86,3	92,5
21	19	53	y	-489	113,7	119,5
22	20	53	y	-462	92,4	98,6
23	21	53	y	-484	147,6	156,8
24	22	53	y	-492	156,5	164,3
25	23	53	y	-467	119,1	127
26	24	53	y	-470	118,4	126,7
27	25	53	y	-478	122,9	131,5
28	26	53	y	-456	100,3	107,7
29	27	53	y	-475	114,3	121,4
30	28	53	y	-486	124,6	132,6
31	29	53	y	-459	97,5	104,2
32	30	53	y	-489	125,3	133,2
33	31	53	y	-456	92	98,4
34	32	53	y	-470	102,3	111,1
35	33	53	y	-484	112	118,2
36	34	53	y	-478	106,3	112,6
37	35	53	y	-464	94,9	102,5
38	36	53	y	-451	85,3	90,4
39	37	53	y	-464	93,7	101,7
40	38	53	y	-475	101,8	109,6
41	39	53	y	-481	105,3	111,8
42	40	53	y	-484	108,5	116,2
43	41	53	y	-481	105,3	112,2
44	42	53	y	-475	100,3	110
45	43	53	y	-456	86,6	93,7
46	44	53	y	-456	86,8	93,8
47	45	53	y	-464	91,7	98,6
48	46	53	y	-453	84,1	89,8
49	47	53	y	-511	149,2	162,1

50	48	53	y	-467	92,8	100,2
51	49	53	y	-467	92,6	100,4
52	50	53	y	-462	88,5	95,6
53	51	53	y	-456	85,1	92,5
54		53	N	-511	214	2243

A.4 Demonstração de resultados da 4ª série de ensaios

A.4.1 Condições atmosféricas e Outras observações

Tabela A.11: Condições Atmosféricas da 4ª Série de Ensaios

Condições Atmosféricas			
	Humidade (%)	Temperatura (°C)	Pressão (mbar)
Iniciais	36	12,3	1014
Entre	35	12,4	1014
Finais	34	12	1015

A.4.2 Resultados

A.4.2.1 PHS

Tabela A.12: Resultados obtidos para a quarta série de ensaios ao PHS

Nº Shot Total	Nº Shot Válido	U_{charge} (kV)	Breakdown or not	U_{pico}	T_c	T_2
1		53		-500	265	2334
2	1	53	y	-464	129,9	136,9
3	2	53	y	-503	199,9	214,8
4	3	53	y	-459	116,8	123,4
5	4	53	y	-456	108,9	115,2
6	5	53	y	-473	118,4	126,8
7	6	53	y	-464	105,4	113,3
8	7	53	y	-470	107,4	116,4
9	8	53	y	-467	101,6	107,8
10	9	53	y	-464	96	102,2

11	10	53	y	-453	87,1	93,2
12	11	53	y	-478	103,1	110,7
13	12	53	y	-478	99,4	105,6
14	13	53	y	-478	97,8	106,2
15	14	53	y	-516	170,2	184,2
16	15	53	y	-492	108	116
17	16	53	y	-503	120,8	129,2
18	17	53	y	-467	84,5	91,7
19	18	53	y	-462	79,7	86,3
20	19	53	y	-459	77,8	84
21	20	53	y	-464	80,3	85,8
22	21	53	y	-475	85,7	91
23	22	53	y	-473	84,1	92,1
24	23	53	y	-464	78,1	85
25	24	53	y	-464	77,9	85,1
26	25	53	y	-470	80,2	86
27	26	53	y	-462	74,9	82
28	27	53	y	-467	77,8	84,6
29	28	53	y	-456	71,4	79,4
30	29	53	y	-478	82,8	91,2
31	30	53	y	-475	80,3	87,1
32	31	53	y	-451	68,1	74
33	32	53	y	-478	82,3	89,9
34	33	53	y	-452	68,2	74,2
35	34	53	y	-478	81,6	88,6
36	35	53	y	-456	69,8	76
37	36	53	y	-473	75,6	83
38	37	53	y	-475	76,9	82,9
39	38	53	y	-464	73,2	80
40	39	53	y	-462	71,9	78,7

41	40	53	y	-467	74,5	82,7
42	41	53	y	-470	75,9	83
43	42	53	y	-470	75,6	81,9
44	43	53	y	-473	77,4	83,5
45	44	53	y	-462	71	77,3
46	45	53	y	-475	78,7	85,7
47	46	53	y	-459	69,6	76,4
48	47	53	y	-475	77,3	83
49	48	53	y	-500	99,3	111,1
50	49	53	y	-467	73,6	79,8
51	50	53	y	-519	140,4	157,3
52	51	53	y	-448	74,7	80,5
53	51	53	N	-511	216	2245

A.4.2.2 PDI (40μs) - Empresa Y

Tabela A.13: Resultados obtidos para a quarta série de ensaios ao PDI(40μs) - Empresa Y

Nº Shot Total	Nº Shot Válido	U_{charge} (kV)	Breakdown or not	U_{pico}	T_c	T_2
1		53		-511	216	2245
2	1	53	y	-451	101,6	108,5
3	2	53	y	-453	99,8	107,8
4	3	53	y	-484	125,2	134
5	4	53	y	-462	101,6	109,1
6	5	53	y	-453	91,7	98,1
7	6	53	y	-464	98	104,8
8	7	53	y	-456	92	101
9	8	53	y	-464	96,1	104
10	9	53	y	-467	96,7	103,6
11	10	53	y	-462	91,3	97,9
12	11	53	y	-459	89,6	96,9
13	12	53	y	-453	86,2	92,8

14	13	53	y	-445	81,8	89,2
15	14	53	y	-467	95	102,5
16	15	53	y	-440	78,4	84,3
17	16	53	y	-485	109,5	117
18	17	53	y	-448	81,3	85,9
19	18	53	y	-456	86,1	91,5
20	19	53	y	-470	95,1	103,7
21	20	53	y	-456	85,9	92,1
22	21	53	y	-470	93,9	100,1
23	22	53	y	-440	77,5	82,9
24	23	53	y	-456	86,4	93,9
25	24	53	y	-470	94,8	102,6
26	25	53	y	-467	92,3	100,6
27	26	53	y	-475	97,8	106,6
28	27	53	y	-473	96,5	102,6
29	28	53	y	-451	82,5	88,6
30	29	53	y	-478	101,3	108,6
31	30	53	y	-453	84	89,7
32	31	53	y	-445	79,6	86,5
33	32	53	y	-462	89,2	96
34	33	53	y	-462	89,2	96,9
35	34	53	y	-462	88,2	95,5
36	35	53	y	-486	109,2	117,2
37	36	53	y	-453	84,3	93,5
38	37	53	y	-459	87,1	93,5
39	38	53	y	-448	80,8	87,6
40	39	53	y	-459	88	94,8
41	40	53	y	-478	100,3	107,4
42	41	53	y	-467	92,3	99,2
43	42	53	y	-456	86,3	93,3

44	43	53	y	-473	96,6	104,3
45	44	53	y	-459	87,8	96,1
46	45	53	y	-478	101,6	109,5
47	46	53	y	-470	94,6	100,6
48	47	53	y	-462	89,7	96,4
49	48	53	y	-453	85	91,2
50	49	53	y	-464	90,6	96,9
51	50	53	y	-473	97	104,4
52	51	53	N	-511	226	2273

A.5 Demonstração de resultados da 5ª série de ensaios

A.5.1 Condições atmosféricas e Outras observações

A todos os para-raios testados durante esta série de ensaios foi adicionada uma terra.

Tabela A.14: Condições Atmosféricas da 5ª Série de Ensaios

Condições Atmosféricas			
	Humidade (%)	Temperatura (°C)	Pressão (mbar)
Iniciais	63	10,6	1013
Entre	62	13,1	1013
Finais	61	12,1	1013

A.5.2 Resultados

A.5.2.1 PHS

Tabela A.15: Resultados obtidos para a quinta série de ensaios ao PHS com terra

Nº Shot Total	Nº Shot Válido	U_{charge} (kV)	Breakdown or not	U_{pico}	T_c	T_2
1		53		-503	267	2298
2	1	53	y	-497	212,9	220,6
3	2	53	y	-478	151,8	159,3
4	3	53	y	-503	216,8	234
5	4	53	y	-456	115,4	121,6
6	5	53	y	-497	167,4	176,6
7	6	53	y	-467	120,7	127,4
8	7	53	y	-464	109,4	115,6
9	8	53	y	-503	161,2	171,3
10	9	53	y	-494	138,3	146,2
11	10	53	y	-453	92,4	98,3
12	11	53	y	-459	94,7	99,6
13	12	53	y	-489	118,4	123,9
14	13	53	y	-494	125,8	133,4
15	13	53	n			

16	14	53	y	-494	127,6	135,1
17	15	53	y	-473	100,7	107,3
18	16	53	y	-475	102	109,6
19	17	53	y	-494	120,4	127,1
20	18	53	y	-492	116,1	123,8
21	19	53	y	-462	87,3	92
22	20	53	y	-489	108	114,8
23	21	53	y	-451	79,3	85,1
24	22	53	y	-486	103,7	111
25	23	53	y	-470	89,1	94,3
26	24	53	y	-462	83,7	88,8
27	25	53	Y	-456	79,8	85,4
28	26	53	Y	-470	87,7	93,4
29	27	53	Y	-489	101,8	109,3
30	28	53	Y	-462	81,3	86
31	29	53	Y	-489	100,5	107,5
32	30	53	Y	-475	89,4	95,2
33	31	53	Y	-464	81,8	86,2
34	32	53	Y	-484	95,2	101,4
35	33	53	Y	-464	81	87
36	34	53	Y	-489	100,1	107
37	35	53	Y	-464	80,9	86,2
38	36	53	Y	-486	96,8	102,9
39	37	53	Y	-500	111,6	120,8
40	38	53	Y	-481	92,6	98,2
41	39	53	Y	-484	93	98,3
42	40	53	Y	-462	78,5	83,6
43	41	53	Y	-503	115,1	123,2
44	42	53	Y	-478	89,1	96,7
45	43	53	Y	-445	70,4	75,5

46	44	53	Y	-456	75,6	81,6
47	45	53	Y	-478	88	94
48	46	53	Y	-478	87,4	92,7
49	47	53	Y	-456	74,5	80
50	48	53	Y	-481	90,3	96
51	49	53	Y	-462	77,6	83,6
52	50	53	y	-467	80,6	85,6
53	51	53	N	-514	212	2216

A.5.2.2 PDI - Empresa X

Tabela A.16: Resultados obtidos para a quinta série de ensaios ao PDI da Empresa X, com terra

Nº Shot Total	Nº Shot Válido	U_{charge} (kV)	Breakdown or not	U_{pico}	T_c	T_2
1		53		-500	260	2318
2	1	53	y	-489	168,1	176,4
3	2	53	y	-445	108,4	113,2
4	3	53	y	-478	125,1	131,6
5	4	53	y	-486	140,8	149,2
6	5	53	y	-459	107,5	112,5
7	6	53	y	-494	143,4	149,8
8	7	53	y	-489	132,1	140,4
9	7	53	n			
10	8	53	y	-470	111,2	116,6
11	9	53	y	-473	111,5	117,8
12	10	53	y	-497	139,2	147,1
13	11	53	y	-473	107	114,9
14	12	53	Y	-505	154,6	163,8
15	13	53	y	-470	101	107,6
16	14	53	y	-484	112,6	120
17	15	53	y	-475	104,5	111,2
18	16	53	y	-464	93,7	99,2

19	16	53	n	-514	1965	
20	17	53	y	-478	109,6	116,2
21	18	53	y	-467	98,5	104,1
22	19	53	y	-448	85,4	90,8
23	20	53	y	-478	98,8	104,5
24	21	53	y	-478	104,5	111,1
25	22	53	y	-467	95,4	101,7
26	23	53	y	-500	130,6	139,3
27	24	53	y	-462	89,5	94,3
28	25	53	y	-453	84,6	90,2
29	26	53	y	-459	88,6	94,3
30	27	53	y	-500	127,1	135,2
31	28	53	y	-494	117,9	125
32	29	53	y	-448	80,9	86,1
33	30	53	y	-481	104,4	110,2
34	31	53	y	-478	100,6	107,7
35	31	53	n	-514	190,4	
36	32	53	y	-475	102,7	107,8
37	33	53	y	-478	103,4	109,6
38	33	53	n	-514	191,8	
39	34	53	y	-478	109,5	118
40	35	53	y	-492	122,4	130,9
41	36	53	y	-489	116,4	123,8
42	37	53	y	-470	96,1	101,5
43	38	53	y	-456	87,3	94
44	39	53	y	-453	84,7	89,8
45	40	53	y	-481	103,8	109,5
46	41	53	y	-467	91,8	97,1
47	42	53	y	-494	117,4	124,8
48	43	53	y	-451	80,6	85,3

49	44	53	y	-475	96,9	104,3
50	45	53	y	-456	82,3	87,5
51	46	53	y	-462	87	92,5
52	47	53	y	-484	102,9	190,8
53	48	53	y	-475	95,7	102,3
54	49	53	y	-475	95,2	100,8
55	50	53	y	-478	97,7	105,3
56	50	53	N	-514	208	2205

A.5.2.3 PDI (40μs) - Empresa Y

Tabela A.17: Resultados obtidos para a quinta série de ensaios ao PDI (40μs) da Empresa Y, com terra

Nº Shot Total	Nº Shot Válido	U_{charge} (kV)	Breakdown or not	U_{pico}	T_c	T_2
1		53		-514	212	2216
2	1	53	y	-494	147,5	154,4
3	2	53	y	-445	93,6	98,5
4	3	53	y	-459	101,7	107,2
5	4	53	y	-478	115,1	123
6	5	53	y	-511	188,1	200,2
7	6	53	y	-492	127,5	132,7
8	7	53	y	-462	97,7	104
9	8	53	y	-456	93,4	99,1
10	9	53	y	-462	94,7	100,8
11	10	53	y	-464	95	102,4
12	11	53	y	-470	100,6	106,8
13	12	53	y	-456	89,6	94,6
14	13	53	y	-475	103,5	110,7
15	14	53	y	-505	142,5	150,6
16	15	53	y	-470	98,8	107,2
17	16	53	y	-451	85,5	90,2

18	17	53	y	-464	93,1	98,3
19	18	53	y	-456	88,1	93,5
20	19	53	y	-445	81,3	87
21	20	53	y	-467	94,6	101,2
22	21	53	y	-459	88,2	93,7
23	22	53	y	-456	85,6	91,8
24	23	53	y	-467	92	98,1
25	24	53	y	-462	88,5	94
26	25	53	y	-456	85,4	91,6
27	26	53	y	-445	79,4	84,9
28	27	53	y	-475	98,3	104
29	28	53	y	-459	87,7	93,3
30	29	53	y	-473	96,1	101,5
31	30	53	y	-464	98,2	97,1
32	30	53	n	-467		
33	31	53	y	-451	85,3	91,1
34	32	53	y	-514	184,2	201,7
35	33	53	y	-456	87,7	92,5
36	33	53	n	-514	195	
37	34	53	y	-473	103,3	109,6
38	35	53	y	-494	124,5	132,2
39	36	53	y	-494	125,7	135
40	37	53	Y	-481	107,1	113,5
41	38	53	Y	-462	91,6	97,7
42	39	53	Y	-481	106,6	112
43	39	53	N			
44	40	53	Y	-514	190,7	206,2
45	41	53	Y	-489	117,6	126,6
46	42	53	Y	-462	92,4	98,2
47	43	53	Y	-467	96,4	103

48	44	53	Y	-481	107,9	115,3
49	45	53	Y	-453	86,5	91,4
50	46	53	Y	-464	92,7	98,6
51	47	53	Y	-462	90	95,4
52	48	53	Y	-475	99	106,3
53	49	53	Y	-456	87	93,3
54	50	53	Y	-484	107	114,1
55	50	53	N	-500	260	2318

A.6 Demonstração de resultados da 6ª série de ensaios

A.6.1 Condições atmosféricas e Outras observações

Tabela A.18: Condições Atmosféricas da 6ª Série de Ensaios

Condições Atmosféricas			
	Humidade (%)	Temperatura (°C)	Pressão (mbar)
Iniciais	68	10,9	993
Entre	67	11	995
Finais	66	11,6	998

A.6.2 Resultados

A.6.2.1 PHS

Tabela A.19: Resultados obtidos para a sexta série de ensaios ao PHS

Nº Shot Total	Nº Shot Válido	U_{charge} (kV)	Breakdown or not	U_{pico}	T_c	T_2
1		52,5		-486	267	2282
2	1	52,5	y	-478	203,8	209,9
3	1	52,5	n	-486	252,7	
4	1	52,5	n	-448	255,7	
5	2	52,5	y	-486	223,4	236
6	2	52,5	n	-486	246,1	
7	2	52,5	n	-489	250	

8	3	52,5	y	-473	160,8	168,4
9	4	52,5	y	-464	141,2	147,9
10	5	52,5	y	-470	170,1	178,8
11	6	52,5	y	-481	152,5	161,4
12	7	52,5	y	-459	119,1	124,4
13	7	52,5	n	-502		
14	8	52,5	y	-456	114,6	121,7
15	9	52,5	y	-489	151,5	159,6
16	10	52,5	y	-497	165,6	173,1
17	11	52,5	y	-464	113,3	121,7
18	11	52,5	n	-505	210,2	
19	12	52,5	y	-489	143,8	151,2
20	13	52,5	y	-467	113,7	121,2
21	14	52,5	y	-484	129,8	137,4
22	15	52,5	y	-475	116,7	124,5
23	16	52,5	y	-462	101,7	106,9
24	16	52,5	n	-508	198,1	
25	17	52,5	y	-497	156,1	167,3
26	18	52,5	y	-453	96,9	103,3
27	19	52,5	y	-473	116,2	124,7
28	20	52,5	y	-505	183,4	200
29	21	52,5	y	-481	117,9	125
30	22	52,5	y	-462	98	103,8
31	23	52,5	y	-489	126,4	135,3
32	24	52,5	y	-478	109,7	116,6
33	25	52,5	y	-508	193,9	230
34	26	52,5	y	-467	99,1	105,9
35	27	52,5	y	-470	100,5	106,8
36	28	52,5	y	-464	95,3	101,4
37	29	52,5	y	-492	125	132,6

38	30	52,5	y	-453	87,7	93,3
39	31	52,5	y	-467	96,4	102,1
40	32	52,5	y	-489	115,7	122,2
41	33	52,5	y	-508	158,8	166,5
42	34	52,5	y	-475	102,5	109,2
43	35	52,5	y	-508	172,2	198,4
44	36	52,5	y	-505	151,5	163,6
45	37	52,5	y	-470	98,7	105
46	38	52,5	y	-467	94,9	101,6
47	39	52,5	y	-459	89,5	94,6
48	40	52,5	y	-478	104,6	113,6
49	41	52,5	y	-462	90,1	95,8
50	42	52,5	y	-478	102,8	109,4
51	43	52,5	y	-473	97,6	104,2
52	44	52,5	y	-484	107,7	115,5
53	45	52,5	y	-456	85,8	90,7
54	46	52,5	y	-494	125,1	131,9
55	47	52,5	y	-464	91	95,9
56	48	52,5	y	-470	96,4	103
57	49	52,5	y	-503	138,2	146,9
58	50	52,5	y	-492	117,5	125,3
59	47	52,5	N	-505	206	2233

A.6.2.2 PDI (60μs) - Empresa Y

Tabela A.20: Resultados obtidos para a sexta série de ensaios ao PDI (60μs) - Empresa Y

Nº Shot Total	Nº Shot Válido	U_{charge} (kV)	Breakdown or not	U_{pico}	T_c	T_2
1		52,5		-492	269	2290
2	1	52,5	y	-459	135,7	142
3	2	52,5	y	-492	182,7	189,7
4	2	52,5	n	-500	239,9	

5	3	52,5	y	-467	132,8	139
6	4	52,5	y	-489	162,1	168,8
7	5	52,5	y	-497	180,8	190,6
8	6	52,5	y	-470	124,3	130,1
9	7	52,5	y	-498	146,2	154,9
10	8	52,5	y	-448	100,3	106,8
11	9	52,5	y	-462	108	113,7
12	10	52,5	y	-462	106,2	113,2
13	11	52,5	y	-481	124,1	129,6
14	12	52,5	y	-481	122,8	129,6
15	13	52,5	y	-489	130,8	138,6
16	14	52,5	y	-475	114,1	122,3
17	15	52,5	y	-451	93	100,2
18	16	52,5	y	-470	107,3	114,7
19	17	52,5	y	-451	91,1	96
20	18	52,5	y	-451	90,1	94
21	19	52,5	y	-453	91,3	96,4
22	20	52,5	y	-470	104,4	111
23	21	52,5	y	-456	92,8	99,4
24	22	52,5	y	-459	94,8	101,3
25	23	52,5	y	-462	95,6	101,7
26	24	52,5	y	-478	108,6	113,9
27	25	52,5	y	-464	97,1	103,6
28	26	52,5	y	-478	108,3	114,2
29	27	52,5	y	-481	111,4	119,2
30	28	52,5	y	-503	148,2	156,5
31	28	52,5	n	197,8		
32	29	52,5	y	-470	106,1	113
33	30	52,5	y	-453	92,8	98,1
34	31	52,5	y	-456	93,9	99,8

35	32	52,5	y	-464	99,7	106,8
36	33	52,5	y	-456	92,8	98,6
37	34	52,5	y	-478	110,4	116,2
38	35	52,5	y	-467	100,6	107,4
39	36	52,5	y	-462	95,6	103,1
40	37	52,5	y	-472	104,2	110
41	38	52,5	y	-462	94,7	99,8
42	38	52,5	n	-505	198,7	
43	39	52,5	y	-484	119,2	125,2
44	40	52,5	y	-459	96,4	101,6
45	41	52,5	y	-478	112,6	121,2
46	42	52,5	y	-467	102,5	109,8
47	43	52,5	y	-486	120,3	127,2
48	44	52,5	y	-494	129,8	136
49	44	52,5	n			
50	45	52,5	y	-467	103,8	110
51	46	52,5	y	-453	92,7	97,4
52	47	52,5	y	-473	107,1	114,1
53	48	52,5	y	-464	100,9	107,1
54	49	52,5	y	-494	134,3	140,7
55	50	52,5	y	-470	170,4	189,2
56	48	52,5	N	-505	214	2248

A.7 Demonstração de resultados da 7ª série de ensaios

A.7.1 Condições atmosféricas e Outras observações

Tabela A.21: Condições Atmosféricas da 7ª Série de Ensaios

Condições Atmosféricas			
	Humidade (%)	Temperatura (°C)	Pressão (mbar)
Iniciais	34	9,4	1009
Entre	34	9,5	1009
Finais	32	10	1007

A.7.2 Resultados

A.7.2.1 PHS

Tabela A.22: Resultados obtidos para a sétima série de ensaios ao PHS

Nº Shot Total	Nº Shot Válido	U_{charge} (kV)	Breakdown or not	U_{pico}	T_c	T_2
1		53		-503	263	2227
2	1	53	y	-478	151,3	162
3	2	53	y	-453	119,9	129,2
4	3	53	y	-462	122,4	129,4
5	4	53	y	-478	134,8	143
6	5	53	y	-464	116,6	126,5
7	6	53	y	-475	125,9	135,7
8	7	53	y	-464	112	118,4
9	8	53	y	-456	104,9	111,8
10	9	53	y	-494	144,9	154,4
11	10	53	y	-500	151,9	163,3
12	11	53	y	-440	89,9	96,3
13	12	53	y	-470	109,3	117,1
14	13	53	y	-451	94,3	101,4
15	14	53	y	-473	110	117
16	15	53	y	-453	94,3	101,2

17	16	53	y	-470	106,2	113,6
18	17	53	y	-478	111,1	119
19	18	53	y	-464	100	106,8
20	19	53	y	-514	191,3	209
21	20	53	y	-456	93,5	100,1
22	21	53	y	-475	107,4	117,7
23	22	53	y	-467	100,6	108,3
24	23	53	y	-462	95,6	102,7
25	24	53	y	-475	106,7	114,8
26	25	53	y	-489	119,8	128,4
27	26	53	y	-473	103,3	112,9
28	27	53	y	-478	107,6	115
29	28	53	y	-462	95	102,2
30	29	53	y	-470	101,4	109,2
31	30	53	y	-462	94,8	103,1
32	31	53	y	-481	110,3	117,6
33	32	53	y	-500	132,8	143,5
34	33	53	y	-475	104,1	112,6
35	34	53	y	-462	93,5	100,3
36	35	53	y	-456	90,2	98,5
37	36	53	y	-473	102,1	109,6
38	37	53	y	-505	142,7	154,7
39	38	53	y	-478	106,1	114,7
40	39	53	y	-462	93,4	101,4
41	40	53	y	-514	179,1	201,4
42	41	53	y	-479	103,5	112,5
43	42	53	y	-470	99,1	107,2
44	43	53	y	-484	110,9	120,5
45	44	53	y	-459	91,8	99,6
46	45	53	y	-440	80,1	86,7

47	46	53	y	-489	115	124,3
48	47	53	y	-484	110,5	119,7
49	48	53	y	-473	100,5	107,8
50	49	53	y	-451	86	92,4
51	50	53	y	-459	91,1	97,6
52	47	53	N	-514	213	2206

A.7.2.2 PDI (60μs) - Empresa Y

Tabela A.23: Resultados obtidos para a sétima série de ensaios ao PDI (60μs) - Empresa Y

Nº Shot Total	Nº Shot Válido	U_{charge} (kV)	Breakdown or not	U_{pico}	T_c	T_2
1		53		-511	217	2246
2	1	53	y	-494	155,5	168,7
3	2	53	y	-456	107	116,2
4	3	53	y	-470	115,7	123,6
5	4	53	y	-484	126,6	135,4
6	5	53	y	-500	150	162,6
7	6	53	y	-484	123,4	133
8	7	53	y	-459	99,3	106,5
9	8	53	y	-453	94,5	101,5
10	9	53	y	-453	94	101,5
11	10	53	y	-453	93,3	101,2
12	11	53	y	-470	104	111,9
13	12	53	y	-462	96,4	103
14	13	53	y	-478	110,4	120,1
15	14	53	y	-486	117,1	125,3
16	15	53	y	-470	101,2	110,7
17	16	53	y	-451	87,5	94,3
18	17	53	y	-473	103,4	111,4
19	18	53	y	-453	88,8	96,2
20	19	53	y	-473	102,6	110,7

21	20	53	y	-489	117,6	128,1
22	21	53	y	-464	95,3	102
23	22	53	y	-462	93,2	101,1
24	23	53	y	-456	89,9	96,9
25	24	53	y	-440	81,2	87,6
26	25	53	y	-464	94,3	102,5
27	26	53	y	-508	147,5	161,6
28	27	53	y	-456	89,2	96
29	28	53	y	-456	89,2	94,9
30	29	53	y	-470	99	106,9
31	30	53	y	-464	95,1	102,5
32	31	53	y	-470	98,2	107,6
33	32	53	y	-473	99,4	106,9
34	33	53	y	-467	95,8	104,4
35	34	53	y	-464	94,3	100,8
36	35	53	y	-462	91,9	99,5
37	36	53	y	-464	94	103,4
38	37	53	y	-448	79,7	85,2
39	38	53	y	-464	93,4	100,6
40	39	53	y	-470	97,5	105,2
41	40	53	y	-456	88,3	94,9
42	41	53	y	-486	111,8	119,8
43	42	53	y	-470	97,5	104,1
44	43	53	y	-464	93,6	100,2
45	44	53	y	-445	82,2	89
46	45	53	y	-437	78	84
47	46	53	y	-437	78,1	84,4
48	47	53	y	-464	92,8	99,6
49	48	53	y	-473	99,2	107,3
50	49	53	y	-451	83,9	90,4

51	50	53	y	-456	87,4	94,6
52	47	53	N	-511	221	2251

A.8 Up and Down

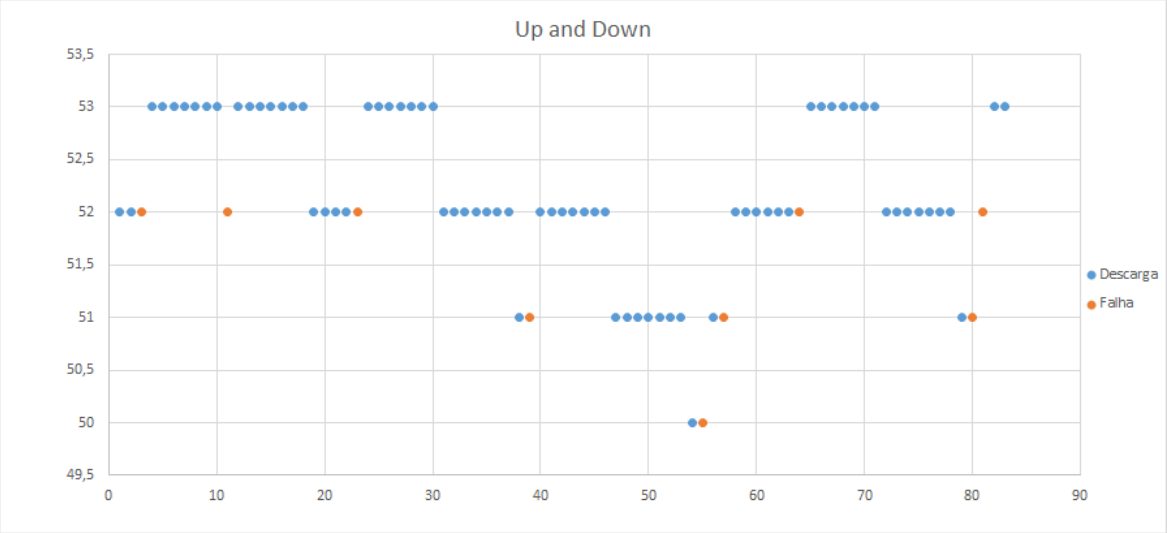


Figura A.13: Gráfico Up and Down

Referências

[1] Tomás Guerra Junqueiro Sapage. Caracterização dos procedimentos definidos pela norma 4426. Tese de mestrado, FEUP, 2016.

[2] IEC High Voltage Techniques 60060 - Part 1: General definitions and test requirements 2010, Agosto 2010.

[3] *Memória Descritiva do LAT-FEUP*, 2013.

[4] N. Hyltén Cavallius. *High Voltage Laboratory Planning*. Haefely, 1986.

[5] F.H. Kreuger. *Industrial High Voltage*. Delft University Press, 1991.

[6] W.Zaengl e J. Kuffel E. Kuffel. *High Voltage Engineering: Fundamentals*. Butterworth-Heinemann, Primeira edição, 2000.

[7] IEC 60052 - voltage measurement by means of standard air gaps 2002, Setembro 2002.

[8] John Kuffel e Peter Kuffel. *High voltage engineering fundamentals*. Newnes, 2000.

[9] *Impulse Voltage Test System*, 1992.

[10] Energy map of america.

[11] Motukuru S Naidu e V Kamaraju. *High voltage engineering*. Tata McGraw-Hill Education, 2013.

[12] José Pedro Martinho Queirós. Análise comparativa do comportamento dielétrico dos isoladores compósitos com isoladores em materiais convencionais. Tese de mestrado, FEUP, 2013.

[13] Martin A Uman. *The lightning discharge*. Courier Corporation, 2001.

[14] J. Alan Chalmers. *Atmospheric Electricity: International Series of Monographs in Natural Philosophy Volume 11*. Professor of Physics, Durham University, 2nd edition edição, 1967.

[15] Claude Gary. *La foudre: des mythologies antiques à la recherche moderne*. Elsevier Masson, 1994.

[16] Basil Ferdinand Jamieson Schonland. The work of benjamin franklin on thunderstorms and the development of the lightning rod. *Journal of the Franklin Institute*, 253(5):375–392, 1952.

[17] Proteção contra descargas atmosféricas - Schneider. URL: http://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/tema9_prot-atm.pdf.

[18] Lightning protection guide. Relatório técnico, 2014. Último acesso 25 de Outubro 2016, EDITION=Terceira, YEAR=2016, MONTH=Outubro,. URL: https://www.dehn-international.com/en/lightning-protection-guide.

[19] Donald W Zipse. Lightning protection systems: Advantages and disadvantages. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 30(5):1351–1361, 1994.

[20] Martin A. Uman e V. A. Rakov. A critical review of nonconventional approaches to lightning protection. *AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY*, Dezembro 2002.

[21] Peter L. Jackson e Christine E. J. Jackson C. Donal Ahrens. *Meteorology Today, An introduction to weather, climate and the environment*. Nelson Education Lda, Primeira edição, 2012.

[22] Martin A. Uman. *Lightning*. McGraw-Hill, 1969.

[23] Manuel Angel e Saboy Gabiña. High Voltage Laboratory : simulation , adjustment and test on electrical insulators. Tese de mestrado, FEUP, 2009.

[24] Vladimir A Rakov. Lightning discharge and fundamentals of lightning protection. *Journal of Lightning Research*, 4(1):3–11, 2012.

[25] Sistemas de proteção contra descargas atmosféricas e sobretensões transitórias. 2013.

[26] Ronald L. Holle. Some aspects of global lightning impacts. *Preprints, 7th Conference on Meteorological Applications of Lightning Data*, (Ahrens 2013), 2015.

[27] VA Rakov, A Borghetti, C Bouquegneau, WA Chisholm, V Cooray, K Cummins, G Diendorfer, F Heidler, A Hussein, M Ishii, et al. Cigre technical brochure on lightning parameters for engineering applications. Em *Lightning Protection (XII SIPDA), 2013 International Symposium on*, páginas 373–377. IEEE, 2013.

[28] Indice ceraunico. Último acesso em 2016/11/14. URL: http://www.qenergia.pt/content/index.php?action=detailfo&rec=240.

[29] Sandra Maria Ladeira Correia. Análise de padrões temporais e espaciais de descargas eléctricas atmosféricas em portugal continental. Tese de mestrado, 2012.

[30] IPMA. Instituto português de mar e atmosfera. Disponível em https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/otempo/observacao.remota/index.html?page=dea.xml, acedido a última vez em Outubro de 2016.

[31] NP 4426 proteção contra descargas atmosféricas, sistemas com dispositivo de ionização não radioativo 2013, Agosto 2013.

[32] EN 62305 Parte 1 e 2: Protection against lightning 2011, Junho 2011.

[33] EN 50164 series: Lightning protection components (LPC), 2008 e 2009.

[34] IEEE standard techniques for high-voltage testing 1995, Agosto 1995.

[35] French Standard. Protection of structures and open areas against lightning using ese air terminals. *French Standard NF C*, 17:102, 1995.

[36] Spanish Standard. Protection of structure and of open areas against lightning using early streamer emission air terminals. *UNE*, 21186, 1996.

[37] L Pecastaing, T Reess, A De Ferron, S Souakri, E Smycz, A Skopec, e C Stec. Experimental demonstration of the effectiveness of an early streamer emission air terminal versus a franklin rod. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22(2):789–798, 2015.

[38] Marley Becerra e Vernon Cooray. Laboratory experiments cannot be utilized to justify the action of early streamer emission terminals. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41(8):085204, 2008.

[39] Sonia Ait-Amar e Gérard Berger. A modified version of the rolling sphere method. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 16(3):718–725, 2009.

[40] Acreditação. Último acesso em 2017/01/7. URL: http://www1.ipq.pt/PT/Normalizacao/Pages/Normalizacao.aspx.

[41] A Bondiou e I Gallimberti. Theoretical modelling of the development of the positive spark in long gaps. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 27(6):1252, 1994.

[42] N Goelian, P Lalande, A Bondiou-Clergerie, GL Bacchiega, A Gazzani, e I Gallimberti. A simplified model for the simulation of positive-spark development in long air gaps. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 30(17):2441, 1997.