

**Protecção contra curto-circuitos causados pelo toque de
linhas aéreas de Média Tensão com árvores**

João Miguel Oliveira Carvalho

Dissertação para obter o Grau de Mestre em

Engenharia Eletrotécnica e Computadores

Orientador: Prof. José Luís Costa Pinto de Sá

Júri

Presidente: Prof.^a Célia Maria Santos Cardoso de Jesus

Orientador: Prof. José Luís Costa Pinto de Sá

Vogal: Prof. Gil Domingos Marques

Junho 2019

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

A realização desta tese só foi possível devido ao contributo e auxílio, que tive durante a realização do mesmo, das mais diversas pessoas.

Gostaria de agradecer, primeiramente, ao meu orientador, o Sr. Professor Dr. Pinto de Sá, pela análise crítica e construtiva e pelas sugestões e indicações, que me prestou durante toda a elaboração da dissertação.

Agradecer também o auxílio prestado pelo Sr. João Paulo, técnico do laboratório de Alta Tensão do departamento de MEEC, pela cedência do equipamento técnico e ainda pelas sugestões dos materiais a utilizar.

Ao Sr. Prof. Dr. Domingo Xavier Viegas e à equipa disponibilizada por ele, que prontamente me recebeu e me ajudou tanto nas medições experimentais realizadas na Lousã, bem como na escolha dos terrenos para a realização do mesmo.

Aos meus pais e às minhas irmãs, bem como aos restantes familiares, por todo o apoio prestado e por serem uma fonte de motivação extra.

Por último, aos meus amigos por me acompanharem nesta jornada e por toda a disponibilidade que me mostraram.

Resumo

O contacto entre linhas elétricas e árvores sempre foi um dos principais problemas das companhias elétricas, especialmente na rede de Média Tensão, por se tratar de um defeito fase-terra muito resistivo, podendo mesmo ser a causa de incêndios florestais, pondo até em risco a vida humana e a biodiversidade, bem como os ativos das companhias. De forma a poder detetar estes contactos, decidiu-se caracterizar eletricamente as principais espécies arbóreas de Portugal, através da medição experimental da resistência elétrica. Após a realização das medições é proposto um modelo da resistência elétrica da árvore em função da altura e do diâmetro basal da mesma, com o intuito de simular árvores com alturas idênticas às que se encontram os condutores. Adicionalmente, obteve-se com base nos valores experimentais e simulados, e através da caracterização florestal realizada pelo Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF), a função probabilidade da distribuição das resistências elétricas por região.

Por fim, estudou-se o impacto da parametrização da I_{op} das funções relativas a defeitos fase-terra para diferentes valores de corrente, através do cálculo da probabilidade de deteção das resistências elétricas existentes numa dada região, para o I_{op} considerado e para os diferentes regimes de Neutro e níveis de tensão.

Palavras-chave: Defeitos fase-terra, Incêndios, Rede de Média Tensão, Resistências elétricas de árvores, Funções homopolares

Abstract

One of the major problems of electrical utilities, in particular in the MV network, is the detection of contacts between conductors and trees, due to the highly resistive nature of the earth ground fault. Under optimal conditions, these contacts could lead to forest fires, threatening the biodiversity and human life, as well as utilities assets.

For this purpose, in this work were conducted experimental measurements of tree electrical resistance, in situ, on the most common species of trees in Portugal. Based on those measurements, models of electrical tree resistance were developed as function of height and base diameter, for the species of *Pinus Pinaster sp.* and *Eucalyptus globulus Labill.* These models were used to simulate electrical resistance of trees with heights like the ones of the Medium Voltage overhead line conductors. Additionally, we calculated the probability density function of electrical tree resistance in a specific region of Portugal, based on the empirical data, simulations and the latest forest characterization made by Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF), was obtained the probability density function of electrical tree resistance in a certain region.

Finally, two different settings for earth fault functions of the Protection Systems were studied. Here the probability of the earth fault function detects the contact between conductors and electrical tree resistances were obtained, based on the adopted neutral regime and on the voltage level of Medium Voltage, MV.

Keywords: MV network, Earth ground fault, resistive faults, Forest Fires, Electrical tree resistance, Ground Fault functions

Índice

Agradecimentos	iii
Declaração	iii
Resumo.....	v
Abstract	vi
Índice	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xii
Lista de Abreviaturas	xiii
1. Introdução	1
1.1. Estrutura do documento	1
2. Revisão Da Literatura	3
2.1. Constituição da Árvore	3
2.1.1. Tronco.....	3
2.1.2. Teor de Humidade	4
2.1.3. Propriedades elétricas da madeira	4
2.2. Contacto entre linhas elétricas e árvores	5
2.3. Rede elétrica de distribuição	9
2.3.1. Linhas Elétricas de Média Tensão	9
2.3.2. Regimes de Neutro	11
2.2.2.1 Neutro Isolado	13
2.2.2.2 Neutro Ressonante	13
2.2.2.3 Neutro com Impedância Limitadora.....	14
2.3.3. Proteções contra defeitos resistivos	15
2.3.4. Transformador de Intensidade, TI	20
3. Caracterização de Portugal	22
3.1. Caracterização da Floresta Portuguesa	22
3.1.1. Distribuição das espécies por Região em Portugal.....	23
3.2. Condições climáticas e meteorológicas em Portugal	26
3.2.1. Condições Climáticas	26
3.3. Índice de Perigo.....	28
4. Metodologia.....	30

4.1.	Medições experimentais.....	30
4.2.	Modelo de evolução da resistência com a altura	34
4.2.1.	Modelo Pinheiro-bravo (Pinus Pinaster Sp.)	36
4.2.2.	Modelo Eucalipto (Eucalyptus globulus Labill)	38
4.3.	Características das Rede MT consideradas	39
4.4.	Distribuição Probabilística das Resistências Eléctricas por Região	41
4.4.1.	Região do Alentejo Central.....	41
4.4.2.	Região do Oeste.....	42
4.4.3.	Região do Pinhal Interior do Sul.....	43
5.	Resultados.....	45
5.1.	Correntes de Defeito	45
5.2.	Estudo da Parametização	46
5.2.1.	Parametização MIHD, 1º Escalão	48
5.2.2.	Parametização da MIH, 2º Escalão.....	49
5.2.3.	Coordenação temporal	51
5.3.	Parametização Sugerida	51
6.	Conclusão.....	54
6.1.	Melhorias e Trabalho Futuro.....	55
7.	Referências.....	56
Anexo A	60
Anexo B.	Informações UP	71

Lista de Figuras

Figura 2.1- A relação entre a condutância elétrica e o teor de humidade no caso do Abeto Falso (<i>Picea Abies</i>), (Du et al.1991; Forsén & Tarvainen 2000; Samuelsson 19993) e do Abeto Negro (<i>Picea mariana</i>), (James 1968), retirado de [6]	5
Figura 2.2- Formação do caminho carbonizado na experiência realizada em [11]	6
Figura 2.3- Contacto entre linhas aéreas e árvores que originou um Incêndio na Austrália, retirado de [12].....	7
Figura 2.4- Caracterização da Rede de Distribuição 2017	9
Figura 2.5- Silhueta de um apoio com disposição dos condutores em a) galhardete, b) esteira, adaptado de [19].....	10
Figura 2.6- Situações de corte e decote de árvores, adaptado de [21]	10
Figura 2.7- Circuito representativo da equação de defeito fase-terra com as componentes simétricas, adaptado de [22].....	12
Figura 2.8- Ligação típica das redes aéreas de MT, retirado de [3].....	14
Figura 2.9- Representação da ligação do neutro artificial, retirado de [3]	15
Figura 2.10- Curva de tempo instantâneo da função Máximo de Corrente de Limiar Alto para defeitos Fase-Terra	16
Figura 2.11- Exemplo de diferentes tipos de curva de tempo inverso da norma CEI60255-3	18
Figura 2.12- Característica operacional da função de Máximo de Corrente Homopolar Direcional, retirado de [24]	19
Figura 2.13- Caracterização e coordenação temporal das funções homopolares da UP	19
Figura 2.14- Transformador de Intensidade Toroidal, retirado de [27]	20
Figura 2.15- Pior cenário para erros de Tis admitidos pelas normas IEEE e IEC para correntes inferiores a I_n , retirado de [28]	21
Figura 3.1- Distribuição ao longo dos IFN realizados da Floresta Portuguesa em Portugal Continental, retirado de [29]	22
Figura 3.2- Variação da composição de terrenos com uma percentagem de coberto inferior a 10 % nos IFN's mais recentes, retirado de [29]	23
Figura 3.3- Caracterização de Portugal através das NUTS III.....	24
Figura 3.4- Classificação Climática De Köppen em Portugal, retirado de [57]	26
Figura 3.5- Variabilidade da temperatura durante o Verão comparativamente com a média do período de 1971-2000, retirado de [59]	27

Figura 3.6- Anomalias do total de precipitação no Verão em Portugal Continental, comparativamente com a média do período de 1971-2000, retirado de [59]	28
Figura 3.7- Média do índice de Risco Conjuntural Meteorológico durante o mês de Agosto entre 2006 e 2018, retirado de [61]	29
Figura 4.1- Localização geográfica das medições experimentais a) Ceira dos Vales, Lousã, Coimbra (40°08'43.8"N 8°14'32.9"W) b) Azoia, Leiria, Leiria (39°42'45.0"N 8°49'28.4"W) e Perulheira, Batalha, Leiria (39°39'05.3"N 8°43'42.4"W)	31
Figura 4.2- Configuração das medições experimentais a)Rarv e b)Rx1_x2	32
Figura 4.3- Medição experimental de Rx1-x2 num Pinheiro-Bravo, na Lousã, Coimbra	33
Figura 4.4- Estrutura da árvore fictícia, com as duas primeiras iterações	35
Figura 4.5- Curva da resistividade em função do diâmetro na espécie Pinheiro-Bravo	37
Figura 4.6- Curva da resistividade em função do diâmetro em Eucaliptos	38
Figura 4.7- Característica dos Regimes de Neutro considerados por Pedro Aleixo em [63]	40
Figura 4.8- Distribuição probabilística das resistências elétricas na região do Alentejo Central	42
Figura 4.9- Distribuição probabilística das resistências eléctricas na região do Oeste	43
Figura 4.10- Distribuição probabilística das resistências elétricas na região do Pinhal Interior Sul	44
Figura 5.1- Correntes residuais provenientes de assimetrias obtidas por Pedro Aleixo para a função MIHD	45
Figura 5.2- Parametrização Sugerida para a MIHD, por [63]	49
Figura A.1- Distribuição Probabilística da região do Algarve	61
Figura A.2- Distribuição Probabilística da região do Baixo Alentejo	61
Figura A.3- Distribuição probabilística da região do Alentejo Litoral	62
Figura A.4- Distribuição probabilística da região do Alto Alentejo	62
Figura A.5- Distribuição probabilística da Região do Centro Litoral	63
Figura A.6- Distribuição Probabilística da Região Dão-Lafões´	63
Figura A.7- Distribuição Probabilística da Região da Beira Interior Norte	64
Figura A.8- Distribuição Probabilística da Região Beira Interior Sul	64
Figura A.9- Distribuição Probabilística da Região do Douro	65
Figura A.10- Distribuição Probabilística da Região do Alto Minho	65
Figura A.11- Distribuição Probabilística da Região A.M. Porto	66
Figura A.12- Distribuição Probabilística da Região da A.M. Lisboa	66

Figura A.13- Distribuição Probabilística da Região do Barros/Padrela	67
Figura A.14- Distribuição Probabilística da Região do Baixo Minho	67
Figura A.15- Distribuição Probabilística da Região do Nordeste	68
Figura A.16- Distribuição Probabilística da Região do Pinhal Interior Norte.....	68
Figura A.17- Distribuição Probabilística da Região do Tâmega.....	69
Figura A.18- Distribuição Probabilística do Região do Ribatejo.....	69
Figura A.19- Distribuição Probabilística da Região do Centro Interior	70
Figura B.1- Entradas Analógicas da TPU S420, retirado de [24].....	71
Figura B.2- Características da Função de tempo definido para defeitos Fase-Terra, retirado de [24]	71
Figura B.3- Características da Função Direccional para defeitos Fase-Terra, retirado de [24].....	71
Figura B.4- Características da Função de tempo definido para defeitos Fase-Terra, retirado de [64]..	71

Lista de Tabelas

Tabela 2.1- Nº incêndios originados por causas elétricas entre membros da EU, dados de [18]	8
Tabela 2.2- Classificação das funções de tempo inverso disponibilizadas pela TPU S420, para a norma CEI 60255-3	17
Tabela 3.1- Distribuição regional das espécies consideradas	25
Tabela 4.1- Distribuição das medições por espécie	30
Tabela 4.2- Resistência elétrica dos materiais utilizados nas medições experimentais	31
Tabela 4.3- Medições experimentais referentes às configurações Rarv e Rx1-x2	32
Tabela 4.4- Continuação Medições realizadas na localidade da Perulheira	34
Tabela 4.5- Resistências elétricas simuladas para a espécie do Pinheiro-Bravo	37
Tabela 4.6- Resistências elétricas simuladas para a espécie do Eucalipto	39
Tabela 4.7- Característica das Redes MT consideradas	40
Tabela 4.8- Corrente residual para cada regime de Neutro e nível de Tensão considerada	41
Tabela 4.9- Parâmetros da função probabilidade da Região Alentejo Central	42
Tabela 4.10- Parâmetros da função probabilidade da Região do Oeste	42
Tabela 4.11- Parâmetros da função probabilidade da Região do Pinhal Interior do Sul	43
Tabela 5.1- Corrente de defeito resultante das medições experimentais	46
Tabela 5.2- Probabilidade cumulativa, por região e regime de neutro para $I_{op} = I_{res_ass}$	47
Tabela 5.3- Transformadores de Intensidade propostos	49
Tabela 5.4- Correntes residuais para os diferentes regimes de Neutro e níveis de Tensão	50
Tabela 5.5- Erros relativos ao Transformador de Intensidade	50
Tabela 5.6- Tempo de operação dos escalões MIHD E MIH	51
Tabela 5.7- Parametrização proposta para a deteção de contactos entre condutores e árvores	52
Tabela 5.8- Probabilidade de se detetar contactos entre condutores e árvores para as parametrizações sugeridas.	53
Tabela A.1- Parâmetros das Funções Probabilidade para cada Região	60

Lista de Abreviaturas

AT	Alta Tensão
MT	Média Tensão
BT	Baixa Tensão
RSLEAT	Regulamento de Segurança de Linha Elétrica de Alta Tensão
UP	Unidade de Protecção
MIHD	Máximo Intensidade Homopolar Direcçional
SP	Sistema de Protecção
TI	Transformador de Intensidade
UE	União Europeia
EFFIS	Sistema de Informação Europeia de Incêndios Florestais
ICNF	Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas
IFN	Inventário Florestal Nacional
NUTS	Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos
PROF	Plano Regional de Ordenamento Florestal
IPMA	Instituto Português do Mar e Atmosfera
FWI	Fire Index Weather
FMC	Índice de Humidade dos Combustíveis Finos
ISI	Índice de Propagação Inicial
BUI	Índice de Combustão Inicial
DC	Índice de Húmus
DMC	Índice de Seca
RCM	Risco Conjuntural Meteorológico

1. Introdução

Atualmente, a energia é vital para o funcionamento da sociedade. De forma a transportar e a distribuir a energia dos centros de produção para os consumidores, as redes elétricas utilizam tanto as linhas elétricas como os cabos subterrâneos, em que a maioria da rede é constituída por linhas aéreas, por estas serem economicamente mais viáveis, além de serem mais fáceis de instalar e de substituir ou de reparar, em caso de um defeito material. Os cabos subterrâneos são utilizados, principalmente, nas zonas de grande densidade populacional, permitindo assim a transmissão de energia, de uma forma despercebida para as pessoas no seu quotidiano.

O desenvolvimento e a expansão da rede elétrica acarretou consigo, um maior número de conflitos entre linhas elétricas e árvores, devido ao maior número de linhas a existir em zonas florestais. Apesar de existir regulamentos que estabelecem as faixas de proteção, impedindo a plantação de árvores e permitindo o decote das mesmas, no caso destas estarem dentro da área delimitada pelas faixas. Estes regulamentos não são cumpridos na íntegra, devido ao desinvestimento por parte das companhias elétricas, no modo de gerir os combustíveis, e por parte da população que por um lado tenta maximizar o seu terreno, aproveitando as faixas de proteção, ou por outro pelo desinteresse no terreno permitindo a proliferação da fauna e da flora ao longo do tempo.

Estes conflitos entre condutores e árvores acabavam por ser mitigados ou através das proteções em que estas atuavam com a evolução da corrente de defeito ou através da descontinuidade do contacto, devido à ação do vento ou pela quebra do ramo. No entanto, nas épocas estivais, estes contactos poderão dar azo a incêndios, através da ignição de ramos e da presença de vegetação seca nas redondezas da árvore, pelo que as repercussões que até aí eram mínimas, passam a ser devastadoras tanto para a biodiversidade como para a vida humana.

Estes contactos acabam por não ser interrompidos de forma imediata, devido à característica resistiva da árvore ser bastante elevada, pelo que do ponto de vista da proteção é considerado como sendo o estado normal da rede.

Através deste trabalho pretende-se, por um lado o levantamento das resistências elétricas das espécies arbóreas mais representativas em Portugal, de forma a poder comparar com levantamentos realizados noutros países e para outras espécies e de modo a poder conhecer as limitações impostas pelas resistências às Unidades de Proteção, aquando da deteção de um contacto entre um condutor e a árvore. Por outro lado, pretende-se com base nos valores medidos experimentalmente, encontrar soluções que permitam a parametrização das funções homopolares das Unidades de Proteção para a deteção destes contactos, sem que com isso acarrete a perda da seletividade ou da sensibilidade.

1.1. Estrutura do documento

No segundo capítulo é apresentado um resumo da revisão de literatura efetuada, desde a caracterização elétrica da madeira e dos seus constituintes, passando pelos Regime de Neutro principais e termi-

nando nas funções da Unidade de Proteção usuais na deteção de defeitos resistivos

O terceiro capítulo consiste na caracterização florestal e climática de Portugal e na descrição dos Índices de Perigo referentes à ocorrência de incêndios.

No capítulo seguinte apresenta-se os resultados obtidos para as medições efetuadas e a explicação das mesmas. Ainda neste capítulo é indicado o modelo utilizado para a simulação de resistências elétricas das espécies arbóreas dominantes em Portugal, bem como a obtenção das funções de probabilidade das resistências elétricas por região.

No quinto capítulo é apresentado as probabilidades por região de se detetar os contactos entre condutores e árvores consoante no caso de se parametrizar as funções de homoplares para a corrente residual proveniente das assimetrias da rede, I_{res_Ass} , ou para corrente residual de linha sã, $I_{res_sã}$, obtidas para os diferentes tipos de regime de neutro e para os níveis de tensão de 15 kV e de 30 kV.

No sexto e último capítulo, apresenta-se as conclusões obtidas e é indicado possíveis sugestões para soluções de forma a evitar a ocorrência de incêndios originados pelo contacto entre linhas e árvores. Além disso, são ainda propostas melhorias e trabalhos futuros a serem desenvolvidos no âmbito deste trabalho.

2. Revisão Da Literatura

2.1. Constituição da Árvore

As árvores fazem parte do grupo das plantas de grande porte lenhosas e podem ser categorizadas estruturalmente em 3 grandes partes: raízes, caule ou tronco e copa, sendo que a copa se subdivide em ramos, folhas e/ou frutos.

A raiz tem como funcionalidade a fixação da árvore ao solo e a extração da seiva bruta, sendo esta constituída por água com sais minerais e é imprescindível para o desenvolvimento da árvore.

O tronco sustenta a copa com as suas ramificações além de transportar tanto a seiva bruta da raiz para a copa, pelo xilema, como a seiva elaborada das folhas da copa para o lenho, parte interior do tronco, pelo floema.

Na copa, mais concretamente nas folhas existe a transformação da seiva elaborada, compostos orgânicos produzidos através da fotossíntese, em seiva bruta.

2.1.1. Tronco

A parte exterior do tronco denominada casca é caracterizada por ser rígida e irregular sendo constituída apenas por células mortas. Entre a casca e o lenho existe uma fina camada designada de câmbio vascular. No câmbio, a seiva elaborada proveniente das folhas é transformada em celulose e lenhina, que são os principais constituintes do tecido lenhoso. Após a sua formação, o tecido lenhoso é adicionado transversalmente em camadas concêntricas e periféricas, formando os anéis de crescimento. Através dos anéis de crescimento é possível extrapolar as condições de desenvolvimento a que estiveram sujeitos, sendo que cada anel anual demonstra duas camadas distintas. Estas camadas são o resultado das diferentes condições climáticas, em que uma das camadas apresenta uma cor mais clara e é constituída por células largas e finas sendo formada durante a primavera e o verão, enquanto que a outra camada, mais escura, apresenta células estreitas e grossas ocorrendo a sua formação durante o outono e inverno.

O lenho é constituído por duas zonas distintas, borne e o cerne. O borne é responsável pela condução da seiva bruta e caracteriza-se por ser formado por células vivas e por apresentar uma cor clara, enquanto que o cerne apresenta uma cor mais escura, resultando de uma constituição exclusivamente realizada apenas por células mortas, e a sua principal função é o suporte mecânico da árvore. O cerne é também o resultado das alterações sucessivas a que o borne está sujeito, devido às impregnações consecutivas de lenhina, resinas, taninos e corantes[1]. A madeira designada comercialmente é extraída do lenho e pode apresentar uma composição diferente consoante o tipo de árvore de que é proveniente. Esta pode ser classificada em dois grandes grupos, madeira dura, "hardwood", e madeira macia, "softwood".

As árvores que produzem madeira dura pertencem a um subgrupo das angiospérmicas, as dicotiledó-

neas, que são caracterizadas por apresentarem folhas reticuladas. Algumas das espécies que a produzem e que foram estudadas neste trabalho foram o Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) e a Acácia (*Acácia xanthophloea*), Carvalho-português (*Quercus faginea*) e o Sobreiro (*Quercus Suber*). Tanto o Eucalipto como a Acácia são consideradas espécies invasoras e podem alcançar alturas superiores a 35 m, além de serem árvores de crescimento rápido. Enquanto o Carvalho e o Sobreiro caracterizam-se por serem de crescimento lento e são provenientes da Península Ibérica

A madeira macia é originária das árvores pertencentes ao grupo das plantas gimnospérmicas, sendo que também são amplamente conhecidas como coníferas, caracterizando-se por apresentar folhas aciculares. No âmbito deste estudo, a espécie pertencente às gimnospérmicas, que foi abrangida, foi o Pinheiro-Bravo (*Pinus pinaster Aiton.*). Tal como o Carvalho e o Sobreiro, esta espécie caracteriza-se por ser de crescimento lento e pode atingir 25 metros de altura, sendo também proveniente da Península Ibérica.

2.1.2. Teor de Humidade

O teor de humidade da madeira, u_w , é considerado como sendo o rácio entre a massa de água existente na quantidade de madeira analisada e a massa da madeira quando esta se encontra completamente seca. Este parâmetro é bastante utilizado na indústria madeireira, visto permitir inferir a densidade da madeira e conseqüentemente a sua resistência mecânica e a sua adequação para as diversas aplicações [2].

O teor de humidade não é constante entre as diferentes partes da árvore. As raízes da árvore apresentam-se como sendo as mais húmidas, enquanto que o tronco apresenta um maior teor de humidade face aos ramos. Verifica-se também que dentro do tronco o teor de humidade não apresenta uma distribuição homogénea. No caso de árvores coníferas, como é o caso do pinheiro, o borne apresenta uma maior percentagem de água do que o cerne, pois é nas células do borne que existe o transporte da seiva bruta. Já no caso das árvores, que produzem madeira dura, a seiva bruta é conduzida através de vasos, que a transportam desde a raiz até aos ramos, sendo que apresentam um maior teor de humidade no cerne.

2.1.3. Propriedades elétricas da madeira

A madeira, tal como qualquer outra matéria existente na Natureza, é caracterizada pelas suas propriedades elétricas nomeadamente a resistividade e a permitividade. A resistividade elétrica da madeira é uma função não linear que depende do teor de humidade da madeira, da frequência e da tensão aplicada [3].

Em experiências realizadas por [4], constatou-se que a resistência elétrica da madeira diminui com o aumento do teor de humidade da madeira. No entanto, a resistividade elétrica apresenta diferentes comportamentos consoante a gama de teor de humidade presente. No caso da madeira seca até a um teor de humidade de 7%, a resistividade diminui cerca de 5 vezes face ao aumento de 1% no teor [5]. Caso o teor de humidade da madeira se encontre entre os 7% e o ponto de saturação da fibra,

aproximadamente 30%, a diminuição já não é tão acentuada, sendo que a resistividade diminui para metade face ao aumento de 1% no teor [5]. No entanto, a relação entre a resistividade elétrica e o teor de humidade não é tão pronunciando no caso de madeira verde, ou seja, acima do ponto de saturação da fibra [4]. A relação entre a condutância elétrica e o teor de humidade no caso do Abeto Falso (*Picea Abis*) e do Abeto Negro (*Picea mariana*) é apresentado na Figura 2.1.

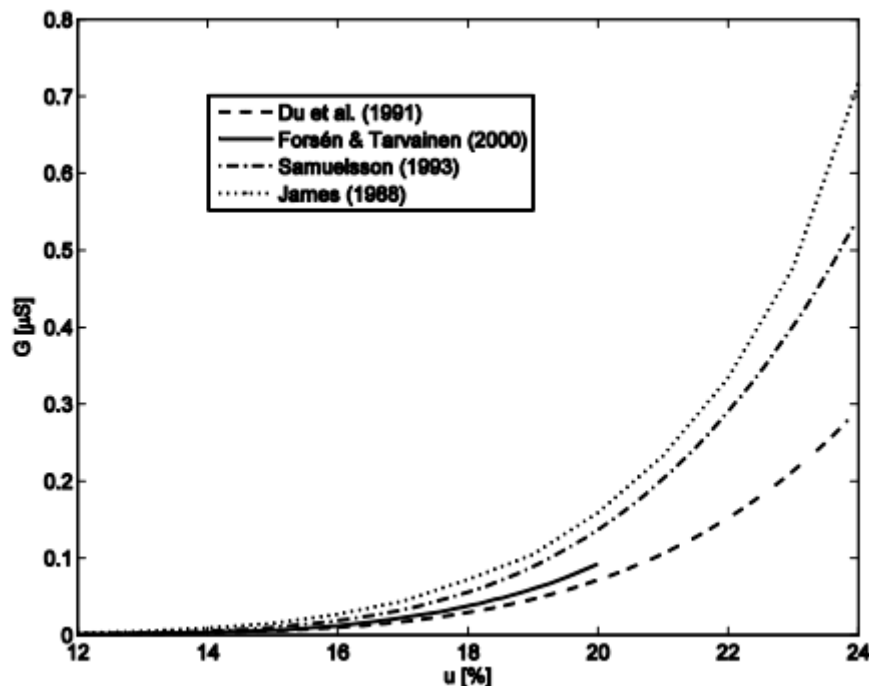


Figura 2.1- A relação entre a condutância elétrica e o teor de humidade no caso do Abeto Falso (*Picea Abis*), (Du et al.1991; Forsén & Tarvainen 2000; Samuelsson 19993) e do Abeto Negro (*Picea mariana*), (James 1968), retirado de [6]

Além do teor de humidade da madeira, a resistividade também depende tanto da estrutura como da composição das células constituintes da madeira, em especial a presença de lignina. Verificou-se que a condutividade elétrica, inverso da resistividade, da madeira aumenta com o aumento do teor de lignina na mesma [7] , sendo que esta molécula se encontra em maior número em madeiras do tipo “softwood” ao invés das “hardwood”.

Outra variável, que influência o comportamento da resistividade da madeira, é a temperatura. O aumento da temperatura provoca uma diminuição da resistividade elétrica [4].

2.2. Contacto entre linhas elétricas e árvores

O contacto entre as linhas elétricas e as árvores sempre foi um dos grandes problemas para as companhias elétricas, muito devido às interrupções provocadas pelos mesmos, sendo mesmo a principal causa de interrupções[8]. Com o intuito de reduzir o número de interrupções e de forma a prevenir o contacto entre os condutores e as árvores, as companhias elétricas reservam uma elevada percenta-

gem do seu orçamento para programas de manutenção e de limpeza de corredores e de faixas de gestão de combustível, como o desbaste de árvores que estejam inseridas nessa zona ou que ao cair possam entrar em contacto com os condutores[9]. No entanto, ou pelo desinvestimento das companhias elétricas nos programas de manutenção ou pelo aparecimento de espécies arbóreas em novas zonas acabam por continuar a existir conflitos.

O fenómeno elétrico provocado pelo contacto caracteriza-se, numa primeira instância, por uma corrente muito reduzida, devido à elevada resistência elétrica da árvore. Com a persistência do contacto, elementos bioquímicos constituintes da madeira como a celulose acabam por se carbonizar, devido ao efeito de joule, e conseqüentemente a resistência elétrica da árvore diminui [9]. Após se estabelecer um caminho carbonizado entre dois condutores ou entre o condutor e o neutro ou a terra, através da madeira, estão formadas todas as condições para a ocorrência de curtos-circuitos apresentando, estes sim, já correntes de intensidade bastante elevadas. Existe também a possibilidade de se notar a emissão de vapor de água por parte dos ramos das árvores, aquando da formação do caminho carbonizado, devido ao elevado teor de humidade presente na madeira, sendo que geralmente os tecidos vivos da madeira apresentam um teor de humidade acima do ponto de saturação.

Nas experiências realizadas por [10], [11] além destes eventos, verificou-se também o surgimento de pequenos arcos elétricos, a presença de estalidos, no momento de energização da linha, tornando-se sucessivamente de maior proporção e ainda queda de pequenos ramos, que tinham estado em contacto com o condutor, e que aparentavam queimaduras no tecido. Verificou-se também a ignição de três ramos que estavam em contacto com a linha, apresentando já flamas. Na Figura 2.2 apresenta-se o momento da formação completa do caminho carbonizado na experiência realizada em [11].



Figura 2.2- Formação do caminho carbonizado na experiência realizada em [11]

Além das interrupções que os contactos possam causar. Estes também poderão pôr em risco tanto a saúde humana, através da diferença de potencial entre o tronco e as pessoas, que possam entrar em

contacto com o mesmo, como poderão originar incêndios em dias de elevadas temperaturas e baixo teor de humidade, através da queda de ramos incandescentes ou através de arcos elétricos ou de fagulhas provenientes de ramos que possam cair no chão.

Os incêndios provocados pelos conflitos entre árvores e condutores sempre foram um flagelo, apesar de não serem eventos bastante frequentes, tanto para as comunidades como para as companhias elétricas não só devido ao perigo de vida inerente a estes eventos, como pelas danificações que poderão implicar para as propriedades privadas como para as instalações elétricas. Na Figura 2.3 apresenta-se o contacto entre um condutor e uma árvore que originou um incêndio na Austrália[12].



Figura 2.3- Contacto entre linhas aéreas e árvores que originou um Incêndio na Austrália, retirado de [12]

Estes incêndios acontecem, de forma geral, no Verão e no início do Outono, devido às condições climáticas serem as propícias para a deflagração do mesmo. É geralmente nestas estações, que as temperaturas são mais elevadas e o clima é mais seco, levando à existência de uma maior quantidade de combustível seco e a um menor teor de humidade das árvores, possibilitando uma mais fácil ignição dos ramos, aquando do contacto. Em muitas situações, a presença do vento também potencia o surgimento de contactos, tanto pelo balançar das linhas elétricas e dos ramos como pela possibilidade de os arrancar ou de os mesmos poderem tocar em 2 condutores [13], [14]. Além disso, a presença do vento torna acrescida a dificuldade de combate ao incêndio devido à variabilidade na direção, que o mesmo possa tomar, e pela progressão do mesmo [15], [16].

Alguns dos casos mais críticos que aconteceram, ocorreram em locais que apresentam um clima caracterizado por uma seca severa no Verão, tais como em algumas regiões da Austrália e na Califórnia. Em casos extremos como o caso de Outubro de 2018 na Califórnia, em que se verificou um elevado

risco de incendio além da presença de ventos fortes, levaram companhias elétricas como a Pacific Gas and Electric (PG&E) a interromperem o fornecimento de energia elétrica a milhares de consumidores, de modo a prevenir e evitar a ocorrência de incêndios e a danificação dos seus equipamentos [17]. Esta é uma das abordagens típicas dessas regiões, sendo bastante praticada nas regiões do Sul da Austrália, onde está mesmo prevista na legislação, garantido a impunidade às companhias, pelo não fornecimento de eletricidade aos consumidores por parte da companhia.

Em Portugal, tal como em vários países da União Europeia também existiram incêndios provocados pelo contacto entre condutores e árvores. No entanto, estes foram englobados como de origem elétrica no relatório disponibilizado pela Comissão Europeia, podendo estes também ser causados pela queda de condutores na vegetação ou pelo contacto das aves nos condutores.

Na Tabela 2.1 apresenta-se o número de incêndios originados por causas elétricas entre países da União Europeia, que contêm esses registos, e que estão presentes no Sistema de Informação Europeia de Incêndios Florestais (EFFIS) durante o período 1980-2010 [18]. É possível verificar que os países, que apresentam um maior nível de incidência de Incêndios originados por causas elétricas, são os países com climas mais secos e quentes, tais como os países mediterrânicos, e onde a percentagem de florestas privadas é mais elevada.

Tabela 2.1- Nº incêndios originados por causas elétricas entre membros da EU, dados de [18]

País	Nº Incidentes	Período
Bulgária	56	2005-2010
Chipre	25	2005-2010
França	239	1998-2009
Grécia	370	1983-2010
Itália	104	2002-2010
Lituânia	27	2004-2010
Polónia	80	2007-2010
Portugal	649	2001-2010
Roménia	11	2004-2010
Espanha	3835	1985-2010
Suíça	68	1980-2010
Turquia	417	2005-2010
Total	5881	

2.3. Rede elétrica de distribuição

As redes elétricas de distribuição têm como finalidade o transporte da energia elétrica desde as subestações pertencentes à rede elétrica de transporte ou de centros electroprodutores até às instalações consumidoras. Em Portugal, a rede de distribuição é constituída tanto por linhas aéreas como por cabos subterrâneos, com diferentes níveis de tensão desde a Alta tensão, AT, (60 kV), Média Tensão, MT, (30 kV, 15 kV e 10 kV) e Baixa Tensão, BT, (400 V).

Para a finalidade deste estudo só se irá dar ênfase às linhas elétricas pertencentes à MT, devido a apresentarem um maior risco de ignição de ramos aquando do contacto com os condutores das linhas elétricas comparativamente com as de BT e uma maior incidência nos contactos com as árvores relativamente às linhas aéreas de AT, por terem uma maior extensão, além da sua distância ao solo das linhas de MT ser menor. A extensão, em km, tanto das linhas aéreas como dos cabos subterrâneos, em Portugal, nos níveis de Tensão de AT e MT está presente na Figura 2.4.

	2017
SUBESTAÇÕES	
Nº de subestações	433
Potência instalada (MVA)	17689
Nº de transformadores	768
REDE (km)	82.846
Aéreas	67.781
AT (60/130kV)	8.999
MT (6/10/15/30kV)	58.782
Cabos Subterrâneos/Submersos	15.065
AT (60/130kV)	530
MT (6/10/15/30kV)	14.535

Figura 2.4- Caracterização da Rede de Distribuição 2017

2.3.1. Linhas Elétricas de Média Tensão

As linhas elétricas de MT são constituídas por condutores, isoladores e apoios, podendo também serem incluídos cabos de guarda. Os condutores são responsáveis pela condução da energia elétrica, os isoladores permitem que exista a ligação e sustentação dos condutores aos apoios, sem que haja a passagem de corrente elétrica do condutor para o apoio. Relativamente aos apoios, estes são responsáveis pelo suporte dos fios condutores. Os Apoios existentes na Média Tensão apresentam alturas que podem variar entre 14 a 26 metros [19]. Podendo os apoios apresentar diversas configurações, tendo em conta a disposição escolhida para os condutores. Na Figura 2.5 apresenta-se as silhuetas mais comuns dos apoios utilizados em MT.

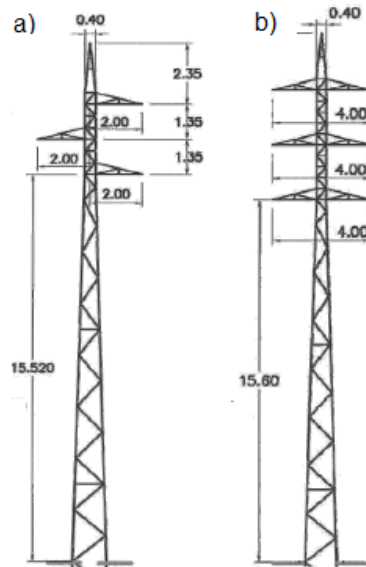


Figura 2.5- Silhueta de um apoio com disposição dos condutores em a) galhardete, b) esteira, adaptado de [19]

O traçado das linhas elétricas é regido pelo Regulamento de Segurança de Linha Elétrica de Alta Tensão, RSLEAT, com o propósito de garantir o pleno funcionamento das linhas sem que ponham em causa a saúde pública e com o mínimo impacto ambiental e social possível. Relativamente à proximidade entre condutores nus e árvores, o RSLEAT, estipula no art.º 28.º/1 uma distância mínima entre ambos, D , em metros e arredondado à centésima, na situação em que o condutor se encontra em flecha máxima podendo se verificar a presença ou não de vento [20].

$$D = 2 + 0.0075U \quad (2.1)$$

Onde U representa a tensão nominal da linha em kV.

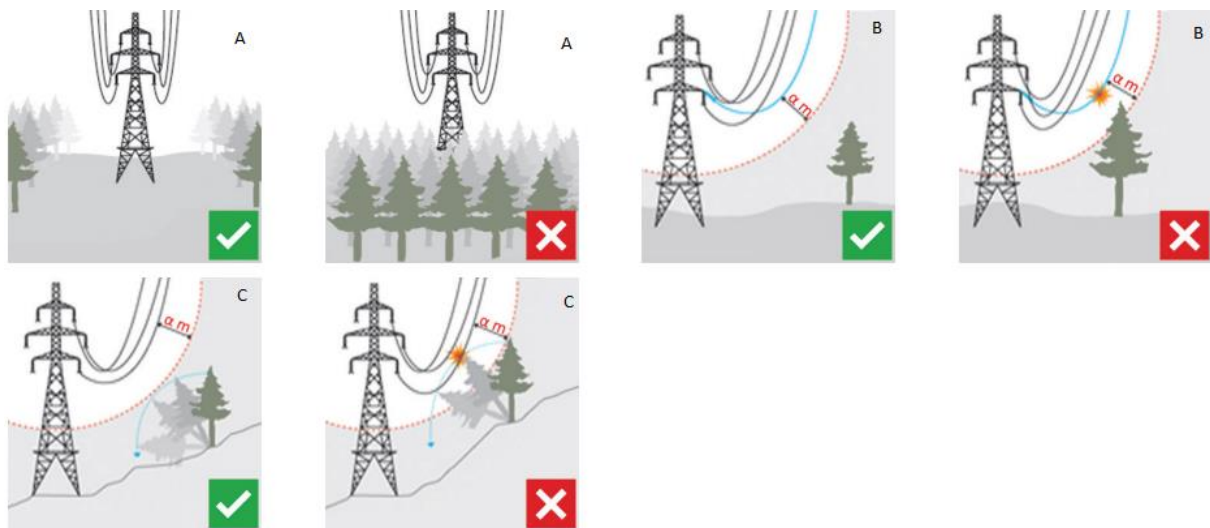


Figura 2.6- Situações de corte e decote de árvores, adaptado de [21]

Sendo que na situação, em que aplicando a equação (2.1), a distância D for inferior a 2.5 metros, a distância mínima entre o condutor e a árvore será de 2.5 m [20]. Ainda no mesmo artigo, no ponto 2 é ainda estipulado a existência de uma faixa de serviço, ao longo da linha, com uma largura de 5 metros,

dividida ao meio pelo eixo da linha, onde será feito o corte e decote de árvores para tornar possível a sua montagem e conservação, como se pode verificar pela Figura 2.6-A. Esta faixa pode ser ampliada, caso se verifique a possibilidade de infração da distância mínima, obtida pela equação (2.1), situação presente na Figura 2.6-B, ou no caso de árvores, que por queda, não mantenham uma distancia mínima face ao condutor em flecha máxima de 1,5 metros [20], Figura 2.6-C.

2.3.2. Regimes de Neutro

O Regime de Neutro desempenha um papel fundamental no comportamento da Rede Elétrica, aquando da ocorrência de um defeito à terra ou de isolamento. De facto, a escolha do regime de neutro a utilizar irá determinar os valores tanto das correntes de defeito como das tensões e sobretensões existentes, além das funções necessárias dos sistemas de proteção. Os Regimes de Neutro podem ser divididos em dois grupos, Regimes de Neutro de pequenas correntes de defeito e de grandes correntes de defeito.

Os Regimes de Neutro de pequenas correntes de defeito caracterizam-se por apresentarem correntes de defeito reduzidas. No entanto, em contrapartida, as tensões nas fases são relativamente à terra aproximam-se do valor correspondente da tensão composta, implicando sobretensões na ordem de 73% do nível de isolamento em condições normais, podendo originar o reacendimento de arcos elétricos [22]. Os Regimes de Neutro de pequenas correntes de defeito mais utilizados são o Neutro Isolado e o Neutro Ressonante.

Os Regimes de Neutro de grandes correntes de defeito distinguem-se dos anteriores por apresentarem valores de sobretensão menos exigentes ao nível de isolamento nas condições normais. Esta diminuição da sobretensão, contudo acarreta um aumento da corrente de defeito. Na categoria dos Regimes de Neutro de grandes correntes de defeito encontram-se o Neutro solidamente ligado à terra e o Neutro com Impedância Limitadora de correntes de defeito, este último, pode variar quanto ao seu carácter, caso apresente um carácter resistivo designa-se como Neutro com Resistência e no caso de apresentar um carácter reativo como Neutro com Reactância.

Em 2017, os regimes de Neutro existentes em Portugal, na rede MT[19] :

- Neutro solidamente ligado à Terra: 2 Subestações
- Neutro com impedância limitadora: 248 Subestações
- Neutro isolado: 4 Subestações

Na presença de um defeito fase-terra, a corrente de defeito \bar{I}_{def} pode ser determinada, recorrendo às componentes simétricas. Na Figura 2.7 apresenta-se o circuito correspondente a um defeito fase-terra, onde \bar{E}_a representa a tensão na fase A. \bar{U}_d , \bar{U}_i e \bar{U}_h simbolizam a tensão direta, inversa e homopolar das componentes simétricas, respetivamente. Analogamente, \bar{I}_d , \bar{I}_i , \bar{I}_h e \bar{Z}_d , \bar{Z}_i e \bar{Z}_h representam as correntes e as impedâncias das componentes simétricas. R_{def} representa a resistência de defeito.

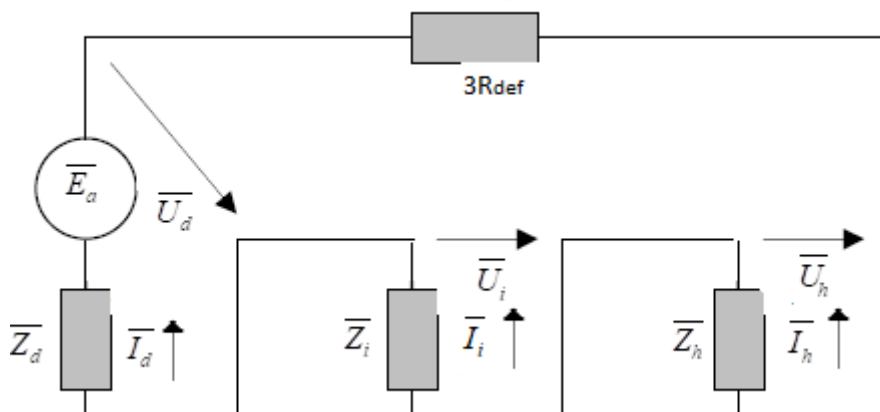


Figura 2.7- Circuito representativo da equação de defeito fase-terra com as componentes simétricas, adaptado de [22]

No caso do defeito fase-terra, a corrente de defeito apresenta uma relação com as correntes das componentes simétricas dada por:

$$\bar{I}_d = \bar{I}_i = \bar{I}_h = \frac{\bar{I}_{def}}{3} \quad (2.2)$$

Partindo da Figura 2.7, obtêm-se

$$\bar{E}_a = 3R_{def}\bar{I}_d + \bar{Z}_d\bar{I}_d + \bar{Z}_i\bar{I}_i + \bar{Z}_h\bar{I}_h \quad (2.3)$$

Substituindo na equação (2.3) a relação obtida na equação (2.2), a corrente de defeito será dada por

$$\bar{I}_{def} = \frac{\bar{E}_a}{R_{def} + \frac{\bar{Z}_d + \bar{Z}_i + \bar{Z}_h}{3}} \quad (2.4)$$

Uma aproximação recorrente é considerar que as máquinas girantes não se encontram próximas. Nesta situação, admite-se que $\bar{Z}_d \approx \bar{Z}_i$. Considera-se também que os defeitos ocorrem na proximidade das Subestações, pelo que se despreza as impedâncias longitudinais entre o transformador e o ponto de defeito. Deste modo as principais contribuições para a impedância direta e inversa serão a impedância do transformador e da rede a montante, sendo que na maioria das vezes é unicamente contabilizado a reactância. Assim, \bar{Z}_d e \bar{Z}_i são dados então por:

$$\bar{Z}_d \approx \bar{Z}_i = j(X_m + X_{Td}) = jX_T \quad (2.5)$$

A impedância homopolar \bar{Z}_h é constituída pela impedância do neutro instalado em série com impedância homopolar do transformador, além do paralelo das capacidades de todas as linhas juntamente com as capacidades introduzidas pelos Postos de Transformação, que são abastecidas pela Subestação[22]. Por uma questão prática é costume calcular-se primeiro a admitância homopolar, \bar{Y}_h , de modo a facilitar o cálculo do paralelo das capacidades. A admitância homopolar é então dada por

$$\bar{Y}_h = j\omega \sum C_{h,k} + \frac{1}{Z_0} = j\omega C + \frac{1}{Z_0} \quad (2.6)$$

em que C corresponde à capacidade total das linhas e Z_0 à impedância do neutro instalada em série

com a impedância do transformador homopolar, sendo dada por

$$\bar{Z}_0 = 3\bar{Z}_N + jX_{ht}, \quad (2.7)$$

Além do cálculo da \bar{I}_{def} existem outras variáveis que também são importantes para as parametrizações a serem definidas pelos Sistemas de Proteção, SP, entre as quais, as correntes residuais, tanto da linha sã, $I_{res_sã}$, como da de defeito, I_{res_def} , e a tensão residual, U_{res} . A corrente residual corresponde à corrente lida pelo transformador de corrente na linha a proteger.

- **Corrente Residual linha sã, $I_{res_sã}$:**

$$\bar{I}_{res_sã} = -\frac{jwC_{linha_sã}}{\bar{Y}_h} \bar{I}_{def}, \quad (2.8)$$

- **Corrente residual na linha defeituosa, I_{res_def} :**

$$\bar{I}_{res_def} = \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c = \left(1 - \frac{jwC_{linha_def}}{\bar{Y}_h}\right) \bar{I}_{def} \quad (2.9)$$

- **Tensão residual, U_{res} :**

$$\bar{U}_{res} = \bar{U}_a + \bar{U}_b + \bar{U}_c = -\bar{Z}_h \times \bar{I}_{def} \quad (2.10)$$

2.2.2.1 Neutro Isolado

A designação deste neutro provém da ausência de ligação entre o neutro e a terra. Contudo, nem sempre o neutro apresenta uma isolação galvânica à terra, podendo em algumas situações o neutro apresentar-se ligado à terra através de uma impedância de magnitude muito elevada. Em todo o caso, pode-se considerar a simplificação de $\frac{1}{\bar{Z}_0} = 0$, passando a equação (2.6) a ser reescrita através de

$$\bar{Y}_h = jwC. \quad (2.11)$$

Desta forma, a equação (2.4) pode-se também simplificar considerando que em condições normais $\frac{1}{C} > > 2X_T$, passando a ser dada por

$$\bar{I}_{def} = \frac{3\bar{E}_a}{3R_{def} - j\frac{1}{wC}} = \frac{j3wC\bar{E}_a}{1 + j3wCR_{def}}. \quad (2.12)$$

2.2.2.2 Neutro Ressonante

O Neutro Ressonante foi concebido de modo a aniquilar a corrente de defeito. Para tal e verificando-se que a corrente de defeito é o resultado das contribuições provenientes tanto das capacidades da rede a jusante como das correntes que percorrem o neutro, basta então que o valor de ambas as contribuições seja o mesmo, mas de sentido oposto. Assim e de forma a obter a impedância do neutro, ter-se-á $\bar{Y}_h = 0$ e substituindo a equação (2.7) em (2.6), a admitância homopolar será dada por

$$\bar{Y}_h = jwC + \frac{1}{\bar{Z}_0} = 0 \Leftrightarrow \bar{Z}_0 = \frac{-1}{jwC} \Leftrightarrow \bar{Z}_N = r_p + jx_p = j\left(\frac{1}{3wC} - \frac{X_{ht}}{3}\right). \quad (2.13)$$

No entanto, devido às não-idealidades dos materiais constituintes da impedância do neutro, nunca será possível obter uma impedância puramente reativa. Estas não idealidades estão presentes no fator de qualidade, Q , da bobina sendo dado por

$$Q = \frac{x_p}{r_p}. \quad (2.14)$$

Além das não-idealidades dos materiais não permitirem a extinção completa da corrente de defeito, tornou-se também preferível a dessintonização da bobine presente na impedância, de forma a diminuir os desequilíbrios das tensões resultantes das assimetrias da rede e evitando, assim, um maior esforço exigido aos isolamentos da rede[22]. Esta dessintonização introduz também uma componente reativa da corrente de defeito, que apesar de aumentar a intensidade da corrente continua a permitir a autoextinção de arcos elétricos. Neste caso, com a introdução tanto do fator de qualidade como da dessintonização da bobine a equação (2.6), passa a ser dada por

$$\bar{Y}_h = j\omega C \left(1 - \frac{1}{(1 + \delta)(1 - j\frac{1}{Q})} \right) \quad (2.15)$$

em que δ representa a variação inserida de modo a dessintonizar a bobina.

2.2.2.3 Neutro com Impedância Limitadora

O Neutro com Impedância Limitadora como referido anteriormente pode ser categorizado dependendo da natureza do equipamento instalado. No entanto, ambos os neutros, tanto o Neutro com Resistência como o com Reactância, devido às não idealidades dos materiais, que os constituem, ou ao facto de estarem acoplados a outros elementos da rede, não são puramente resistivos ou reativos, respectivamente.

Em Portugal, na maioria das Subestações da rede aérea MT o transformador apresenta o neutro acessível, devido à ligação do lado MT ser em Y, esta ligação está presente na Figura 2.8. A existência de um ponto neutro acessível permite a utilização de uma resistência limitadora, por ser um elemento mais simples e economicamente mais acessível que a reactância.

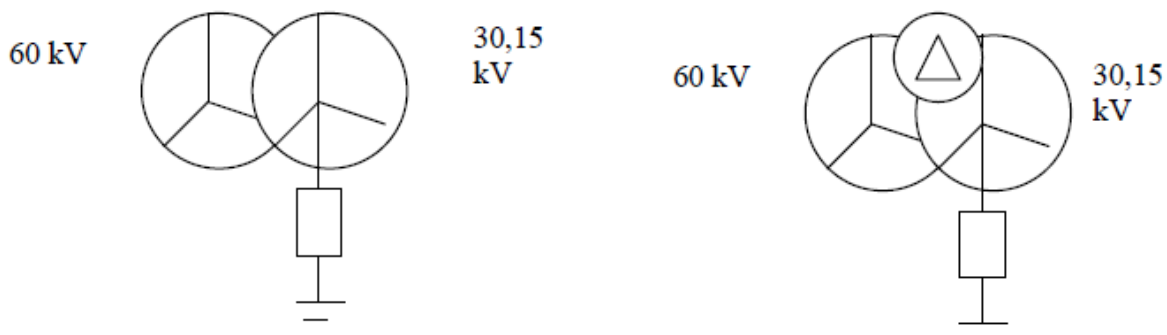


Figura 2.8- Ligação típica das redes aéreas de MT, retirado de [3]

Na eventualidade da Subestação não apresentar neutro acessível, em muitos casos, quando a ligação

do lado MT do transformador é efetuada em Δ , a escolha do neutro recai para a utilização da reactância, por ser do ponto visto económico uma alternativa mais viável, visto que nestes casos, é comumente usual a instalação de um neutro artificial, aproveitando assim a reactância desse mesmo neutro para funcionar como reactância limitadora [22]. Na Figura 2.9 é representado a ligação do neutro artificial.

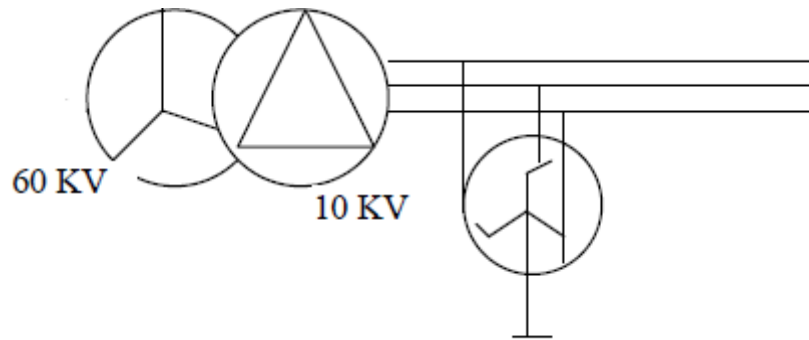


Figura 2.9- Representação da ligação do neutro artificial, retirado de [3]

No caso do regime de neutro com impedância limitadora este vem dado por:

$$\bar{Z}_0 = \bar{Z}_N + jX_{hT} = 3(R_N + jX_N) + jX_{hT} \quad (2.16)$$

É também bastante comum neste regime, desprezar as capacidades à terra distribuídas da rede, principalmente nas redes constituídas por linhas aéreas. Pelo que (2.6) pode ser reescrito como

$$\bar{Y}_h = \frac{1}{\bar{Z}_0} \quad (2.17)$$

Pode-se, muitas vezes, também desprezar \bar{Z}_d e \bar{Z}_i face à magnitude da impedância do neutro instalada. Assim, a equação (2.4) pode ser simplificada, passando a ser descrita através de

$$\bar{I}_{def} \approx \frac{3\bar{E}_a}{3R_{def} + \bar{Z}_0} \approx \frac{\bar{E}_a}{R_{def} + \bar{Z}_N}. \quad (2.18)$$

No caso de o defeito franco, $R_{def} = 0$, a corrente de defeito é apenas limitada pela impedância instalada do neutro, sendo essa a razão para a nomenclatura deste regime de neutro.

2.3.3. Proteções contra defeitos resistivos

Além dos regimes de neutros, outra componente essencial para os Sistemas de Proteção (SP) são as Unidades de Proteção (UP) e as funções nela presentes. Para o âmbito do estudo irá dar-se ênfase às funções mais utilizadas para os defeitos fase-terra.

As proteções consideradas baseiam-se tanto na coordenação amperimétrica, em que a intensidade da corrente é o elemento diferenciador, como na coordenação cronométrica, em que se define a atuação da proteção para a duração temporal em que a intensidade de corrente é superior ao valor parametrizado.

- **Proteção de Máximo de Corrente de Limiar Alto para defeitos Fase-Terra**

Esta função garante a seletividade através da coordenação Amperimétrica. A parametrização desta função é definida para os maiores valores de correntes de defeito, em que se necessita de extinguir o defeito no menor tempo possível, sendo por isso de disparo instantâneo. No caso dos defeitos fase-terra, esta função é destinada maioritariamente a curto-circuitos de características francas, devido a serem os que apresentam maiores intensidades de corrente. O tempo de operação nunca chega a ser instantâneo pelas limitações mecânicas, no entanto apresentam um tempo inferior a 3 ciclos de período [23]

Para a parametrização da corrente operacional de tempo definido e de forma a garantir a seletividade, utiliza-se a corrente residual da linha sã da saída a proteger, $I_{res,sa}$, por forma à proteção não actuar intempestivamente, aquando do defeito se encontrar noutra linha. A equação da corrente operacional, I_{op} , vem então dada por

$$I_{op} = k_{seg} I_{res,sa} \quad (2.19)$$

em que k_{seg} representa o factor segurança, que contempla os erros de medida provenientes dos transformadores de medida e das incertezas tanto dos comprimentos das linhas/cabos como das contribuições capacitivas delas para o cálculo das correntes residuais sãs. Usualmente, k_{seg} adquire um valor entre [1.3;1.4].

Na Figura 2.10 está presente a curva da função Máximo de Corrente de Limiar Alto para defeitos Fase-Terra.

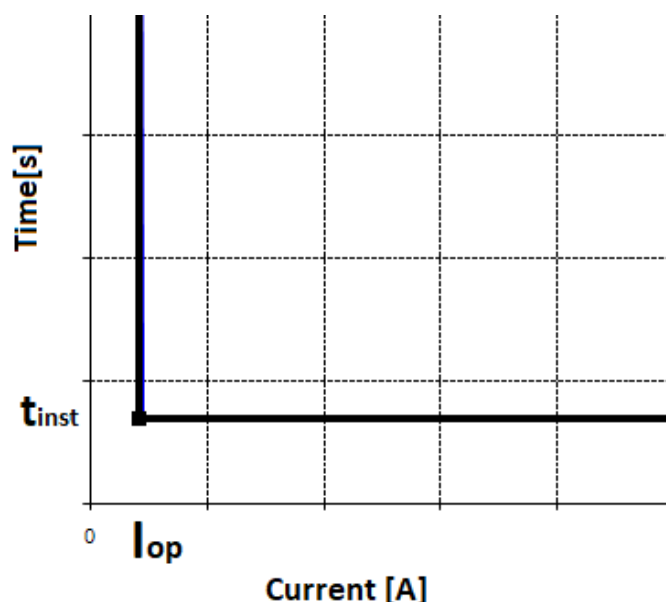


Figura 2.10- Curva de tempo instantâneo da função Máximo de Corrente de Limiar Alto para defeitos Fase-Terra

- **Máximo de Corrente de Limiar Baixo de Tempo Inverso para defeitos Fase-Terra**

Esta função prima pela sensibilidade, tendo por isso um maior tempo de atuação. A função

tempo inverso baseia-se na utilização de uma função de tempo inverso, em que define um tempo de atuação menor para uma maior intensidade de corrente.

No caso da parametrização da função de tempo inverso e como na quase totalidade dos regimes de neutro, se verifica que a corrente residual na linha em defeito é superior às correntes residuais nas linhas sãs, então a seletividade está desde logo garantida.

Uma das curvas mais utilizadas para a função de tempo inverso é a estipulada pela norma CEI 60255-3 e é dada por

$$t_{op}[s] = \frac{aT}{(I_{cc}/I_{>})^b - 1} \quad (2.20)$$

em que t_{op} corresponde ao tempo operacional da proteção, $I >$ corrente definida para a atuação do relé, I_{cc} a corrente residual na linha a proteger, sendo que terá de ser sempre superior a I_{cc} .

Os parâmetros a e b são constantes que definem o declive da função. Consoante os valores de a e b é possível escolher diferentes tipos de curvas. Na Tabela 2.2 apresenta-se as diferentes curvas classificadas pela CEI 60255-3 e disponibilizadas pela empresa fabricante EFACEC na UP, TPU L420[24].

Tabela 2.2- Classificação das funções de tempo inverso disponibilizadas pela TPU S420, para a norma CEI 60255-3

Classificação	a	a	A
Normal Inversa(NI)	0,14	0,02	16.86
Muito Inversa (VI)	13.5	1	29.7
Extremamente Inversa (EI)	80	2	80

Na Figura 2.11 apresenta-se os diferentes tipos de curvas de tempo inverso desta norma.

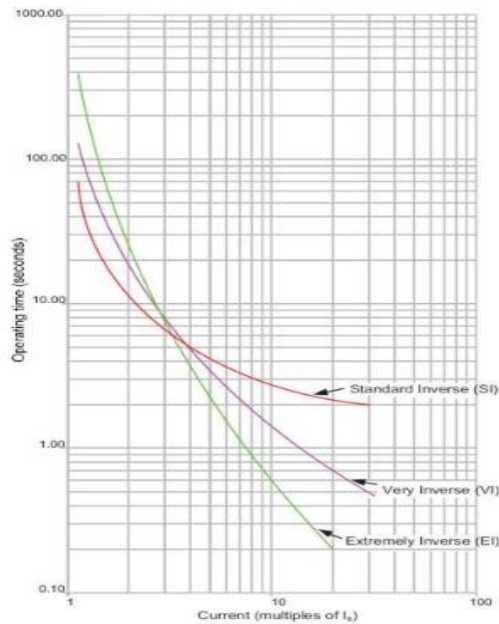


Figura 2.11- Exemplo de diferentes tipos de curva de tempo inverso da norma CEI60255-3

- **Proteção Direcional de Terra (MIHD)**

Esta função permite ter uma elevada seletividade, devido ao uso tanto das correntes e tensões homopolares ou residuais, sendo estas três vezes superiores às primeiras, como do ângulo entre essas duas grandezas, permitindo assim distinguir a linha em defeito duma linha sã.

A distinção é feita através do cálculo da potência aparente homopolar ou residual, em que se verifica que no caso das linhas sãs, estas, apresentam uma característica angular independente do regime de neutro instalado e resultante das contribuições capacitivas das linhas a jusante. No entanto, para o caso das linhas em defeito, o comportamento da potência aparente é bastante dependente do regime de neutro, verificando-se que somente com um regime de neutro puramente indutivo, o ângulo característico é idêntico ao do das linhas sãs[25].

Esta função caracteriza-se por apresentar duas zonas distintas, uma em que inibe a atuação da proteção, zona de não-operação (zona a sombreado na Figura 2.12) e outra onde se identifica inequivocamente a presença de um defeito na linha, zona de operação. Estas zonas são definidas através de três parâmetros e têm em conta o regime de neutro utilizado:

1. Tensão homopolar mínima, U_{hmin} ;
2. Corrente residual operacional, I_{op} ;
3. Ângulo da característica operacional, α ;

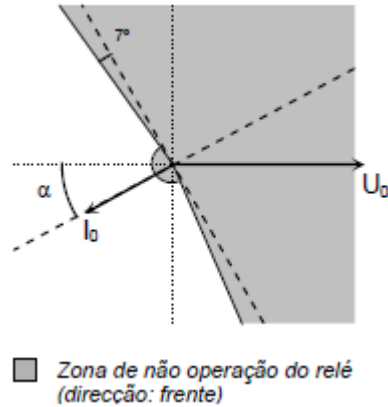


Figura 2.12- Característica operacional da função de Máximo de Corrente Homopolar Direcional, retirado de [24]

É bastante usual a combinação das funções de tempo inverso e de tempo definido, de modo a poder cobrir uma maior gama de defeitos fase-terra sem não perder a sensibilidade nem a seletividade. Desta forma, é normalmente usado numa primeira instância a curva de tempo inverso, permitindo assim atuar de forma seletiva para correntes de defeito reduzidas. Numa segunda fase, utiliza-se a função MIHD de tempo definido, garantido a atuação da proteção na linha em defeito e permitindo assim uma atuação mais rápida protegendo os elementos de rede, que poderiam ficar danificados caso fossem apenas protegidos pela curva de tempo inverso. Numa última fase, em que as correntes de defeito são bastante elevadas utiliza-se a função de tempo instantâneo. Na Figura 2.13 apresenta-se a caracterização da combinação das funções a proteger.

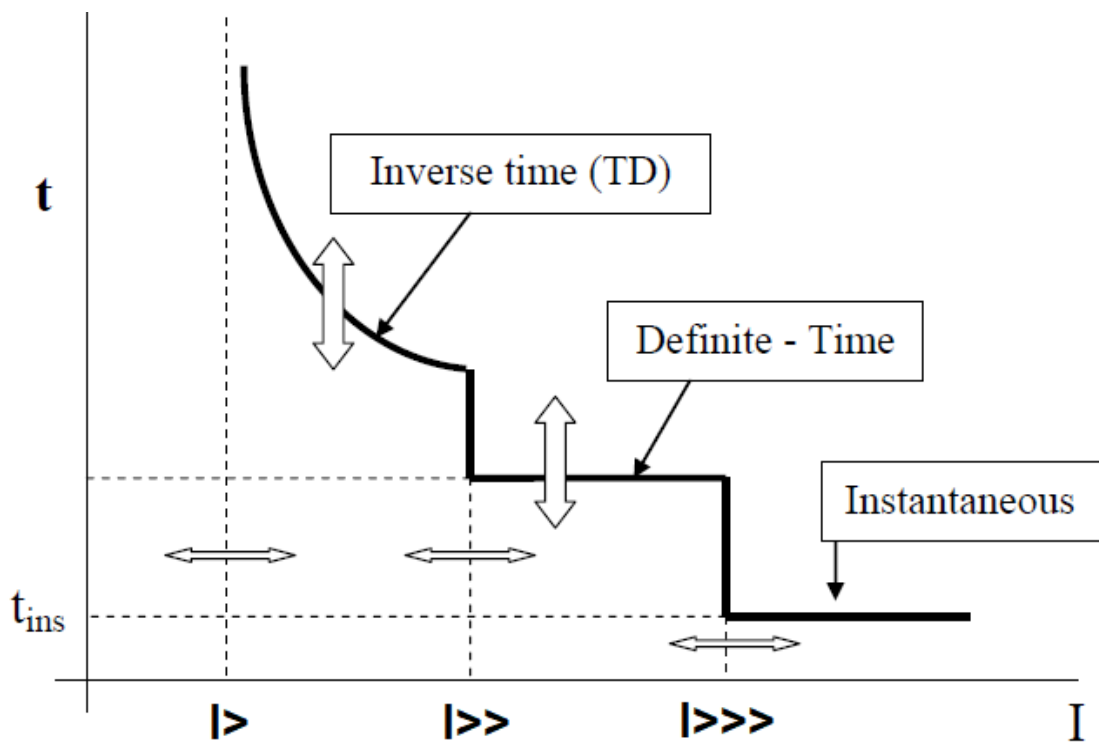


Figura 2.13- Caracterização e coordenação temporal das funções homopolares da UP

2.3.4. Transformador de Intensidade, TI

De forma à Unidade de Proteção atuar devidamente e tendo em conta as correntes elevadas que possam existir aquando de um defeito, torna-se necessário a obtenção de uma imagem da corrente da linha (tanto em amplitude como em fase). Para tal, utilizam-se os Transformadores de Intensidade em série com a rede, permitindo a obtenção de correntes reduzidas no secundário, sendo proporcionais às do primário, podendo deste modo ser utilizadas pela Unidade de Proteção, sem a exigência de níveis de isolamento superiores.

No caso dos defeitos resistivos e para os níveis de Tensão de MT é usual a utilização de transformadores de corrente do tipo toroidais. Estes transformadores diferem de os restantes devido à sua medição ser respeitante à corrente homopolar residual e não à corrente em cada fase. Deste modo e visto as correntes residuais serem reduzidas, a classe do TI toroidal poderá ser de medida ao contrário dos de fase, aumentando assim a sensibilidade. Na Figura 2.14, apresenta-se a representação de um transformador toroidal.

De modo a medir a corrente homopolar residual, o toro abraça as 3 fases, que estão em cabo, sendo que a corrente resultante da soma das três fases irá produzir um fluxo magnético correspondente no secundário. No caso de um sistema equilibrado, a corrente derivada do fluxo magnético será 0. No entanto, para além dos erros característicos dos TI's devido à corrente de magnetização, os TI's toroidais também estão dependentes da sua montagem ou da não uniformidade da janela do toro[26]. Um dos erros que é costume acontecer é a não centralização do condutor ao atravessar o toro, aquando da montagem, introduzindo-o nas proximidades da parede do toro.



Figura 2.14- Transformador de Intensidade Toroidal, retirado de [27]

Num estudo realizado em [28], calcularam-se os piores cenários de erros admitidos para transformadores de Intensidade do tipo toroidal impostas pelas normas IEEE e IEC, para correntes inferiores às correntes nominais.

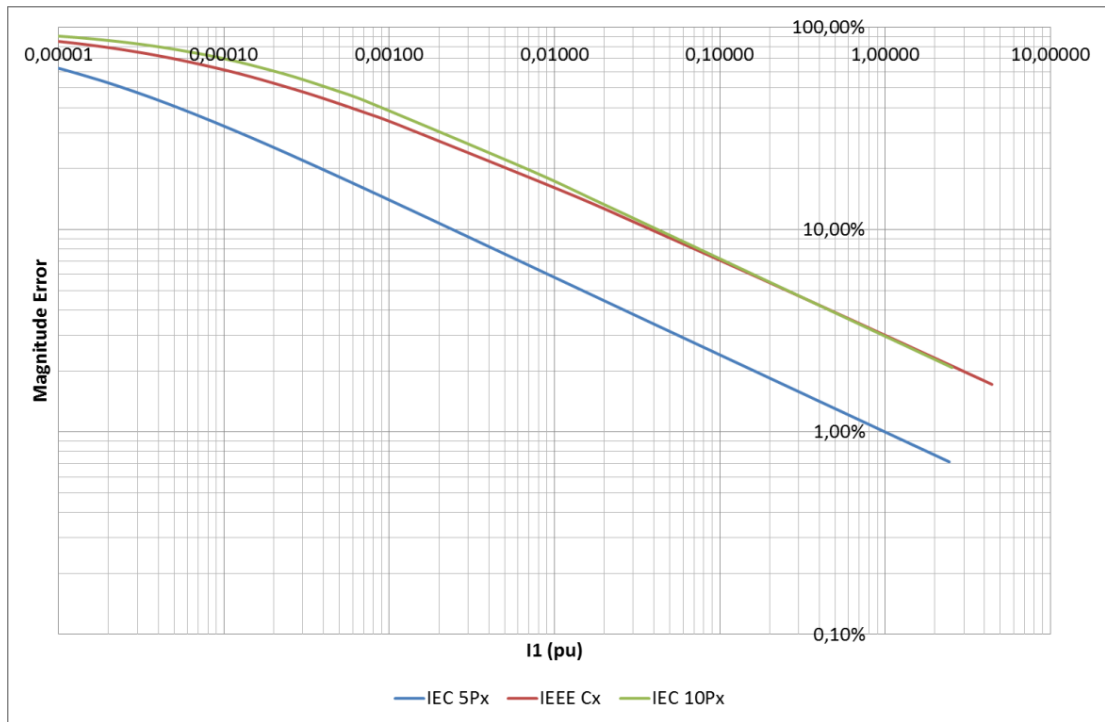


Figura 2.15- Pior cenário para erros de Tis admitidos pelas normas IEEE e IEC para correntes inferiores a I_n , retirado de [28]

3. Caracterização de Portugal

3.1. Caracterização da Floresta Portuguesa

Aproximadamente dois terços do território Português são ocupados por espaços florestais, em que 35,4% do mesmo é constituído por floresta e 32% por matos e pastagens [29], sendo por isso natural a ocorrência de conflitos entre as linhas aéreas de MT e espécies arborizadas.

O Instituto da Conservação da Natureza e da Floresta (ICNF) designa como floresta tanto os povoa-mentos florestais, áreas ocupadas por árvores florestais com uma percentagem de coberto superior a 5%, como superfícies temporariamente desarborizadas (superfícies ardidadas, cortadas e em regenera-ção), que irão rapidamente recuperar o seu coberto arbóreo. Relativamente ao mato e pastagens este é categorizado pelo ICNF como sendo extensões de terreno com áreas superiores ou iguais a 5000 m^2 constituídas por espécies lenhosas de porte arbustivo.

De acordo com a última edição do Inventário Florestal Nacional, IFN6, realizado em 2010 e produzido pelo ICNF, verificou-se um decréscimo da área de floresta de 4.61% ao longo do período de 1995-2010, como se pode observar no gráfico referente à evolução da área florestal nas diferentes regiões do país, presente na Figura 3.1.

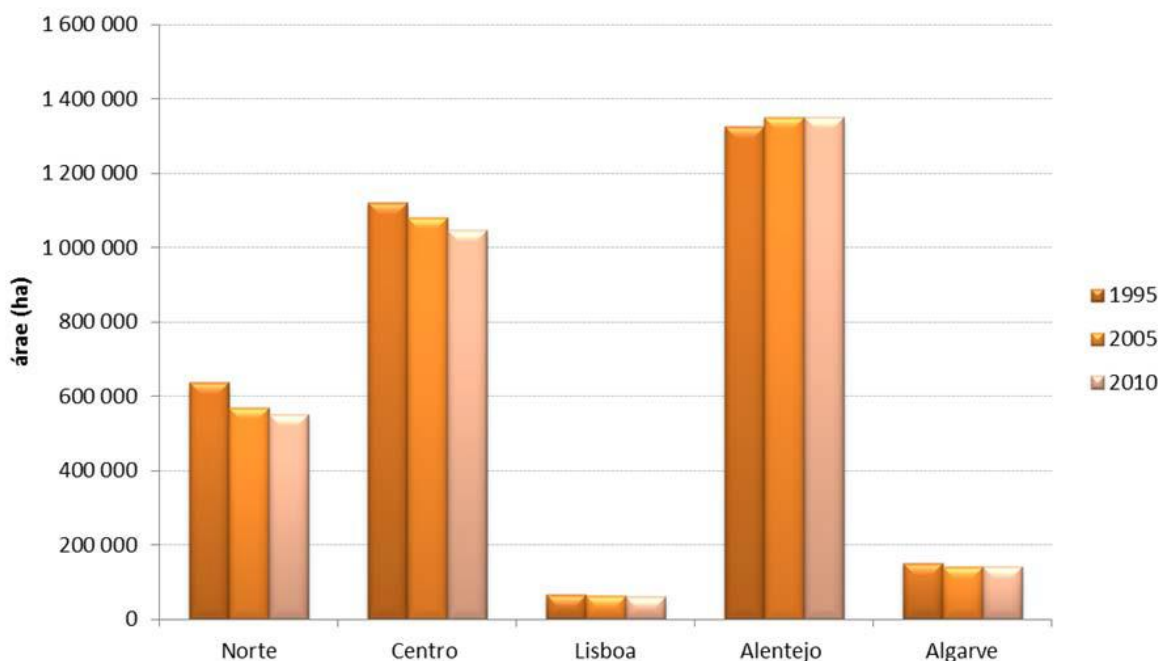


Figura 3.1- Distribuição ao longo dos IFN realizados da Floresta Portuguesa em Portugal Continental, retirado de [29]

Esse decréscimo deveu-se em grande parte aos incêndios, que deflagraram durante esse período, transformando as áreas florestais em áreas consideradas de mato. No entanto, essa diminuição da área florestal é pouco acentuada face ao elevado número de área ardidada, o que demonstra a resiliência

e a sua capacidade de regenerar da floresta portuguesa. Outro fator, importante para a atenuação do impacto dos incêndios é o papel ativo, que os proprietários florestais desempenharam ao investir em ações de arborização e re-arborização. De facto, a floresta portuguesa apresenta a particularidade de ser constituída maioritariamente por proprietários privados, cerca de 97% em 2011 [30]. Esta particularidade é bastante problemática para as concessionárias das redes elétricas, pois muitos proprietários não respeitam a legislação existente, nomeadamente pelo Decreto Regulamentar nº 1/92 de 1992 [31], ou por tentarem capitalizar ao máximo a área pertencente aos seus terrenos, como por exemplo plantando espécies arbóreas nas zonas inseridas nas Faixas de Proteção, ou devido ao abandono dos mesmos, dificultando assim as práticas da gestão de vegetação executada pela concessionária.

A floresta portuguesa pode ser dividida em duas grandes classes: resinosa e folhosa. As resinosa ocupam 31% da área correspondente à floresta sendo que a restante é ocupada pelas folhosas. O Eucalipto apresenta-se como sendo a espécie dominante sobre a área de superfície florestal, ocupando aproximadamente 812 mil hectares (ha), seguido do sobreiro, que ocupa 737 mil ha, e do Pinheiro bravo, que representa aproximadamente 714 mil há [29]. É referido também no 6º IFN, que comparativamente ao 5º IFN, a maior presença de eucaliptos se deve à substituição de terrenos anteriormente ocupados por Pinheiros bravos pelas plantações dos mesmos.

Além das áreas consideradas como floresta, existem terrenos que não se categorizando como floresta apresentam uma presença considerável de árvores florestais, com uma percentagem de coberto na ordem de 5 a 10%. Estas áreas correspondem normalmente a terrenos que foram abandonados pelos proprietários, pelo que são também constituídos por mato. Na Figura 3.2 está representado as principais árvores constituintes destes terrenos ao longo dos IFN's levantados.

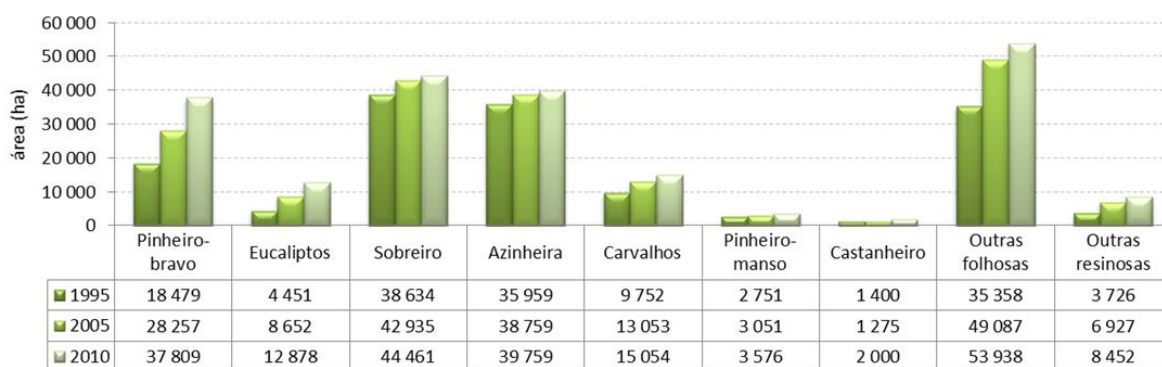


Figura 3.2- Variação da composição de terrenos com uma percentagem de coberto inferior a 10 % nos IFN's mais recentes, retirado de [29]

3.1.1. Distribuição das espécies por Região em Portugal

Apesar da composição da Floresta Portuguesa apresentar a nível nacional uma representação dominada por três espécies. Esta já não se verifica a nível regional, onde a ocupação das espécies varia consoante o clima, o tipo de terreno e a capacidade económica da região em questão. Esta diversidade regional torna-se importante para o âmbito deste estudo, devido às gamas de valores das resistências

elétricas de árvores serem diferentes de espécie para espécie e consequentemente as suas correntes de defeito também o são, impondo a necessidade de parametrizar as proteções consoante a biodiversidade existente nessa região.

De forma a dividir o território português para as divisões regionais utilizou-se a Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUTS), neste caso através da terceira categoria, NUTS III. No entanto, certas regiões categorizadas pelas NUTS III foram englobadas em “super-regiões”, devido à partilha de áreas florestais. Os levantamentos florestais foram retirados dos mais recentes Planos Regionais de Ordenamento Florestal (PROF) disponibilizados pelo ICNF [32], [33], [42]–[51], [34], [52]–[54], [35]–[41]. A divisão do território português dividido por NUTS III e a correspondência com as regiões consideradas para os PROF's está presente na Figura 3.3.

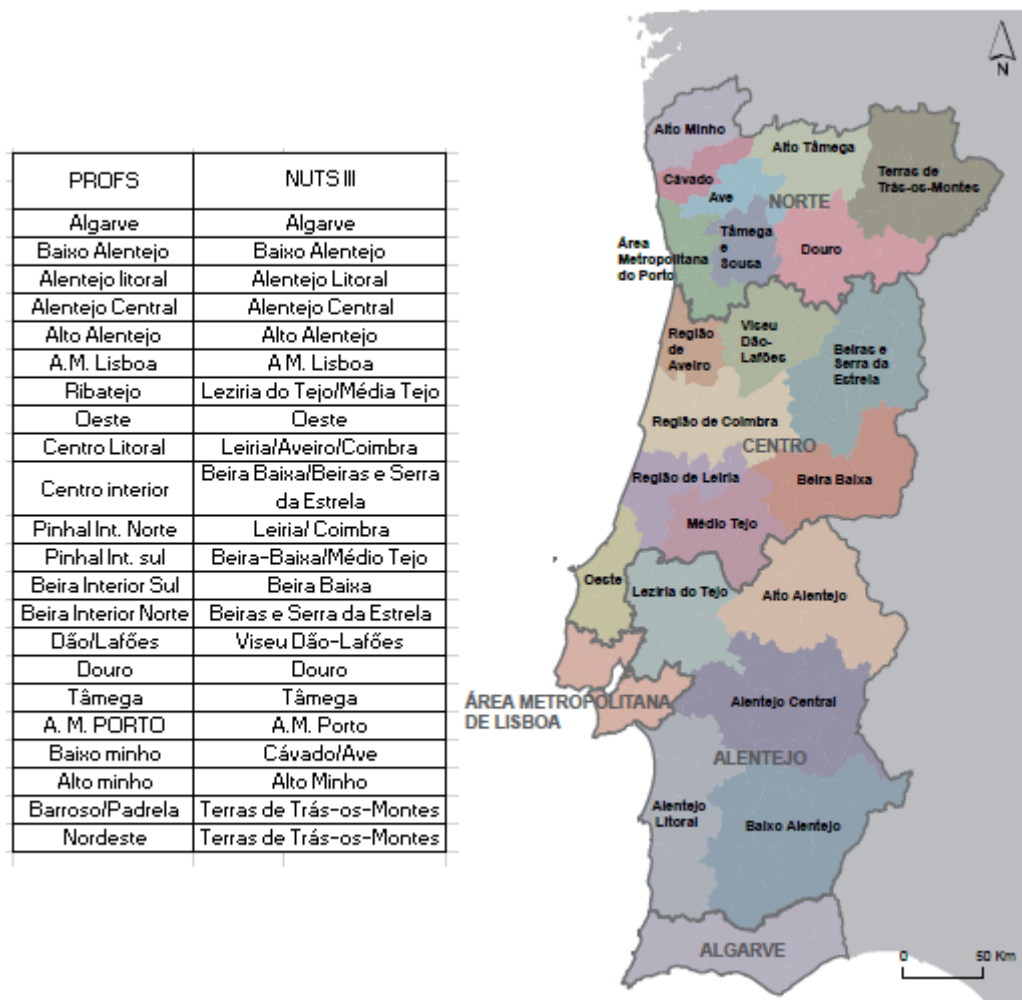


Figura 3.3- Caracterização de Portugal através das NUTS III

Na Tabela 3.1 apresenta-se a área respeitante às espécies arbóreas consideradas neste estudo, em cada região de Portugal. O Pinheiro-Bravo, apesar de ter uma presença significativa em todo o território, apresenta uma maior relevância na Zona Centro, sendo esta a zona com maior área florestal do país, em contrapartida, verifica-se uma presença diminuta na Zona Sul do país. Analogamente, também se verifica a presença do Eucalipto em todas as regiões do país, assinalando-se uma presença superior a 15% da área total das regiões NUT III localizadas na zona Centro do país. Ao invés, na Zona Interior

Norte do país a sua presença é apenas residual, sendo inferior a 5%[55]. Face ao sobreiro, constata-se que apresenta uma distribuição assimétrica, apresentado um domínio claro na Zona Sul do país em que se destacam as regiões do Alentejo Litoral, Alto Alentejo e Ribatejo apresentando uma área superior a 20% da área total da região correspondente. Já na Zona Norte a sua presença é bastante diminuta, sendo sempre inferior a 5%. Em relação, à Acácia pode-se observar que a sua distribuição é pouco representativa em todas as regiões, excetuando no Centro litoral, onde se verifica um maior povoamento deste género. No caso do Carvalho, está presente de uma forma remanescente em todas as regiões, apresentado uma maior percentagem de ocupação florestal no Norte de Portugal, contudo nunca ultrapassando os 5%.

Tabela 3.1- Distribuição regional das espécies consideradas

Id	Zonas/Regiões	Espécies - Área Ocupada					Total floresta (ha)
		Pinheiro-bravo(ha)	Eucalipto(ha)	Acácia(ha)	Sobreiro (ha)	Carvalhos (ha)	
1	Algarve	6670,7	25355,8	423,5	23432,5	0,0	92478,9
2	Baixo Alentejo	760,0	13659,0	0,0	47632,0	0,0	232733,0
3	Alentejo litoral	26543,5	47247,5	0,0	131655,8	0,0	276086,6
4	Alentejo Central	2168,3	24574,4	0,0	112030,1	0,0	366431,4
5	Alto Alentejo	11871,2	43111,2	0,0	129958,3	0,0	316433,6
6	A.M. Lisboa	23026,0	13630,5	0,0	23409,7	2047,9	73688,0
7	Ribatejo	54434,0	100634,0	0,0	118306,0	6784,0	306777,0
8	Oeste	25187,7	26401,1	0,0	830,2	909,2	57056,0
9	Centro Litoral	324100,0	254450,0	2750,0	150,0	6225,0	638450,0
10	Centro interior	91625,0	52675,0	1000,0	24075,0	7900,0	227825,0
11	Pinhal Int. Norte	69669,0	45916,0	0,0	136,0	7123,0	133030,0
12	Pinhal Int. sul	97463,0	16291,0	0,0	0,0	201,0	162822,0
13	Beira Interior Sul	49975,0	51538,0	0,0	25599,0	2586,0	160534,0
14	Beira Interior Norte	85765,0	7357,0	0,0	2120,0	30795,0	135957,0
15	Dão/Lafões	100895,0	32440,0	0,0	0,0	10286,0	148247,0
16	Douro	46617,0	1827,0	0,0	7239,0	10423,0	161789,0
17	Tâmega	38588,0	35093,0	0,0	0,0	0,0	108128,0
18	A. M. PORTO	47029,0	28087,0	0,0	0,0	0,0	75750,0
19	Baixo Minho	48960,0	25884,0	0,0	0,0	6273,0	92460,0
20	Alto Minho	40111,0	4077,0	0,0	0,0	0,0	49138,0
21	Barroso/Padrela	51363,0	553,0	0,0	572,0	15801,0	84224,0
22	Nordeste	29188,0	3265,0	0,0	26857,0	31920,0	240171,0

3.2. Condições climáticas e meteorológicas em Portugal

A possibilidade de ocorrência e desenvolvimento de incêndios e também a sua progressão estão diretamente relacionados com as condições climáticas, que se revelam no estado da atmosfera e do ambiente, e com as condições meteorológicas [56]. Torna-se, por isso, importante determinar em que condições existirá uma maior suscetibilidade de ocorrência de incêndios, de forma a poder tomar medidas especiais para evitar o contacto entre condutores e árvores, durante esse período.

3.2.1. Condições Climáticas

A classificação de Koppen é o principal sistema de classificação dos diferentes tipos de clima e baseia-se nas temperaturas médias de cada região, adicionalmente os diferentes tipos de climas são ainda subclassificados consoante o nível de precipitação nessa região. Segundo esta classificação, o clima em Portugal pode-se dividir em duas regiões diferentes: uma de clima temperado com Inverno chuvoso e Verão seco e quente (Csa) e outra de clima temperado com Inverno chuvoso e Verão seco e pouco quente (Csb) [57], as diferentes regiões estão presentes na Figura 3.4.

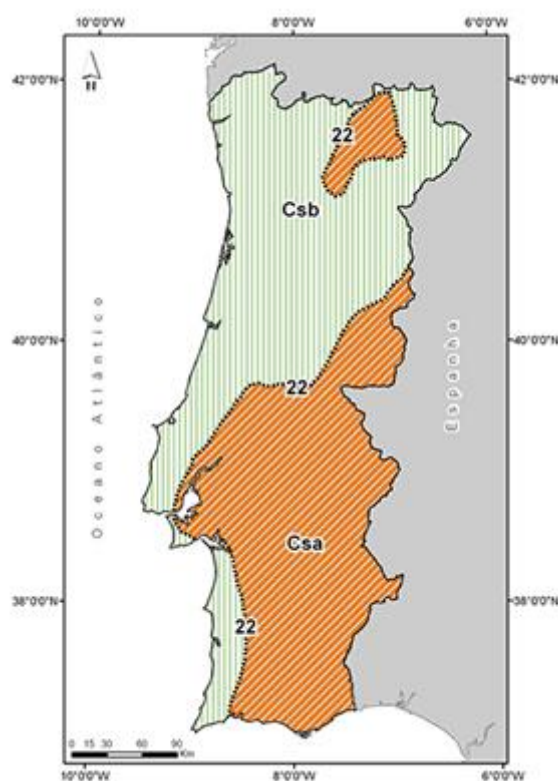


Figura 3.4- Classificação Climática De Koppen em Portugal, retirado de [57]

No entanto, com as sucessivas alterações climáticas o clima em Portugal está a transformar-se num

clima cada vez mais seco. Muito dos modelos existentes de previsão de alterações climáticas indicam os seguintes cenários climáticos para Portugal Continental [58]:

- Aumento significativo da temperatura média em Portugal;
- Aumento da temperatura média de Verão, entre 3°C na zona costeira e 7°C no interior;
- Maior intensidade e frequência de ondas de calor;
- Redução do nível de precipitação, principalmente na Primavera, Verão e Outono;
- Aumento do número de dias quentes (máxima superior a 35°C) e de noites tropicais (mínimas superiores a 20°C);
- Diminuição dos índices de tempo frio.

Estas previsões são corroboradas pelas tendências verificadas nos últimos anos. Alguns indicadores que espelham essas tendências como também a elevada possibilidade de ocorrência de um incêndio são a temperatura média do ar e o nível de secura do País. O nível de secura durante o ano pode ser extrapolado através da precipitação existente ao longo desse mesmo ano.

Na Figura 3.5 apresenta-se a variação da temperatura média no Verão (julho, junho e agosto) registados pelo IPMA entre 1931 e 2017 comparativamente com o valor médio da normal de 1971-2000. Pela análise da Figura 3.5, pode-se constatar que, entre 1931 e 2017, 6 dos 10 verões mais quentes são registados a partir do ano 2000 [57].

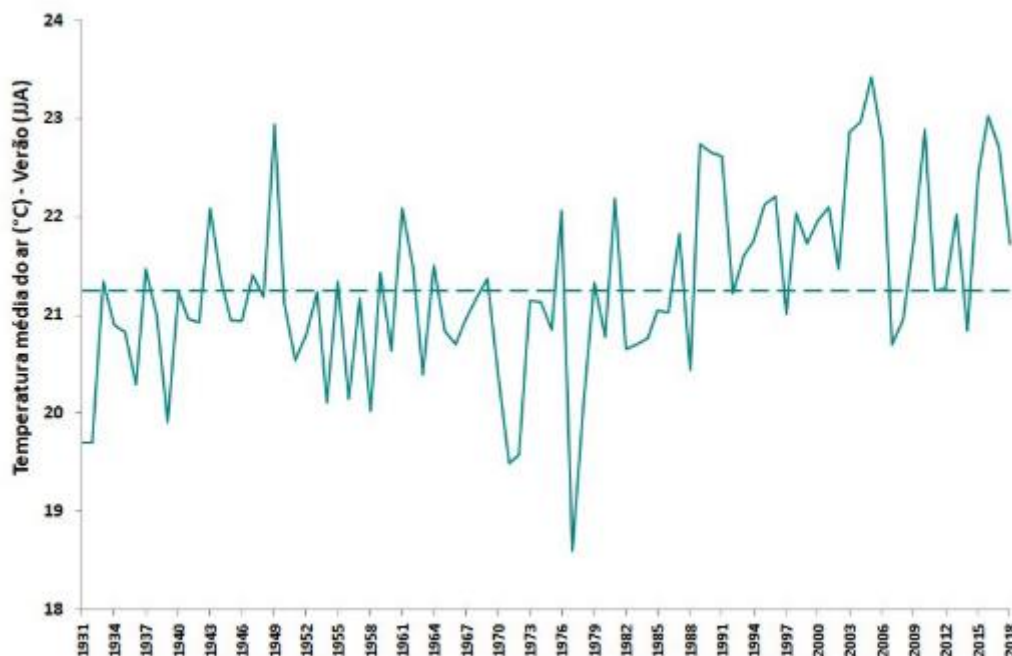


Figura 3.5- Variabilidade da temperatura durante o Verão comparativamente com a média do período de 1971-2000, retirado de [59]

A distribuição temporal das anomalias da quantidade de precipitação registadas ao longo do verão, desde 1931 até 2017, encontra-se representada na Figura 3.6.

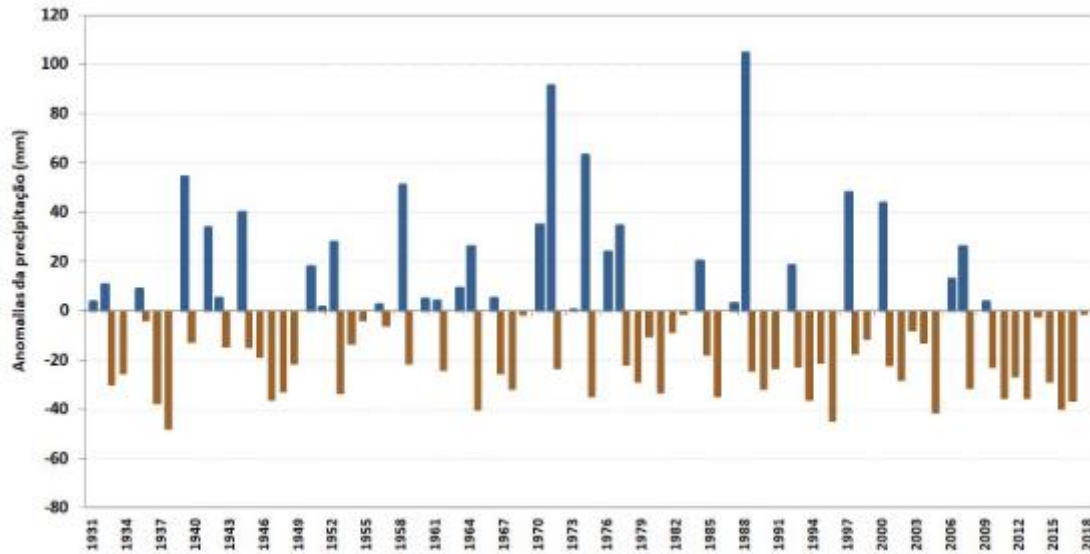


Figura 3.6- Anomalias do total de precipitação no Verão em Portugal Continental, comparativamente com a média do período de 1971-2000, retirado de [59]

Verifica-se que, durante os últimos 20 anos, somente 4 verões apresentam valores de precipitação acima do valor considerado como referência, sendo esse o valor normal de 1971-2000.

3.3. Índice de Perigo

Com a elevada incidência de incêndios em Portugal tornou-se necessário a implementação de sistemas que indicassem o estado de alerta e a vulnerabilidade, que determinada região poderá apresentar face aos incêndios. Em Portugal é costume utilizar a conjugação de vários índices de modo a inferir o risco de ocorrência de incêndio, em particular, utiliza-se o índice meteorológico de risco de incêndio usado pelo Sistema Canadano, Fire Index Weather (FWI).

O índice FWI é constituído por sub-índices baseados nos valores dos elementos meteorológicos (temperatura do ar, a humidade relativa do ar, precipitação acumulada (durante as últimas 24h), velocidade e direção do vento) e dos possíveis estados do solo. Caracteriza-se também por ser um índice cumulativo, como tal o seu valor depende não só das condições observadas nesse dia como da sua evolução desde a data inicial de começo do cálculo do índice [60]. Sendo que o seu valor final é depois convertido consoante a gama de valores a que pertence, a uma de cinco classes de risco: Reduzido, Moderado, Elevado, Muito Elevado, Máximo.

Os sub-índices constituintes do FWI são:

- FMC (Índice de Humidade dos Combustíveis finos) - revela o teor de humidade existente nos combustíveis finos (0.25 kg/m^2) mortos na camada superficial, até 2 cm de profundidade do solo;
- ISI (Índice de Propagação Inicial) – representa a velocidade inicial de progressão do fogo e depende do índice FMC e da velocidade do vento;

- BUI (Índice de Combustão Inicial) - carga de combustível disponível durante o incêndio;
- DC (Índice de Húmus) – revela o teor de humidade do húmus e de materiais lenhosos de tamanhos consideráveis, que se encontrem até a uma profundidade de 8 cm do solo;
- DMC (Índice de Seca) – representa o teor de humidade de combustíveis florestais compactos, mas soltos, existentes em profundidades moderadas, entre a 8 a 20 cm;

Outro índice comumente utilizado é o Risco Conjuntural Meteorológico (RCM), que se baseia no índice FWI em complementaridade com o risco conjuntural, que contempla a quantidade atual de área ardida numa determinada região. O RCM categoriza o risco de incêndio numa determinada região em 5 classes. Na Figura 3.7 está presente um gráfico referente à média do RCM durante o mês de agosto entre 2006 e 2018. Pode-se verificar que no computo geral a média deste índice é superior à classe de risco 3.

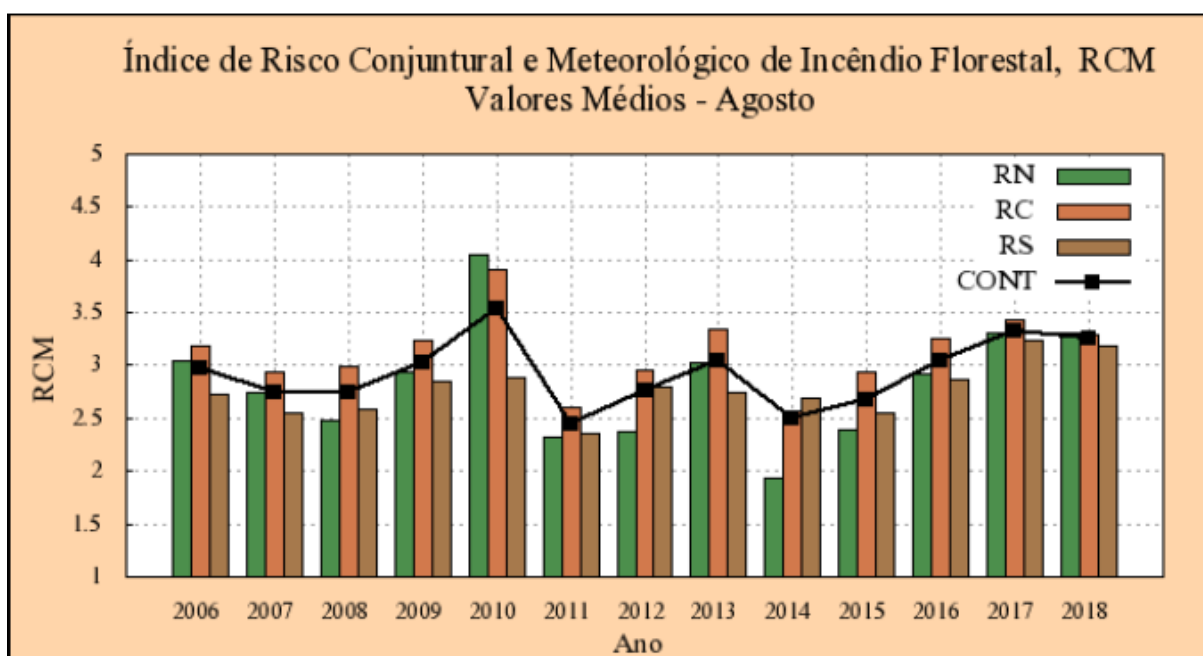


Figura 3.7- Média do índice de Risco Conjuntural Meteorológico durante o mês de Agosto entre 2006 e 2018, retirado de [61]

4. Metodologia

4.1. Medições experimentais

No contexto de caracterizar as magnitudes das correntes de defeito provenientes do contacto entre o condutor e as árvores e a possibilidade de esse mesmo contacto provocar a ignição da árvore, levando porventura à ocorrência de incêndios decidiu-se realizar um levantamento das resistências elétricas das mesmas em Portugal.

Para o levantamento de dados, optou-se por se incidir em árvores que apresentem maior probabilidade de entrar em contacto com o condutor. Sendo estas, os Eucaliptos e os Pinheiros-Bravos, pois são as espécies com maior ocupação do espaço florestal, além de apresentarem alturas médias superiores a 25 metros. No entanto, também se realizaram medições tanto em Carvalhos como em Acácias e Sobreiros. Na Tabela 4.1, está presente a distribuição do número de medições por espécie. A distinção entre o Pinheiro-Bravo e o Pinheiro-Bravo seco deve-se à enorme disparidade encontrada no valor das resistências elétricas e que se poderá verificar mais adiante.

Tabela 4.1- Distribuição das medições por espécie

Espécie	Frequência
Pinheiro bravo	15
Eucalipto	11
Carvalho	6
Pinheiro bravo (seco)	3
Sobreiro	1
Acácia	2
Total	38

As medições experimentais foram realizadas durante o Verão, de modo a obter valores mais próximos dos que poderão originar defeitos com iminência de incêndio. A escolha da estação do ano ser o Verão recaiu devido a ser a estação do ano que apresenta um maior risco de ocorrência de incêndio e por as características elétricas da madeira variarem com a temperatura e a humidade relativa do ar. As medições foram realizadas em três locais com o intuito de medir as resistências de árvores em tipos de solo diferentes e em diferentes condições de estado de conservação do terreno. Os locais escolhidos foram a Ceira dos Vales, Lousã do distrito de Coimbra, em que os terrenos, onde foram realizadas as medições, eram terrenos baldios e apresentavam uma grande variedade de espécies. O segundo local localiza-se em Azoia, Leiria caracterizando-se por ser um terreno privado e na proximidade de moradias. O terceiro local localiza-se na Perulheira, S. Mamede do distrito de Leiria caracterizando-se por ser um terreno privado fundamentalmente constituído por pinheiros bravos e Eucaliptos. Na Figura 4.1 ambos os locais onde se realizaram as medições estão assinalados.



Figura 4.1- Localização geográfica das medições experimentais a) Ceira dos Vales, Lousã, Coimbra ($40^{\circ}08'43.8''N$ $8^{\circ}14'32.9''W$) b) Azoia, Leiria, Leiria ($39^{\circ}42'45.0''N$ $8^{\circ}49'28.4''W$) e c) Perulheira, Batalha, Leiria ($39^{\circ}39'05.3''N$ $8^{\circ}43'42.4''W$)

As medições foram realizadas com a utilização de um multímetro Kiotto kt1000h a operar no modo Ohmímetro. Os eléctodos inseridos nas árvores consistiram em estacas de aço galvanizado, vulgarmente conhecidos como pregos, de 10 cm, por apresentarem uma resistência eléctrica diminuta e por ser um material acessível e de baixo custo. De modo a poder ligar os terminais do multímetro aos eléctodos foram introduzidos crocodilos no final de cada terminal, além da extensão de comprimento dos próprios fios dos terminais de forma a permitir a introdução dos mesmos a grandes distâncias do multímetro. Na Tabela 4.2 apresenta-se as resistências de cada elemento.

Tabela 4.2- Resistência eléctrica dos materiais utilizados nas medições experimentais

Material	Resistência/Unidade[Ω]	Unidades
Pregos	0,03	1
Condutores de 5m	1,7	2
Crocodilos	0,03	2

O levantamento de dados consistiu na realização de duas medições: resistência da árvore, R_{arv} , e a resistência de uma porção do tronco, $R_{x_1-x_2}$, em que x_1 e x_2 representam a altura a que os eléctodos foram introduzidos na árvore, ambas as configurações estão representadas na Figura 4.2

A resistência da árvore, R_{arv} , foi obtida inserido um eléctrodo, a uma altura de 20 cm em relação ao solo, no tronco da árvore e o segundo eléctrodo no ponto mais alto alcançável da árvore. A $R_{x_1-x_2}$ é medida inserindo o primeiro eléctrodo a 20 cm do solo no tronco, enquanto o segundo eléctrodo é introduzido a uma distância, $d_e = 60\text{ cm}$, do primeiro.

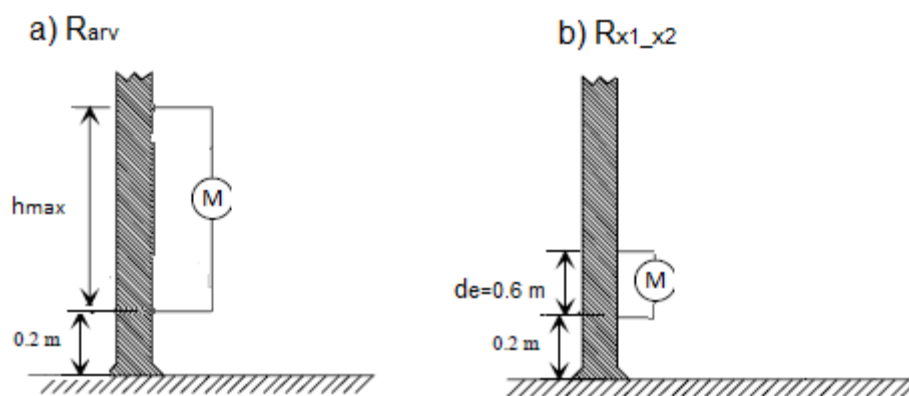


Figura 4.2- Configuração das medições experimentais a) R_{arv} e b) R_{x1-x2}

Na Tabela 4.3, apresenta-se os resultados obtidos para as medições de R_{arv} e de R_{x1-x2} .

Tabela 4.3- Medições experimentais referentes às configurações R_{arv} e R_{x1-x2}

ID	Espécie	Local	Data	T[°C]	HR %	hmax[m]	P1[cm]	P2[cm]	R_{arv} [kΩ]	R_{x1-x2} [kΩ]
1	Eucalipto	Lousã	23/07/2018 11:50	23	73	7,7	165	150	10,24	5,3
2	Eucalipto	Lousã	23/07/2018 12:10	23	73	6,2	125	110	15,55	6,8
3	Acácia	Lousã	23/07/2018 12:50	23	73	5,46	72	64	13,5	4,24
4	Pinheiro-Bravo	Lousã	23/07/2018 14:34	25	63	4,6	160	136	19,15	9,1
5	Pinheiro-Bravo	Lousã	23/07/2018 15:00	25	63	4,25	53	46	67,8	19,4
6	Pinheiro-Bravo	Lousã	23/07/2018 16:07	26	62	5,5	95	95	45,9	14,65
7	Acácia	Lousã	23/07/2018 16:40	26	62	4,57	80	72	6,15	2,9
8	Pinheiro-Bravo	Leiria	24/07/2018 15:20	23	60	2,6	93	85	17,82	8,05
9	Carvalho	Leiria	24/07/2018 16:17	23	60	3,8	110	97	13,88	4,75
10	Pinheiro (seco)	Perulheira	05/08/2018 13:45	20	68	5,3	72	70	+2000	1020
11	Pinheiro-Bravo	Perulheira	05/08/2018 14:10	20	68	5,75	90	85	77,5	14,1
12	Pinheiro (seco)	Perulheira	05/08/2018 14:30	20	68	2,7	78	71	4300	1220

Em que T corresponde à temperatura exterior na altura da medição, HR representa Humidade Relativa do ar. h_{max} representa a altura de inserção do eléctrodo no ponto mais alto alcançável e P1 e P2

representam os perímetros medidos, nos pontos 1 e 2 onde foram inseridos os eléctrodos, respectivamente.

Na Figura 4.3 apresenta-se a medição de $R_{x_1-x_2}$, realizada num Pinheiro-Bravo na Ceira dos Vales, Lousã, Coimbra.



Figura 4.3- Medição experimental de $R_{x_1-x_2}$ num Pinheiro-Bravo, na Lousã, Coimbra

Foi também calculada a resistividade do tronco, ρ_{tronco} , utilizando o valor medido de $R_{x_1-x_2}$, sendo obtida através de,

$$\rho_{tronco} = \frac{R_{x_1-x_2} A}{l}, \quad (4.1)$$

em que l representa a distância entre os eléctrodos e A a área da porção desse tronco, em que se considera que área basal do tronco pode ser descrita pela área de uma circunferência e em que o raio do tronco é obtido através da medição do perímetro do mesmo.

Para o cálculo da resistividade do tronco, foi realizada adicionalmente outra medição, somente no último local, com um procedimento idêntico à medição de $R_{x_1-x_2}$, em que nesta $d_e = 30 \text{ cm}$, designando-se de $R_{x_1-x_3}$. Na Tabela 4.4, estão presentes os valores obtidos aquando da realização das medições na localidade da Perulheira.

Tabela 4.4- Continuação Medições realizadas na localidade da Perulheira

ID	Espécie	Local	Data	T[°C]	HR %	hmax[m]	P1[cm]	Phmax[cm]	R_arv[kΩ]	Rx1-x2[kΩ]	Rx1-x3[kΩ]
13	Pinheiro-bravo	Perulheira	21/08/2018	27	42	5,6	100	78	40,2	11,3	9,7
14	Pinheiro-bravo	Perulheira	21/08/2018	27	42	5,55	100	70	51	24,9	15
15	Pinheiro-bravo	Perulheira	21/08/2018	27	42	5,5	100	60	43	19,3	13
16	Eucalipto	Perulheira	21/08/2018	27	42	4,8	170	110	5,9	3,52	2,96
17	Pinheiro-bravo	Perulheira	21/08/2018	27	42	5	100	70	42,7	10,7	6,8
18	Pinheiro seco	Perulheira	21/08/2018	27	42	4,9	70	40	4,4*10 ³	3*10 ³	2,4*10 ³
19	Eucalipto	Perulheira	21/08/2018	27	42	5	36	22	66,6	10,9	9,2
20	Pinheiro-bravo	Perulheira	21/08/2018	27	42	4,8	110	75	32,1	11,2	11,6
21	Pinheiro-bravo	Perulheira	21/08/2018	27	42	4,75	100	65	43,7	13,1	10,45
22	Pinheiro-bravo	Perulheira	21/08/2018	28	44	5,1	98	50	66,2	17,3	13,9
23	Pinheiro-bravo	Perulheira	21/08/2018	28	44	5,05	70	45	88,4	27,7	19,6
24	Eucalipto	Perulheira	21/08/2018	28	44	5,05	100	80	12,6	4,1	6,7
25	Pinheiro-bravo	Perulheira	21/08/2018	28	44	4,95	40	20	130,3	20,2	16,7
26	Eucalipto	Perulheira	21/08/2018	28	44	4,95	75	60	15,4	4,4	3,9
27	Eucalipto	Perulheira	21/08/2018	28	44	5	100	80	8,8	4,2	3,55
28	Pinheiro-bravo	Perulheira	21/08/2018	28	44	5	75	40	71,8	17,8	15,3
29	Eucalipto	Perulheira	21/08/2018	28	44	5,2	75	50	20,3	9,3	7,6
30	Eucalipto	Perulheira	21/08/2018	28	44	5,3	90	60	15,2	6,3	4
31	Eucalipto	Perulheira	21/08/2018	28	44	5,1	25	17	91,6	15,5	12
32	Eucalipto	Perulheira	21/08/2018	28	44	5,1	110	80	12,4	4,5	3,7
33	Sobreiro	Perulheira	21/08/2018	28	44	4,9	100	70	9,2	5,2	5,8
34	Carvalho	Perulheira	24/08/2018	26	38	5,05	100	70	15,3	5,7	3,5
35	Carvalho	Perulheira	24/08/2018	26	38	5,1	120	80	14,7	5,4	3,6
36	Carvalho	Perulheira	24/08/2018	26	38	4,9	110	80	16,5	6,3	4,2
37	Carvalho	Perulheira	24/08/2018	26	38	5	100	75	16,1	5,9	3,3
38	Carvalho	Perulheira	24/08/2018	26	38	5	90	65	16,3	6,2	3,7

4.2. Modelo de evolução da resistência com a altura

De modo a poder estimar correntes de defeito prováveis, tornou-se necessário a implementação de um modelo, que pudesse simular a evolução da resistência elétrica da árvore com a altura da mesma. O modelo implementado consistiu, em considerar a representação do tronco através de um cone, em que as camadas do cone são constituídas por cilindros com uma altura, $d_h = 1 \text{ cm}$. Em cada iteração, existe o incremento do diâmetro da circunferência, sendo que na primeira iteração considerou-se como sendo o topo da árvore, tendo essa circunferência 1 cm de diâmetro. Na Figura 4.4 apresenta-se a estrutura da árvore fictícia modelada. Esta abordagem é fundamentada pelo caminho praticamente linear realizado pela corrente desde um ramo pertencente à copa da árvore até à base da mesma.

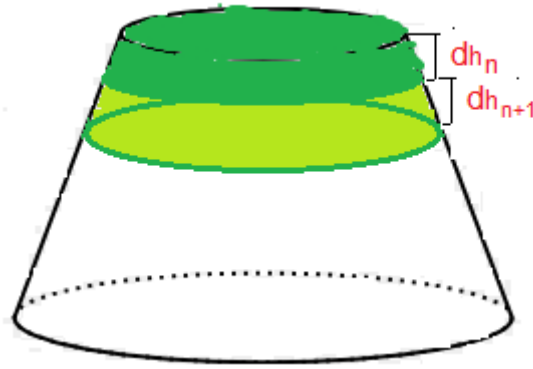


Figura 4.4- Estrutura da árvore fictícia, com as duas primeiras iterações

A resistividade em função do diâmetro é dada por [62]

$$\ln(\rho) = mD^{1/3} + b \quad (4.2)$$

em que ρ e D são respectivamente a resistividade e o diâmetro da árvore. Os parâmetros m e b são diferentes consoante a espécie que se está a analisar.

A resistividade é obtida através de (4.1) tanto para a distancia $d_e = 30 \text{ cm}$ como para $d_e = 60 \text{ cm}$, enquanto que o diâmetro é obtido através do perímetro da árvore medido entre os dois eléctrodos. Os parâmetros m e b foram obtidos através da ferramenta Curve fitting existente no Matlab sendo aplicado para as espécies mais representativas da Floresta Portuguesa, Pinheiro Bravo (*Pinus Pinaster sp*), Eucalipto (*Eucalyptus globulus Labbil*) . A ferramenta Curve Fitting apresenta também indicadores que revelam a robustez e a adequação do modelo obtido. A análise destes indicadores torna-se fulcral para a validação do modelo a considerar, sendo eles a soma dos erros quadrados, SSE , o coeficiente de determinação, R^2 , o coeficiente de determinação ajustado, R_{adj}^2 , e a raiz quadrada do erro médio, RMSE.

- **Soma dos Erros Quadrados, SSE**

O coeficiente SSE reflecte a variação existente entre os valores previstos pelo modelo criado e os valores reais existentes e tomados como base para a formulação do modelo e é dado por

$$SSE = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.3)$$

em que w_i representa o peso de cada dado, geralmente assume o valor de 1, y_i é o valor observado e \hat{y}_i o valor previsto pelo modelo. Quanto mais próximo o valor de SSE for de 0, menor será o erro aleatório e mais verossímeis se tornam as previsões realizadas pelo modelo.

- **Coefficiente de determinação, R^2**

Este coeficiente indica o quão bem-sucedido é o modelo a justificar a variação dos dados previstos. R-square é dado por

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y}_i)^2} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (4.4)$$

em que \bar{y}_i é o valor médio dos dados observados. R^2 pode assumir um valor entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1, maior será a proporção de variância justificada pelo modelo. No entanto, pelo facto de quanto maior o número de variáveis maior R^2 , sem que com isso traga uma predição mais fiável, utiliza-se em complementação o coeficiente de determinação ajustado, R_{adj}^2 .

- **Coefficiente de determinação ajustado, R_{adj}^2**

Este indicador baseia-se no R^2 e ajusta o coeficiente consoante o número de graus de liberdade residuais. O número de graus de liberdade residuais consiste no número de previsões, n , menos o número de coeficientes ajustados, m , estimados a partir dos valores de resposta.

$$v = n - m \quad (4.5)$$

em que v representa o número de variáveis independentes existentes no número de dados necessários para calcular a SST .

O R_{adj}^2 vem, então, dado por

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{(n - 1)SSE}{(v)SST} \quad (4.6)$$

R_{adj}^2 pode assumir qualquer valor inferior ou igual a 1, sendo que quanto mais próximo de 1 mais bem ajustado é o modelo. Poderá existir o caso em que R_{adj}^2 apresenta um valor negativo, o que denota a inclusão por parte do modelo de termos que não beneficiam a previsão.

- **Raíz quadrada do erro quadrático médio, $RMSE$**

A $RMSE$ indica o desvio padrão dos erros de previsão face à regressão linear do modelo. A $RMSE$ é definida como

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{SSE}{v}} \quad (4.7)$$

em que MSE é o erro quadrático médio. $RMSE$, tal como SSE , quanto mais próxima de 0 for melhor será para as previsões do modelo.

4.2.1. Modelo Pinheiro-bravo (*Pinus Pinaster Sp.*)

No caso do Pinheiro bravo, a equação que descreve o comportamento da resistividade do pinheiro consoante o diâmetro do tronco é dada por

$$\ln(\rho_{pinh}) = 4.955D_{pinh}^{1/3} + 3.028. \quad (4.8)$$

Na Figura 4.5 apresenta-se a determinação dos parâmetros m e b que mais se ajustam à função pré-definida em (4.2) através da ferramenta "Curve Fitting" disponibilizada pelo Matlab.

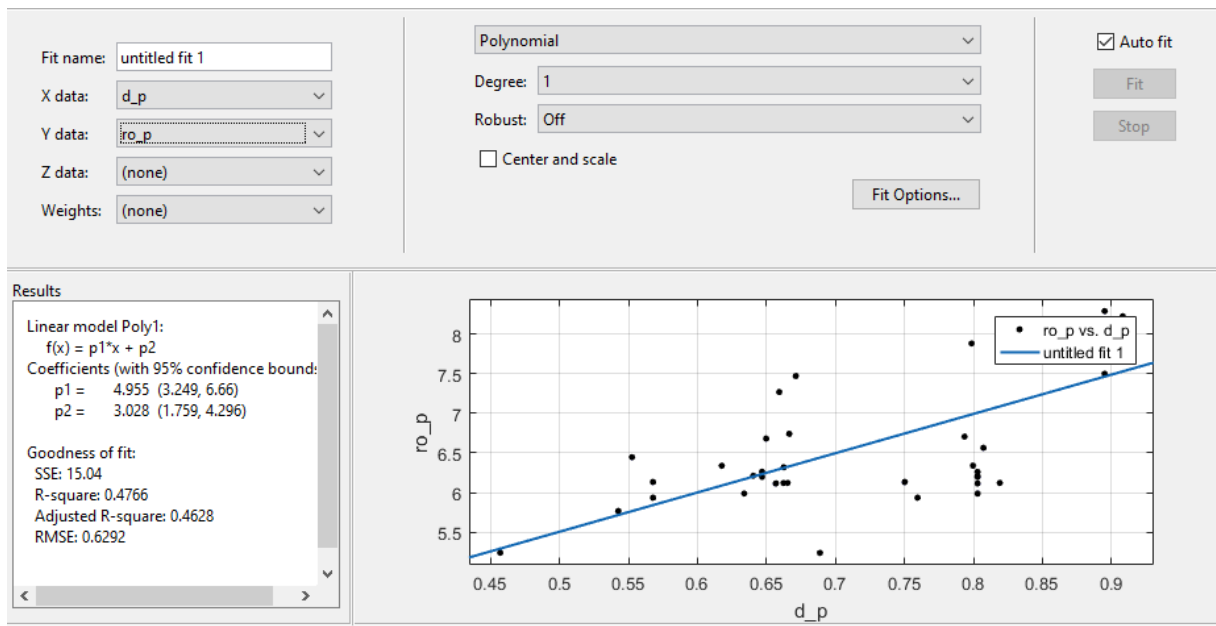


Figura 4.5- Curva da resistividade em função do diâmetro na espécie Pinheiro-Bravo

É ainda possível analisar através da Figura 4.5 os indicadores da adequação do modelo. Neste caso, a soma dos erros quadráticos, SSE, que apresenta um valor elevado face ao pretendido, valor próximo de 0, revelando alguma disparidade entre o dado previsto pelo modelo e os dados medidos. Tanto R^2 como R^2_{adj} apresentam valores substancialmente inferiores ao pretendido, pelo que o modelo apenas consegue justificar metade da variância encontrada face aos resultados medidos. Estes indicadores poderão melhorar, caso se aumente o número de dados medidos, ou seja, uma maior gama de dados para diferentes diâmetros da árvore. Relativamente ao último indicador, verifica-se que apresenta um valor próximo de 0, conferindo alguma veracidade às previsões realizadas pelo modelo.

Partindo da equação obtida em (4.8), obteve-se os valores das resistências elétricas de árvores, definindo como diâmetro final, o diâmetro basal, valores de 25, 30 e 40 cm. Para a altura das árvores simuladas estas apresentam valores entre os 5 e os 15 metros. Os valores das resistências obtidos para até a uma altura de 8 metros apresentam-se na Tabela 4.5.

Tabela 4.5- Resistências eléctricas simuladas para a espécie do Pinheiro-Bravo

Pinheiro-Bravo					
Diam=80/pi() [cm]		Diam=100/pi() [cm]		Diam=120/pi() [cm]	
h1[cm]	R1[kΩ]	h2[cm]	R2 [kΩ]	h3[cm]	R3[kΩ]
500	59,71	500	45,25	500	37,20
525	63,69	525	48,00	525	39,35
550	67,84	550	50,82	550	41,53
575	72,14	575	53,70	575	43,75
600	76,62	600	56,67	600	46,01

625	81,30	625	59,70	625	48,31
650	86,19	650	62,83	650	50,65
675	91,31	675	66,03	675	53,03
700	96,69	700	69,34	700	55,47
725	102,36	725	72,74	725	57,95
750	108,35	750	76,25	750	60,48
775	114,69	775	79,87	775	63,07
800	121,42	800	83,62	800	65,71

4.2.2. Modelo Eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill)

No caso do Eucalipto, a equação que descreve o comportamento da resistividade elétrica consoante o diâmetro do tronco é dada por

$$\ln(\rho_{euc}) = 4.817D_{euc}^{1/3} + 3.134. \quad (4.9)$$

Na Figura 4.6, tal como na Figura 4.5, para o caso do pinheiro-bravo, apresentam-se os parâmetros correspondentes da equação (4.2).

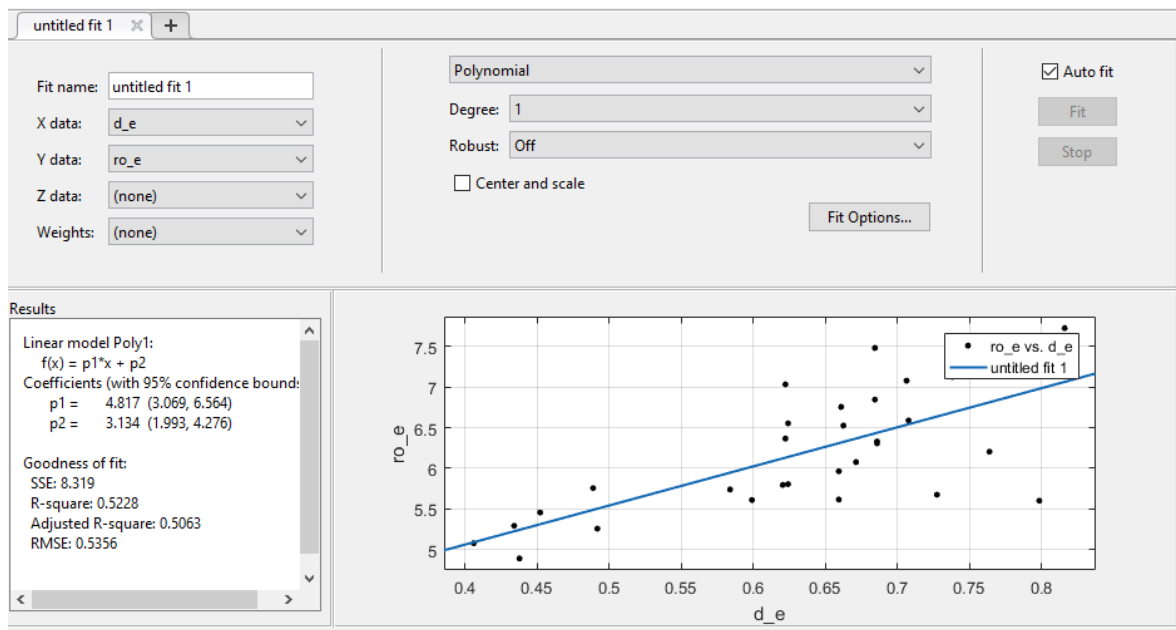


Figura 4.6- Curva da resistividade em função do diâmetro em Eucaliptos

Os indicadores do modelo estão também presentes e é possível constatar que apresenta um SSE mais baixo que na situação anterior. No entanto, o seu valor ainda é consideravelmente elevado face ao pretendido. Em relação ao R^2 e ao R_{adj}^2 , estes também são ligeiramente melhores que os apresentados anteriormente. Verificando-se também que a diferença entre eles, R^2 e R_{adj}^2 , é pequena e consequentemente revela que os dados incluídos no modelo não foram repetitivos e a inserção de novos dados poderá introduzir uma melhor adequação do modelo. No caso do último indicador, RMSE,

apresenta um valor ligeiramente superior ao pretendido. No entanto, continua tal como os restantes indicadores a apresentar um valor mais próximo do pretendido do que os indicadores do modelo anterior. Este resultado poderá ser explicado pela maior amplitude de diâmetros incluído neste conjunto de dados, permitindo uma melhor inferência do modelo.

Partindo da equação obtida em (4.9), obteve-se os valores das resistências elétricas dos Eucaliptos. As considerações tanto da altura como do diâmetro basal foram idênticas às do Pinheiro Os valores das resistências obtidas apresentam-se na Tabela 4.6.

Tabela 4.6- Resistências elétricas simuladas para a espécie do Eucalipto

Eucalipto					
Diam=80/pi() [cm]		Diam=100/pi() [cm]		Diam=120/pi() [cm]	
h1[cm]	R1[kΩ]	h2[cm]	R2[kΩ]	h3[cm]	R3[kΩ]
500	17,77	500	12,68	500	9,85
525	18,92	525	13,45	525	10,42
550	20,11	550	14,23	550	10,99
575	21,34	575	15,03	575	11,58
600	22,61	600	15,85	600	12,18
625	23,91	625	16,68	625	12,79
650	25,27	650	17,54	650	13,40
675	26,67	675	18,41	675	14,03
700	28,13	700	19,31	700	14,67
725	29,64	725	20,23	725	15,32
750	31,21	750	21,17	750	15,99
775	32,84	775	22,13	775	16,66
800	34,54	800	23,12	800	17,35

4.3. Características das Rede MT consideradas

O conhecimento das correntes residuais nas linhas sãs é fundamental para uma parametrização correta das linhas, pois na existência de um defeito fase-terra, numa outra linha, as linhas sãs apresentam correntes residuais homopolares originadas pelas contribuições capacitivas, entre as próprias linhas e entre a linha e a terra, que acabam por fechar o circuito através do Neutro.

Com o propósito de se poder parametrizar as funções homopolares, existentes na Unidade de Proteções, no caso de um contacto entre o condutor e a árvore, e tentado preservar tanto a sensibilidade, a proteção atuar para a menor intensidade de corrente de defeito possível, como a seletividade, a proteção isolar única e exclusivamente o elemento da rede em defeito, tornou-se

necessário a consideração de uma rede simplista, mas que permita caracterizar de forma verossímil as redes MT existentes em Portugal, de forma a poder obter as correntes residuais nas linhas sãs, aquando de um defeito.

As características da rede consideradas estão presentes na Tabela 4.7.

Tabela 4.7- Característica das Redes MT consideradas

		Un	
		15 kV	30 kV
Rede Montante	Sc _c [MVA]	500	500
Transformador	Sn [MVA]	20	20
	U _{cc} [%]	8	8
Linhas Aéreas	Nº saídas	10	5
	Comprimento [km]	30	60
	Capacidade [nF/Km]	12,97	11,74

Para o regime de Neutro considerou-se a utilização da caracterização obtida por Pedro Aleixo em [63], e em que considerava uma rede com características semelhantes às consideradas e presentes na Tabela 4.7. Os valores das impedâncias de cada regime de neutro apresentam-se na Figura 4.7 em que apenas foram considerados os valores respeitantes ao nível de tensão de 15 kV e de 30 kV.

Rede [kV]	Regime de neutro	Z [ohm]	R [ohm]	X [ohm]
10	Isolado	-	-	-
	Ressonante a 5A $\delta=0$	41,33	1,37	41,31
	Resistência a 300A	24,84	24,84	-
	Reactância a 300A	13,81	2,71	13,54
	Reactância a 1000A	5,08	0,99	4,98
15	Isolado	-	-	-
	Ressonante a 3A $\delta=-0,21$	657,95	21,93	657,59
	Resistência a 300A	31,78	31,78	-
	Reactância a 300A	29,45	5,77	28,88
	Reactância a 1000A	8,20	1,60	8,04
30	Isolado	-	-	-
	Ressonante a 3A $\delta=-0,12$	732,88	24,43	732,48
	Resistência a 300A	63,85	63,85	-
	Reactância a 300A	55,21	10,82	54,14
	Reactância a 1000A	14,34	2,81	14,06

Figura 4.7- Característica dos Regimes de Neutro considerados por Pedro Aleixo em [63]

Considerando tanto os parâmetros da rede presentes na Tabela 4.7 como os valores de impedância dos regimes de neutro presentes na Figura 4.7 e aplicando a equação (2.8), pode-se então obter os valores $I_{res_sã}$. Na Tabela 4.8 apresenta-se os valores correspondentes à corrente residual.

Tabela 4.8- Corrente residual para cada regime de Neutro e nível de Tensão considerada

		Regime de Neutro				
		Isolado	Ressonante	Res. Lim.300 A	React. Limit. 300A	React. Limit. 1000A
Nível	15 kV	3,18	3,17	3.19	3.09	2.88
Tensão	30 kV	11,87	11,85	12.00	11.29	9.61

4.4. Distribuição Probabilística das Resistências Eléctricas por Região

De forma a poder caracterizar regionalmente a distribuição das resistências eléctricas de árvores, utilizou-se como base os valores medidos nas experiências realizadas e que estão presentes na Tabela 4.3 e Tabela 4.4, assumindo alguma variação dos valores das resistências eléctricas entre a mesma espécie, utilizando a função “random” do Matlab que permite gerar valores aleatórios através da distribuição probabilística de cada espécie. Posteriormente, assumiu-se a atribuição de um peso relativo à distribuição de cada espécie numa determinada região, baseando-se nos valores indicados pelo ICNF e presentes na Tabela 3.1.

De modo a obter as funções probabilidade de cada região considerou-se a utilização de uma distribuição normal mista, visto existir grandes diferenças na resistência eléctrica consoante a espécie a considerar. A função probabilidade da distribuição normal mista é dada por

$$f(x) = \sum_{i=1}^n w_i p_i = \sum_{i=1}^n w_i \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (4.10)$$

em que w_i corresponde ao peso atribuído à distribuição normal p_i .

De forma a não incluir as distribuições de cada região, irá ser apenas exibidas as funções probabilidade de regiões com grande densidade florestal e que apresentam diferenças vincadas entre elas. Os resultados das restantes figuram no Anexo A.

4.4.1. Região do Alentejo Central

A Região do Alentejo Central, tal como as restantes regiões localizadas no Alentejo, apresentam como espécie dominante o Sobreiro, seguido do Eucalipto. Estas duas espécies caracterizam-se por apresentar resistências na ordem das dezenas de kilohms. Através da função “fitgmdist” e atendendo aos pesos considerados para cada espécie, obteve-se a função probabilidade mais adequada para a Região do Alentejo Central, os parâmetros obtidos para esta função estão presentes na Tabela 4.9.

O parâmetro *Negative log likelihood* permite ter uma inferência se a função probabilidade obtida é bem ajustada ou não aos dados reais, sendo que se pretende um valor próximo de 0. Na Figura 4.8 está presente o histograma e a própria curva da função.

Tabela 4.9- Parâmetros da função probabilidade da Região Alentejo Central

		w_i	$\mu_i[\Omega]$	$\sigma_i [\Omega]$	Negative log likelihood
i	1	0,72	14876	4,64E+05	1652,3
	2	0,28	31373	7,84E+08	

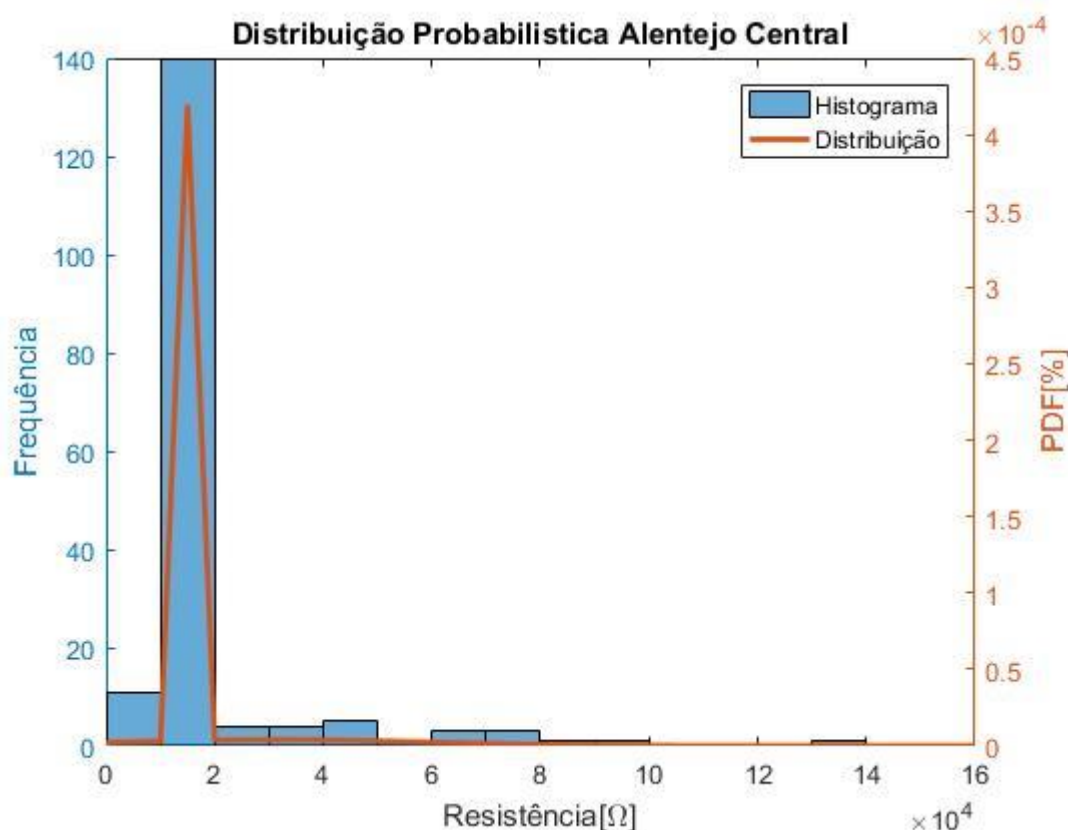


Figura 4.8- Distribuição probabilística das resistências elétricas na região do Alentejo Central

4.4.2. Região do Oeste

A região do Oeste caracteriza-se por apresentar uma representação equitativa e demarcada tanto de Pinheiros Bravos como de Eucaliptos, sendo que as restantes espécies se apresentam apenas como sendo residuais.

Identicamente à região do Alentejo Central, procedeu-se à obtenção dos parâmetros da distribuição normal mista mais adequados às características desta região, estando estes presentes na Tabela 4.10.

Tabela 4.10- Parâmetros da função probabilidade da Região do Oeste

		w_i	$\mu_i[\Omega]$	$\sigma_i [\Omega]$	Negative log likelihood
i	1	0,42	14185	1,71E+07	1007,5
	2	0,58	54985	1,08E+09	

Na Figura 4.9 está representado tanto o histograma característico como a sua própria curva da função probabilidade.

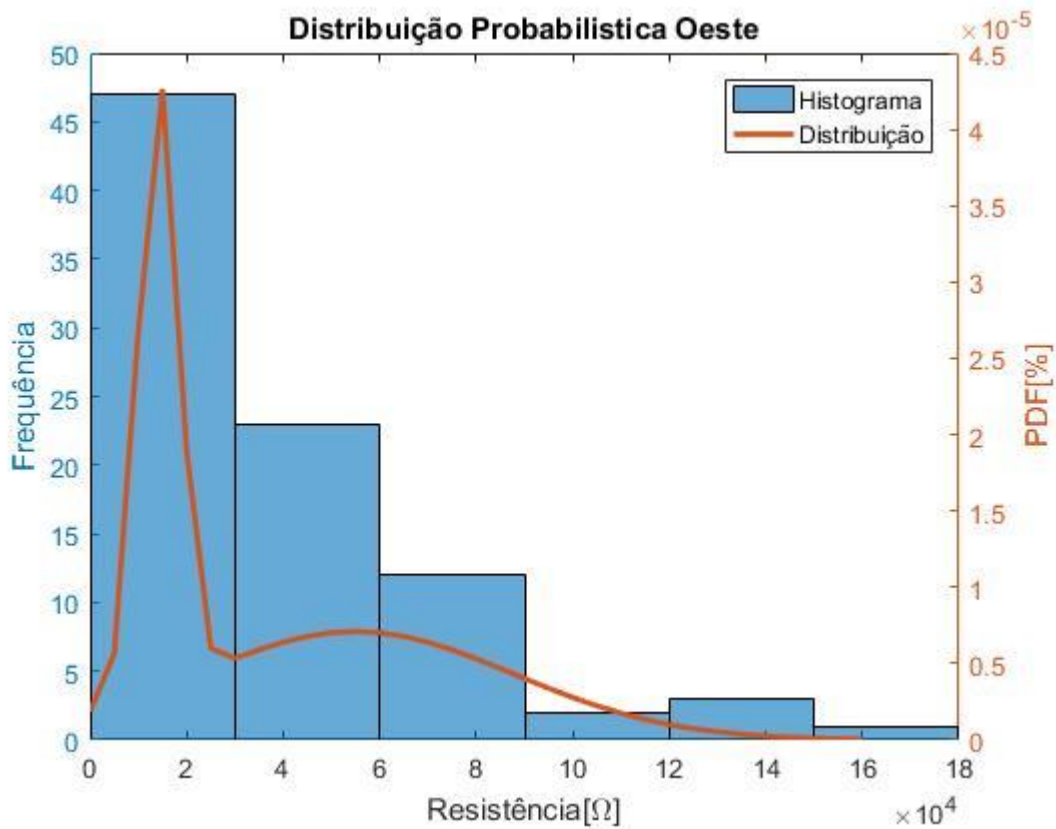


Figura 4.9- Distribuição probabilística das resistências eléctricas na região do Oeste

4.4.3. Região do Pinhal Interior do Sul

Esta região é caracterizada pela predominância da espécie de Pinheiro-Bravo, tendo como espécie remanescente o Eucalipto.

Analogamente às regiões anteriores, procedeu-se à escolha da função probabilidade mais adequada às resistências presentes nesta região. Os parâmetros obtidos para a função distribuição normal mista estão presentes na Tabela 4.11.

Tabela 4.11- Parâmetros da função probabilidade da Região do Pinhal Interior do Sul

		w_i	μ_i [Ω]	σ_i [Ω]	Negative log likelihood
i	1	0,58	62857	9,01E+08	1723,8
	2	0,42	22750	1,15E+09	

Na Figura 4.10 está representado tanto o histograma característico como a sua própria curva da função probabilidade.

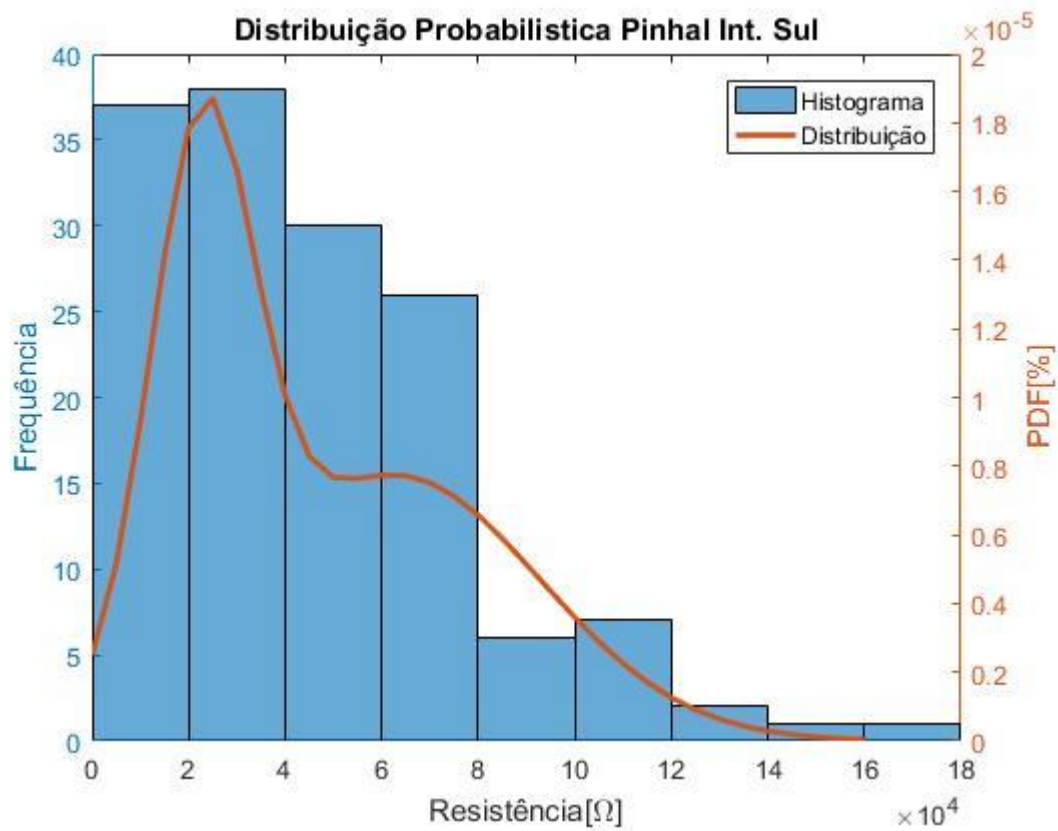


Figura 4.10- Distribuição probabilística das resistências elétricas na região do Pinhal Interior Sul

5. Resultados

De forma, a conseguir detetar o maior número de contactos possíveis entre as linhas aéreas e as árvores torna-se necessário não só compreender quais as gamas de corrente de defeito geradas por esses contactos, bem como as limitações nas parametrizações impostas pelas funções da Unidade de Protecção, como pelas características da rede e pelos seus constituintes.

5.1. Correntes de Defeito

Quando se parametriza as funções dos SP, estas devem de garantir tanto a sensibilidade, a protecção actuar para a menor intensidade de corrente de defeito possível, como a seletividade, a protecção isolar única e exclusivamente o elemento da rede em defeito. Com o intuito de otimizar as proteções direccionais homopolares, Pedro Aleixo obteve, considerando as características da rede de MT existentes em Portugal, as correntes residuais provenientes das assimetrias da rede e dos erros relativos aos transformadores de medida[63]. Os valores obtidos desse estudo estão presentes na Figura 5.1

Com base nesses valores pode-se definir o limiar inferior para o qual se deve parametrizar as funções do SP, com o intuito de garantir o máximo de segurança possível.

	Nível de Tensão [kV]	V_{res} [%]	I_{res} [A]	Fase [°]
Isolado	10	0,184	5,85E-05	indefinida
	15	4,907	1,26E-04	indefinida
	30	4,935	3,15E-04	indefinida
Ressonante	10	4,378	6,06E-01	-92,344
	15	16,576	2,12E-01	-92,257
	30	29,486	1,36E+00	-92,222
Resistência 300A	10	0,096	2,21E-02	-179,243
	15	0,235	4,97E-02	-152,913
	30	0,409	2,00E-01	-164,778
Reactância 300A	10	0,095	3,85E-02	-102,411
	15	0,289	5,15E-02	-102,433
	30	0,459	2,14E-01	-102,048
Reactância 1000A	10	0,028	2,95E-02	-104,043
	15	0,159	5,02E-02	-103,295
	30	0,197	2,03E-01	-102,946

Figura 5.1- Correntes residuais provenientes de assimetrias obtidas por Pedro Aleixo para a função MIHD

Dado o facto de as resistências elétricas das árvores apresentarem valores de grandezas bastante superior comparativamente aos dos parâmetros da rede, pode-se desprezar a contribuição dos

mesmos. Com esta simplificação, não existe necessidade de contemplar nem o tipo de regime de neutro, nem a capacidade das linhas, passando a equação (2.4) a ser simplesmente dada por

$$\overline{I}_{def} = \frac{\overline{E}_a}{R_{def}} \quad (5.1)$$

Aplicando a equação (5.1) e utilizando os valores das resistências presentes na Tabela 4.3 e Tabela 4.4 obtêm-se as correntes de defeito que figuram na Tabela 5.1.

Tabela 5.1- Corrente de defeito resultante das medições experimentais

ID	Espécie	R_arv[kΩ]	Nível de Tensão	
			15 [kV]	30 [kV]
1	Eucalipto	10,24	0,85	1,69
2	Eucalipto	15,55	0,56	1,11
3	Acácia	13,5	0,64	1,28
4	Pinheiro	19,15	0,45	0,90
5	Pinheiro	67,8	0,13	0,26
6	Pinheiro	45,9	0,19	0,38
7	Acácia	6,15	1,41	2,82
8	Pinheiro	17,82	0,49	0,97
9	Carvalho	13,88	0,62	1,25
10	Pinheiro seco	20000	0,00	0,00
11	Pinheiro	77,5	0,11	0,22
12	Pinheiro seco	4300	0,00	0,00
13	Pinheiro	40,2	0,22	0,43
14	Pinheiro	51	0,17	0,34
15	Pinheiro	43	0,20	0,40
16	Eucalipto	5,9	1,47	2,94
17	Pinheiro	42,7	0,20	0,41
18	Pinheiro seco	4360	0,00	0,00
19	Eucalipto	66,6	0,13	0,26
20	Pinheiro	32,1	0,27	0,54
21	Pinheiro	43,7	0,20	0,40
22	Pinheiro	66,2	0,13	0,26
23	Pinheiro	88,4	0,10	0,20
24	Eucalipto	12,6	0,69	1,37
25	Pinheiro	130,3	0,07	0,13
26	Eucalipto	15,4	0,56	1,12
27	Eucalipto	8,8	0,98	1,97
28	Pinheiro	71,8	0,12	0,24
29	Eucalipto	20,3	0,43	0,85
30	Eucalipto	15,2	0,57	1,14
31	Eucalipto	91,6	0,09	0,19
32	Eucalipto	12,4	0,70	1,40
33	Sobreiro	9,2	0,94	1,88
34	Carvalho	15,3	0,57	1,13
35	Carvalho	14,7	0,59	1,18
36	Carvalho	16,5	0,52	1,05
37	Carvalho	16,1	0,54	1,08
38	Carvalho	16,3	0,53	1,06

Atendendo aos valores obtidos, pode-se verificar, que os valores de corrente de defeito são bastante diminutos, sendo bastante inferiores aos valores normalmente definidos para as parametrizações das funções dos Sistemas de Proteção (SP). Verifica-se também que para o caso das resistências simuladas, estas apresentam uma corrente de pequena intensidade, sendo que em alguns casos é até inferior aos das correntes residuais apresentadas Figura 5.1.

5.2. Estudo da Parametrização

Tendo em conta a variabilidade e a distribuição das espécies arbóreas em Portugal Continental, além das diferenças de magnitude das resistências elétricas entre espécies, optou-se por obter a distribuição das resistências para cada região com o intuito de observar de que forma se pode adequar as parametrizações à região em que a SE se localiza.

Tal como referido anteriormente a I_{res_ass} impõe-se como limiar mínimo para a I_{op} de forma a se poder explorar a rede sem que haja a actuação da protecção. Desta forma, calculou-se a probabilidade de se detetar contactos com árvores para uma $I_{op} = I_{res_ass}$ para o nível de tensão e para as diferentes regiões, estando estas presentes na Tabela 5.2.

Tabela 5.2- Probabilidade cumulativa, por região e regime de neutro para $I_{op} = I_{res_ass}$

CDF [%]		Regime Neutro									
		Isolado		Ressonante		Res. 300A		Reac. 300A		Reac. 1000 A	
Id	Região	15 kV	30 kV	15 kV	30 kV	15 kV	30 kV	15 kV	30 kV	15 kV	30 kV
1	Algarve	100	100	78	31	100	94	100	92	100	93
2	Baixo Alentejo	100	100	81	8	100	96	100	95	100	96
3	Alentejo Central	100	100	90	7	100	99	100	99	100	99
4	Alentejo litoral	100	100	82	8	100	98	100	97	100	97
5	Alto Alentejo	100	100	86	8	100	99	100	98	100	98
6	Centro Litoral	100	100	53	18	99	94	99	92	99	94
7	Dão Lafões	100	100	51	14	100	92	100	88	100	91
8	Beira Interior Norte	100	100	55	7	100	94	100	92	100	94
9	Beira Interior Sul	100	100	66	27	100	88	100	86	100	88
10	Douro	100	100	50	5	100	91	100	87	100	90
11	Alto Minho	100	100	50	11	100	92	100	89	100	91
12	AM LISBOA	100	100	65	11	100	92	100	89	100	91
13	AM PORTO	100	100	64	17	99	85	99	83	99	84
14	Baixo Minho	100	100	60	19	100	88	100	86	100	88
15	Barroso/Padrela	100	100	51	6	100	92	100	89	100	91
16	Nordeste	100	100	73	4	100	98	100	96	100	97
17	Oeste	100	100	61	21	100	90	100	87	100	90
18	Pinhal Int. Norte	100	100	56	21	100	92	100	89	100	92
19	Pinhal Int. sul	100	100	53	10	100	88	100	84	100	87
20	Tâmega	100	100	59	20	99	96	98	94	99	95
21	Ribatejo	100	100	79	11	100	98	100	97	100	98
22	Centro Interior	100	100	59	23	100	89	100	87	100	89

Pela análise da Tabela 5.2 verifica-se que no caso do regime de Neutro Isolado, a probabilidade de um contacto com árvores originar uma corrente residual igual ou inferior à corrente residual de assimetrias é nula, para ambos os níveis de tensão.

Face ao Regime de Neutro Ressonante, a probabilidade de se detetar contactos entre árvores para a $I_{op} = I_{res_ass}$ é diferente de região para região e apresenta diferenças substanciais nos níveis de tensão analisados. Apresentando, todavia, uma maior probabilidade de se detetarem contactos, em todas as regiões, no nível de tensão de 15 kV face ao de 30 kV.

Perante os regimes impedantes, verifica-se que no nível de 15 kV a probabilidade de se detetar o contacto entre o condutor e árvore é quase certa, em todas as regiões. Contudo, para o nível de tensão de 30 kV, verifica-se que as regiões que apresentam probabilidades inferiores, entre 80% a 90%, se enquadram nas regiões em que a espécie predominante é o Pinheiro Bravo, como no caso da região do Pinhal Interior.

A partir destes resultados, onde se verifica que para os restantes regimes à exceção do Neutro Isolado não se é possível detetar todos os contactos, torna-se necessário a parametrização da I_{op} para um valor acima da I_{res_ass} , mas que seja o mínimo possível, de modo a poder garantir o máximo de segurança.

No entanto, e atendendo aos valores obtidos na Tabela 4.8, verifica-se que a I_{res_sa} , no caso de defeitos francos, apresenta valores bastante superiores, pelo que existe a necessidade de se usar uma função de Máximo Intensidade Homopolar Direcional, MIHD, ou a utilização de um função de tempo inverso. A última, no entanto, pode apresentar um tempo de operação elevado e implica a presença de um contacto permanente, o que poderá ser prejudicial para uma atuação atempada, podendo ocorrer a formação de um incêndio, no entretanto.

5.2.1. Parametrização MIHD, 1º Escalão

A parametrização da MIHD é limitada não só pela corrente residual mínima admissível por parte da UP como pela tensão residual, devido à direccionalidade ser obtida através do cálculo da Potência Residual. Esta restrição, obriga à coordenação temporal com uma função MIH de tempo definido.

Para as parametrizações da MIHD, optou-se por se escolher as características operacionais definidas no trabalho realizado por Pedro Aleixo, por serem as óptimas,[63]. Estas características foram definidas para a utilização da Unidade de Proteção, TPU S420, podendo estas variar consoante os limites impostos pelos fabricantes das UP's para as variáveis a definir. Na Figura 5.2, apresenta-se as características operacionais definidas pelo Pedro Aleixo, para os diferentes regimes de neutro e níveis de tensão. Caso se opte, por exemplo, pela SIPROTEC 4 7SJ64 da Siemens, esta já irá ter uma parametrização diferente devido à tensão residual mínima admitida ser de 2.5 V, a que corresponde $0.8\%U_{res}$, enquanto a TPU S420 admite uma tensão residual mínima de $0.5\%U_{res}$, em que U_{res} corresponde à tensão residual máxima (3 vezes a tensão simples). Verifica-se que para o âmbito do estudo, apenas o Neutro com Resistência Limitadora a 300 A e o Neutro com Reactância Limitadora a 1000 A terão de ser reparametrizados para 7SJ64. Neste caso, devido a U_{res} passar a ser 0.8% então

a I_{res} , devido à proporcionalidade directa que apresenta em relação U_{res} (como se pode ver pela equação (2.12)) será de 2.4 A e 8 A, respectivamente.

Nível de confiança 99,5%	Nível de Tensão [kV]	V_{rec} [%]	I_{rec} [A]	Ângulo característico [°]	Fator de qualidade da bobine	Máxima resistência de defeito [Ω]
Isolado	10	0,5	1	90	-	6350
	15	5	1	90		9490
	30	5	1	90		16623
Ressonante	10	6	1	10	30	18651
	15	47	2	5	20	5037
	30	25	2	5	20	19338
Resistência 300A	10	0,5	1,5	45	-	4215
	15	0,5	1,5	45		6319
	30	0,5	1,5	45		12638
Reactância 300A	10	0,8	2,5	9	5	2534
	15	0,8	2,5	11	3	3800
	30	0,8	2,5	11	3	7600
Reactância 1000A	10	0,5	5	11	3	1267
	15	0,5	5	11	3	1902
	30	0,5	5	11	3	3805

Figura 5.2- Parametrização Sugerida para a MIHD, por [63]

Devido à adoção das características operacionais sugeridas em [63], torna-se também necessário a seleção das relações dos transformadores de medida definidas por ele, à exceção do regime de Neutro com Reactância limitadora a 1000 A, em que poderá ser utilizado um TI 50/1, caso se considere a existência de um factor limite de precisão de $30I_N$. A relação dos transformadores de medida a utilizar considerados está presente na Tabela 5.3.

Tabela 5.3- Transformadores de Intensidade propostos

	Un[kV]	TI-5P
Isolado	15	50/1
	30	50/1
Ressonante	15	10/1
	30	10/1
Res. 300 A	15	50/1
	30	50/1
React.300 A	15	50/1
	30	50/1
React. 1000 A	15	50/1
	30	50/1

5.2.2. Parametrização da MIH, 2º Escalão

Para a parametrização da MIH, o seu valor será definido para o menor valor mínimo permitido pela UP, desde que se garanta a condição:

$$I_{op} \geq I_{op_{min}} = \max(I_{res_Ass}; I_{res_saMIHD}) \quad (5.2)$$

Em que I_{res_saMIHD} corresponde à corrente residual de linha sã, aquando de um defeito noutra linha com uma $I_d = I_{opMIHD}$, em que I_{opMIHD} corresponde às parametrizações propostas em [63]. Deste modo, pode-se garantir que numa situação em que a corrente residual seja próxima de I_{opMIHD} , mas que não leve à sua atuação, este escalão não atue intempestivamente para a linha sã. Na Tabela 5.4 apresentam-se os valores das correntes residuais consideradas.

Tabela 5.4- Correntes residuais para os diferentes regimes de Neutro e níveis de Tensão

Regime Neutro	Isolado		Ressonante		Res. 300A		Reac. 300A		Reac. 1000 A	
	15	30	15	30	15	30	15	30	15	30
$I_{res_sa_{def_franco}}$ [A]	3,18	11,87	3,17	11,85	3,19	12,00	3,09	11,29	2,88	9,61
I_{res_Ass} [A]	1,36E-04	3,15E-04	0,212	1,360	0,050	0,200	0,052	0,214	0,050	0,203
I_{res_saMIHD} [A]	0,100	0,200	0,747	2.850	0,029	0,104	0,030	0,112	0,025	0,08

Tendo em conta os valores presentes na Tabela 5.4 torna-se ainda necessário a contabilização dos erros provenientes do transformador de intensidade toroidal como dos erros resultantes da UP. Para a contabilização dos erros do TI considerou-se os erros indicados e presentes na Figura 2.15 para a reta relativa à norma CEI, e que dependem tanto da corrente primária do TI escolhido, I_{TI_1} , como da corrente medida pretendida, que neste caso será a $I_{op_{min}}$. Na Tabela 5.5, está presente a indicação relativa ao erro relativo em relação à $I_{op_{min}}$ considerada.

Tabela 5.5- Erros relativos ao Transformador de Intensidade

	Un[kV]	$I_{op_{min}}/I_{TI_1}$ [pu]	ϵ_{TI}
Isolado	15	0,002	10%
	30	0,004	9%
Ressonante	15	0,0747	3%
	30	0,285	1,50%
Res. 300 A	15	0,001	15%
	30	0,004	9%
React.300 A	15	0,001	15%
	30	0,004	9%
React. 1000 A	15	0,001	15%
	30	0,004	9%

No caso do Sistema de Proteção TPU S420 para a função pretendida, verifica-se que para uma entrada sensível de 0.2 A, $I_{N_{sens}}$, a corrente mínima parametrizável, $I_{min_{op}}$ será de

$$I_{min_{op}} = 0.1 \times I_{N_{sens}} \times n_{TI} = 0.1 \times 0.2 \times \frac{50}{1} = 1 \text{ A} \quad (5.3)$$

sendo esta uma corrente longe do pretendido. Caso se considere a SIPROTEC 4 7SJ64, esta já

apresenta uma entrada sensível que permite como corrente mínima 0.001 A. Sendo que para esse caso, a $I_{min_{op}}$ será de

$$I_{min_{op}} = 0.001 \times n_{TI} = 0.001 \times \frac{50}{1} = 0.05 \text{ A}$$

permitindo assim uma parametrização com a sensibilidade necessária.

Para o erro relativo à medição do TI interno da UP, considerou-se o erro indicado pela a UP, neste caso a SIPROTEC 4 7SJ64, de $\varepsilon_{UP_{TI}} = 2\%I_{op}$ [64].

Tendo em conta os erros, a corrente operacional será então dada por

$$I_{op} = (\max(I_{res_Ass}; I_{res_saMIHD}) \times (1 + \varepsilon_{TI})) \times (1 + \varepsilon_{UP_{TI}}) + k_{seg} \quad (5.4)$$

em que k_{seg} , corresponde ao factor de segurança introduzido.

5.2.3. Coordenação temporal

Após a definição das correntes operacionais de cada escalão torna-se essencial a sua coordenação temporal, de modo a garantir a seletividade.

Considerou-se a utilização de um escalão de Máximo Intensidade Homopolar, para correntes de defeito muito elevadas, apresentando este um $t_{op} = 0.1s$, de modo a proteger de forma quase instantânea os equipamentos. Face aos restantes escalões, estudados em cima, terá de ser contabilizado além do tempo de operação do escalão anterior, tempos relativos à abertura de disjuntor e a margens de segurança. Assim a t_{op} do escalão i será dado por

$$t_{op_i} = t_{max_{op_{i-1}}} + \Delta t \quad (5.5)$$

em que $t_{max_{op_{i-1}}}$ engloba o tempo operacional do escalão anterior, o tempo de abertura do disjuntor e os tempos de processo de computação. Enquanto que Δt corresponde ao tempo de rearme do disjuntor, aos erros resultantes do relé, além da adição de uma margem de segurança, de forma a garantir por completo a coordenação temporal. Na Tabela 5.6 apresenta-se os tempos de operação dos respetivos escalões.

Tabela 5.6- Tempo de operação dos escalões MIHD E MIH

i	$t_{max_{op_{i-1}}}$ [s]	Δt [s]	t_{op_i} [s]
1			0.1
2	0,23	0,17	0,4
3	0,53	0,17	0,7

5.3. Parametrização Sugerida

A parametrização final sugerida com o intuito de detetar o máximo de contactos possíveis está presente na Tabela 5.7.

Tabela 5.7- Parametrização proposta para a deteção de contactos entre condutores e árvores

	15 kV			30 kV		
	Função	lop[A]	top [s]	Função	lop[A]	top [s]
Isolado	MIH	a definir*	0,1	MIH	a definir*	0,1
	MIHD	1	0,4	MIHD	1	0,4
	MIH	0,3	0,7	MIH	0,45	0,7
Ressonante	MIH	a definir*	0,1	MIH	a definir*	0,1
	MIHD	2	0,4	MIHD	2	0,4
	MIH	0,9	0,7			
Resistência 300 A Reactância 300 A	MIH	a definir*	0,1	MIH	a definir*	0,1
	MIHD	2,5	0,4	MIHD	2,5	0,4
	MIH	0,25	0,7	MIH	0,45	0,7
Reactância 1000 A	MIH	a definir*	0,1	MIH	a definir*	0,1
	MIHD	8	0,4	MIHD	8	0,4
	MIH	0,25	0,7	MIH	0,45	0,7

Optou-se por não definir a I_{op} do 1º Escalão, função de MIH com $t_{op} = 0.1 s$, sendo que esta terá de ser superior à $I_{res_s\grave{a}def_franco}$. Face aos Regimes de Neutro verifica-se, que para o Regime Ressonante a 30 kV, este não apresenta uma parametrização de 3º Escalão, devido à função MIHD apresentar uma corrente inferior à mínima permitida para a MIH.

De notar que esta parametrização por apresentar uma I_{op} próxima da I_{res_Ass} , e sendo esta derivada dos parâmetros da rede usuais, que poderão diferir dos existentes na realidade, pode ocasionar disparos intempestivos. Pelo que deverá ser apenas utilizada para situações críticas, como é o caso de dias que apresentem um elevado risco de ocorrência Incêndio através do FWI ou de outros índices utilizados, ou para estações favoráveis à deflagração de incêndios. Pois nas restantes alturas dos anos, o contacto que possa existir com as linhas elétricas não irá pôr em risco a segurança das pessoas nem o da normal exploração da rede.

Na Tabela 5.8 apresenta-se as probabilidades de se detetarem contactos com árvores para cada parametrização sugerida no 3º escalão. É ainda indicado a probabilidade de se detetar o contacto para uma parametrização usual na Rede de Distribuição. É possível verificar que para os Regimes Impedantes, estes, apresentam probabilidades mais elevadas de se detetarem contactos com árvores. No entanto, em certas regiões estas probabilidades são inferiores a 50% como é o caso da Região do Alto Minho. Já em comparação com as parametrizações usuais, verifica-se que as parametrizações usuais praticadas não permitem uma deteção clara no momento do contacto, estando dependentes da evolução do defeito.

Antigamente, era usual a utilização de um regime de Neutro Isolado com uma $I_{op} = 0.8 A$, o que

permitia uma maior detecção de contactos, com probabilidades próximas às consideradas para o Regime Ressonante. Esta parametrização deixou de ser continuada, devido à passagem do Regime de Neutro isolado para os Neutros Impedantes, de forma a reduzir os esforços mecânicos exigidos aos isoladores, aquando da existência de defeitos fase-terra, devido a sobretensões. O outro motivo pelo qual se transitou para uma parametrização de primeiro escalão da $I_{op} = 3 A$, deve-se à Qualidade de Energia, em que existia um elevado número de interrupções relacionadas com disparos intempestivos, mas que poderão também estar correlacionadas com o toque de árvores nas linhas elétricas.

Tabela 5.8- Probabilidade de se detetar contactos entre condutores e árvores para as parametrizações sugeridas.

CDF [%]	I _{op}						
	Proposta				Usual		
	15 kV		30 kV		15 kV	30 kV	
	0,3 A	0,9 A	0,25 A	0,45 A	3 A		
Região	Algarve	74,6	12,0	76,2	77,4	0,5	0,8
	Baixo Alentejo	75,5	7,2	78,0	79,7	1,0	1,1
	Alentejo Central	85,1	6,1	87,4	88,9	1,0	1,1
	Alentejo litoral	76,1	6,9	78,9	80,8	0,4	0,5
	Alto Alentejo	80,4	7,2	83,0	84,7	0,2	0,3
	Centro Litoral	36,4	15,4	44,1	49,5	0,0	0,0
	Dão Lafões	41,8	6,3	45,9	49,0	0,1	0,1
	Beira Interior Norte	43,2	5,8	48,5	52,3	0,0	0,0
	Beira Interior Sul	60,8	12,8	63,3	65,1	0,1	0,2
	Douro	40,5	3,8	44,7	47,9	0,1	0,1
	Alto Minho	39,5	4,5	44,1	47,6	0,1	0,1
	AM LISBOA	57,4	8,0	60,9	63,4	0,2	0,2
	AM PORTO	46,6	12,6	56,3	61,4	0,1	0,2
	Baixo minho	53,3	10,4	56,3	58,5	0,1	0,2
	Barroso/Padrela	40,4	4,6	45,1	48,6	5,2	5,7
	Nordeste	65,2	2,8	68,6	71,2	0,0	0,1
	Oeste	54,0	10,5	57,2	59,5	0,2	0,3
	Pinhal Int. Norte	46,7	10,1	50,6	53,6	0,1	0,1
	Pinhal Int. sul	37,4	6,8	46,3	51,0	0,1	0,2
	Tâmega	40,8	16,5	49,6	55,4	0,1	0,3
Ribatejo	70,3	9,6	74,5	77,3	0,2	0,3	
Centro Interior	52,3	9,6	55,5	57,9	0,1	0,2	

6. Conclusão

A realização deste trabalho permitiu, por um lado, um conhecimento mais profundo das magnitudes das correntes de defeito causadas pelos contactos entre linhas e árvores, através do levantamento das resistências elétricas de espécies arbóreas presentes em Portugal, como por outro, de que forma se poderá parametrizar as funções de proteções presentes nas Unidades de Proteção, com o intuito de evitar a formação de incêndios, através da incandescência e ignição de ramos provocados pela formação de arcos ou pelo próprio efeito de joule, sem que haja a perda da propriedade seletiva da proteção.

Em termos do levantamento das resistências elétricas de árvores verificou-se diferenças substanciais nas medições entre espécies, apresentando o Pinheiro-Bravo valores bastante superiores às restantes. Estes dados também corroboram estudos anteriores, onde foram medidos valores superiores em espécies pertencentes ao grupo das gimnospérmicas do que em espécies angiospérmicas. Constatou-se ainda que nas medições realizadas a Pinheiros-Bravos em condições deficientes, comumente designado por Pinheiro-Bravo seco, estes ultrapassavam a escala do Ohmímetro utilizado, sendo impossível a sua leitura exata para alturas idênticas às das restantes amostras. Este aumento significativo da resistência deve-se ao facto do Pinheiro-Bravo, quando em contacto com o Nemátodo da Madeira do Pinheiro (NMP), um verme microscópico, acaba por não produzir compostos orgânicos, como a resina, além dos seus ramos se tornarem quebradiços e levando à secura total da copa. A diminuição e a perda completa da produção de compostos orgânicos tornam a madeira mais resistiva.

Tanto o caso de árvores, que apresentam pequenos diâmetros, como o caso dos Pinheiros-Bravos secos são casos bastante alarmantes, devido à fragilidade que apresentam, podendo com a ação do vento tombar para cima dos condutores, e à sua característica elétrica ser extremamente resistiva, criando assim as condições favoráveis para a formação de incêndios, pelo que deverão de ser um dos principais focos para as equipas responsáveis pela manutenção da faixa de proteção. Outro foco que se deverá ter, prende-se com a remoção de Pinheiros-Bravos e com a proibição da plantação dos mesmos nas proximidades de condutores, devido ao elevado risco que apresenta, tendo em conta a sua característica resistiva.

Quanto à parametrização definida optou-se por se utilizar dois escalões, um MIH e outro MIHD, coordenados temporalmente, de forma a obter a segurança necessária para a deteção de contactos. Em que o escalão respeitante à MIH, apresenta sensibilidade necessária para a deteção de certos contactos que possam surgir, e o uso da MIHD permite assegurar a seletividade, inibindo a atuação do relé a correntes residuais de linhas sã acima da I_{op} parametrizado no escalão MIH. Face aos contactos detetados por região, verifica-se que não é possível uma deteção completa de todos os contactos devido às limitações impostas tanto pelas assimetrias da rede como pelos erros resultantes dos transformadores de medida e da UP. Por outro lado, sendo que a resistividade da árvore diminui com a persistência do contacto, a corrente de defeito irá também aumentar, pelo que as probabilidades de se detetarem contactos irão também aumentar.

Esta parametrização, no entanto, é definida para cenários ideais, em que as linhas apresentam extensões idênticas entre si e como tal as suas capacidades também serão iguais, podendo por vezes não corresponder à realidade, pelo desenvolvimento desequilibrado dos pontos de consumo em redor da SE ou derivado de manobras por parte dos operadores, em que existe alimentação das saídas por recurso. Estas situações poderão resultar em faltas de seletividade para as parametrizações sugeridas, pelo que se sugere apenas a adoção das mesmas em dias onde é indicado um elevado índice de perigo de incêndio emitido pela Proteção Civil. Nos restantes dias, a parametrização usual é aconselhável, pois o contacto entre árvores e linhas elétricas não irá originar incêndios nem irá por em causa a segurança das pessoas nem o normal funcionamento da rede, e como tal não existe a necessidade de piorar a qualidade de serviço, que poderia acontecer caso se se mantivesse apenas a parametrização sugerida.

6.1. Melhorias e Trabalho Futuro

De forma a obter valores de resistências elétricas de árvores mais verossímeis com os que poderão entrar em contacto com os condutores e que possam permitir uma maior exatidão das correntes de defeito resultantes desses mesmos contactos, será necessário um levantamento de dados, com um maior número de amostras por espécie, além da medição das mesmas a alturas superiores, mais próximas das alturas a que estão erguidos os condutores.

Tendo em conta, as diferenças obtidas de região para região, seria importante uma atualização dos dados relativos às presenças de espécie em cada região, além da identificação das linhas elétricas que intersectam zonas florestais e, também, das espécies mais frequentes nessas zonas. Podendo nesses, casos parametrizar as proteções consoante as espécies arbóreas existentes.

A condução de experiências elétricas, como a indução de um contacto entre um condutor e um ramo de uma árvore, de uma forma vigiada e monitorizada, com o intuito de verificar a evolução da corrente de defeito ao longo do tempo e o aumento da temperatura do ramo, até que o mesmo se incendeie ou até que as proteções sejam despoletadas, tornar-se-ia benéfica, pois permite um conhecimento do tempo de duração máximo que o contacto poderá ter e poderá ser útil para a parametrização da curva de tempo inverso da função de Máximo de Intensidade Homopolar, garantido desta forma a seletividade.

7. Referências

- [1] J. S. Coutinho, 'Materiais de Construção 1- Madeiras', Universidade do Porto, Porto, 1999.
- [2] T. Repo, J. Laukkanen, and R. Silvennoinen, 'Measurement of the tree root growth using electrical impedance spectroscopy', *Silva Fenn.*, vol. 39, no. 2, pp. 159–166, 2005.
- [3] P. Pakonen, 'Characteristics of partial discharges caused by trees in contact with covered conductor lines', *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 6, pp. 1626–1633, 2008.
- [4] A. J. Stamm, 'The Electrical Resistance of Wood as a Measure of Its Moisture Content', *Ind. Eng. Chem.*, vol. 19, no. 9, pp. 1021–1025, 1927.
- [5] C. Skaar, 'Electrical Properties of Wood', *Wood-Water Relations*, pp. 207–262, 1988.
- [6] M. Fredriksson, 'Methods for determination of moisture conditions in wood exposed to high moisture levels', Lund University, 2010.
- [7] R. F. Vermaas, 'D.C. Resistance Moisture Meters for Wood Part I: Review of Some Fundamental Considerations', *South African For. J.*, vol. 121, no. 1, pp. 88–92, 1982.
- [8] S. R. Cieslewicz and R. Novembri, 'Utility vegetation management final report', *Fed. Energy Regul. Comm. Comm. to Support Fed. Investig. August*, vol. 14, no. March, p. 128, 2004.
- [9] J. A. Wischkaemper, C. L. Benner, and B. D. Russell, 'Electrical characterization of vegetation contacts with distribution conductors - Investigation of progressive fault behavior', *Transm. Distrib. Expo. Conf. 2008 IEEE PES Powering Towar. Futur. PIMS 2008*, pp. 1–8, 2008.
- [10] K. L. Butler, B. D. Russell, C. Benner, and K. Andoh, 'Characterization of electrical incipient fault signature resulting from tree contact with electric distribution feeders', *1999 IEEE Power Eng. Soc. Summer Meet. PES 1999 - Conf. Proc.*, vol. 1, pp. 408–413, 1999.
- [11] B. K. E. Finch and E. Consultants, 'How Trees Cause Outages Understanding Tree Caused Outages : The Research', pp. 1–7.
- [12] G. of W. A. Energy Safety WA; Department of Consumer and Employment Protection, 'ELECTRICAL INCIDENT REPORT POWER LINE FAULT AND BUSH FIRE NEAR BRINDLE ROAD , PARKERVILLE WESTERN AUSTRALIA', no. JANUARY, 2008.
- [13] M. Chrisman, 'FIRE PREVENTION Field Guide', 2008.
- [14] B. William, B. Most, and S. Weissman, 'Trees and Power Lines : Minimizing Conflicts between Electric Power Infrastructure and the Urban Forest', 2012.
- [15] D. X. Viegas *et al.*, 'Os Grandes Incêndios Florestais e os Acidentes Mortais Ocorridos em 2013', 2013.
- [16] J. Mitchell, 'Power lines and catastrophic wildland fire in Southern California', *Fire Mater. Conf. San Fr. CA*, no. October 2007, 2009.

- [17] 'Utilities Cut Power to Prevent Wildfires. But Who Wins When the Lights Go Out? - The New York Times'. [Online]. Available: https://www.nytimes.com/2018/10/15/business/energy-environment/california-blackout-fires.html?emc=edit_th_181017&nl=todaysheadlines&nid=285819421017. [Accessed: 16-Mar-2019].
- [18] A. Camia, T. Durrant, and J. San-Miguel Ayanz, 'Harmonized classification scheme of fire causes in the EU adopted for the European Fire Database of EFFIS', *EUR - Sci. Tech. Res. Reports*, pp. 1–51, 2013.
- [19] EDP S.A., 'Caracterização das Redes de Distribuição', Lisboa, 2017.
- [20] M. da Justiça, 'Decreto Regulamentar n.º 1/92', *Diário da República n.º 41/1992, Série I-B de 1992-02-18*, 2018. [Online]. Available: <https://data.dre.pt/eli/decregul/1/1992/02/18/p/dre/pt/html>.
- [21] REN, 'Servidão de linhas de transporte de eletricidade', Lisboa, 2016.
- [22] J. L. Pinto De Sá, 'Textos de apoio à cadeira de Protecções e Automação em Sistemas de Energia', Lisboa, 1993, p. 87.
- [23] M. Tawfeeq and L. Alzuhairi, 'Power System Protection Overcurrent Protective Relays Overcurrent relays Types', .
- [24] EFACEC Sistemas de Electrónica;, 'Unidade Terminal de Protecção de Distância e de Controlo de Linhas'.
- [25] M. Louro, 'O sistema de protecções na perspectiva da segurança de pessoas em redes de MT', Instituto Superior Técnico, 2008.
- [26] K. W. Jones, 'Addressing window type transformer proximity errors', *2006 59th Annu. Conf. Prot. Relay Eng.*, vol. 2006, pp. 90–102, 2006.
- [27] Abc, 'THEORY AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENT TRANSFORMERS Moving together'.
- [28] M. Louro, 'On CT errors at low currents', Lisboa, 2008.
- [29] Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas;Ministério da Agricultura do Mar do Ambiente e do Ordenamento do Território, '6º Inventário Florestal Nacional', 2013.
- [30] US Bureau of Labor Statistics, 'Forestry and Logging', *Ind. a Glance*, no. August 2017, pp. 1–10, 2012.
- [31] D. R. nº 1/92 de 18 de Fevereiro, 'Ministério da Indústria e Energia. Diário da República'. 2012.
- [32] ERENA, WAYMOTION, Instituto Superior de Agronomia, and Direção-Geral dos Recursos Florestais, 'Programa Regional de Ordenamento Florestal do Centro Interior', 2017.
- [33] Direção-Geral dos Recursos Florestais;Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas;, 'Plano Regional de Ordenamento Florestal do Pinhal Interior Sul'.
- [34] Direção-Geral dos Recursos Florestais;Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas;, 'Plano Regional de Ordenamento Florestal do Alentejo Litoral'.

- [35] Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Direção Regional de Agricultura de Entre Douro e Minho, and Direção-Geral dos Recursos Florestais, 'Bases de ordenamento do Plano Regional de Ordenamento Florestal do Alto Minho', 2006.
- [36] Direção-Geral dos Recursos Florestais;Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas, 'Plano Regional de Ordenamento Florestal do Ribatejo', 2001.
- [37] Direção Regional de Agricultura de Entre Douro e Minho, Direção-Geral dos Recursos Florestais, and Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas, 'Plano Regional de Ordenamento Florestal do B a i x o Minho', 2006.
- [38] Direção-Geral dos Recursos Florestais and Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas, 'Plano Regional de Ordenamento do Território da Área Metropolitana de Lisboa', 2009.
- [39] Direção-Geral dos Recursos Florestais and Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas, 'Plano Regional de Ordenamento Florestal do Centro Litoral', 2006.
- [40] Direção-Geral dos Recursos Florestais and Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas, 'Plano Regional de Ordenamento Florestal do Pinhal Interior No'.
- [41] Direção-Geral dos Recursos Florestais and Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas, 'Plano Regional de Ordenamento Florestal do Barroso Padrela', 2006.
- [42] Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas, 'Plano Regional de Ordenamento Florestal – Área Metropolitana de Lisboa - Bases de Ordenamento -', pp. 0–179.
- [43] Direção Regional de Agricultura de Entre Douro e Minho, Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas, and Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 'Plano Regional de Ordenamento Florestal do T â m e g a', 2006.
- [44] Direção-Geral dos Recursos Florestais, Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas, and Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 'Plano Regional de Ordenamento Florestal da Área Metropolitana do Porto e Entre Douro e Vouga', 2006.
- [45] Direção-Geral dos Recursos Florestais and Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas, 'Plano Regional de Ordenamento Florestal da Beira Interior Sul'.
- [46] Direção-Geral dos Recursos Florestais and Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 'Plano Regional de Ordenamento Florestal do Douro', 2006.
- [47] Direção-Geral dos Recursos Florestais and Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas, 'PLANO REGIONAL DE ORDENAMENTO FLORESTAL DO RIBATEJO, Bases de Ordenamento'.
- [48] Direção-Geral dos Recursos Florestais and Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 'Plano Regional de Ordenamento Florestal do Nordeste', 2006.
- [49] Direção-Geral dos Recursos Florestais, 'Plano Regional de Ordenamento Florestal do Centro Litoral - Plano', 2006.

- [50] Direção-Geral dos Recursos Florestais and Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas, 'Plano Regional de Ordenamento Florestal do Baixo Alentejo', 1999.
- [51] ERENA, WAYMOTION, DOISECO, Instituto Superior de Agronomia, Florestais, and D.-G. dos Recursos, 'Plano Regional de Ordenamento Florestal do Centro Litoral', 2018.
- [52] Direção-Geral dos Recursos Florestais and Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas, 'Plano Regional de Ordenamento Florestal da Beira Interior Norte'.
- [53] Direção-Geral dos Recursos Florestais and Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas, 'Plano Regional de Ordenamento Florestal de Dão-Lafões'.
- [54] Direção-Geral dos Recursos Florestais and Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas, 'Plano Regional de Ordenamento Florestal do Algarve - PROF Algarve', 2006.
- [55] A. M. Alves, J. S. Pereira, and J. M. N. Silva, 'A introdução e a expansão do eucalipto em Portugal', *O Eucalipto em Port. Impactes Ambient. e Investig. Científica*, no. January 2007, pp. 13–24, 2007.
- [56] D. X. Viegas *et al.*, 'O complexo de Incêndios de Pedrogão Grande e Concelhos Limítrofes, Iniciado a 17 de Junho de 2017', Coimbra, 2017.
- [57] 'IPMA - Clima Normais'. [Online]. Available: <http://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/>. [Accessed: 24-Apr-2019].
- [58] Agência Portuguesa do Ambiente, 'APA - Políticas & Alterações Climáticas & Adaptação &'; [Online]. Available: <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=81&sub2ref=118&sub3ref=393>. [Accessed: 25-Apr-2019].
- [59] Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 'Boletim Climatológico Sazonal Verão 2018', 2018.
- [60] Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 'Metodologia de Cálculo do Índice de Risco de Incêndio Florestal (RCM)', 2002.
- [61] C. Gouveia, I. Novo, L. Bugalho, P. Silva, Á. Silva, and T. Cota, 'Relatório Técnico- Apoio Meteorológico à prevenção e combate aos Incêndios Florestais', Lisboa, 2018.
- [62] E. M. Gora, P. M. Bitzer, J. C. Burchfield, S. A. Schnitzer, and S. P. Yanoviak, 'Effects of lightning on trees: A predictive model based on in situ electrical resistivity', *Ecol. Evol.*, vol. 7, no. 20, pp. 8523–8534, 2017.
- [63] P. Aleixo, 'Características operacionais ótimas de proteções direcionais de sobre-intensidade homopolar', Instituto Superior Técnico, 2017.
- [64] SIEMENS, 'SIPROTEC 4 Multi-Functional Protec- tive Relay with Local Control 7SJ62/64 Manual', 2016.

Anexo A

Tabela A.1- Parâmetros das Funções Probabilidade para cada Região

Região	$\mu_1[\Omega]$	$\sigma_1[\Omega]$	$\mu_2[\Omega]$	$\sigma_2[\Omega]$	Neg. Log Likelihood	Contributo dist 1 [%]	Contributo dist 2 [%]
Oeste	14185,2	1,71E+07	54985,0	1,08E+09	1007,5	42,2	57,8
Pinhal Interior Sul	62857,0	9,01E+08	22750,0	1,15E+09	1723,8	58,0	42,0
Alentejo Central	14876,0	4,64E+05	31373,0	7,84E+08	1652,3	27,8	72,2
Dão/Lafões	14378,6	1.5e+07	55257,1	7.06e+08	2042	30,7	69,3
Baixo Minho	57267,3	1.2e+09	14880,7	2.28e+07	1336,4	58,6	41,4
Pinhal Int. Norte	12815,2	1.3e+07	53779,0	7.51e+08	1804,8	34,8	65,2
Alto Minho	14604,7	6.08e+06	53232,8	7.32e+08	9039,6	25,9	74,1
A.M. Porto	38300,9	7.05e+08	147582,5	9.08e+09	1292,9	95,8	4,2
Tamega	165960,4	1.18e+10	34114,7	6.46e+08	1274,0	3,1	96,9
Algarve	13594,7	1.30e+07	56942,9	1.21e+09	975,3	67,8	32,2
Baixo Alentejo	14778,6	5.49e+05	40650,1	1.20e+09	991,1	61,3	38,7
Alentejo Litoral	14796,4	4.47e+05	38217,8	9.66e+08	2410,6	61,3	38,7
Alto Alentejo	34175,6	9.18e+08	14749,8	4.77e+05	2163,6	34,5	65,5
Centro Litoral	219442,6	4.60e+10	38444,5	7.95e+08	7319,7	2,0	98,0
Beira Int. Norte	48135,9	7.31e+08	14821,1	4.06e+05	1799,4	74,6	25,4
Beira Int. Sul	13467,0	1.10e+07	55230,5	1.67e+09	1888,4	47,1	52,9
Douro	14534,6	6.29e+05	54986,8	7.81e+08	1130,9	27,9	72,1
A.M. Lisboa	14526,3	1.08e+06	48327,0	1.22e+09	1071,7	40,1	59,9
Barroso/ Padrela	14902,8	4.30e+05	52379,9	7.72e+08	1165,2	25,7	74,3
Nordeste	47474,2	6.03e+08	14723,2	4.67e+05	1283,0	44,9	55,1
Ribatejo	14735,1	6.54e+05	34587,0	7.88e+08	3313,5	48,8	51,2
Centro Intrerior	13257,4	9.73e+06	56082,3	1.08e+09	2427,3	40,2	59,8

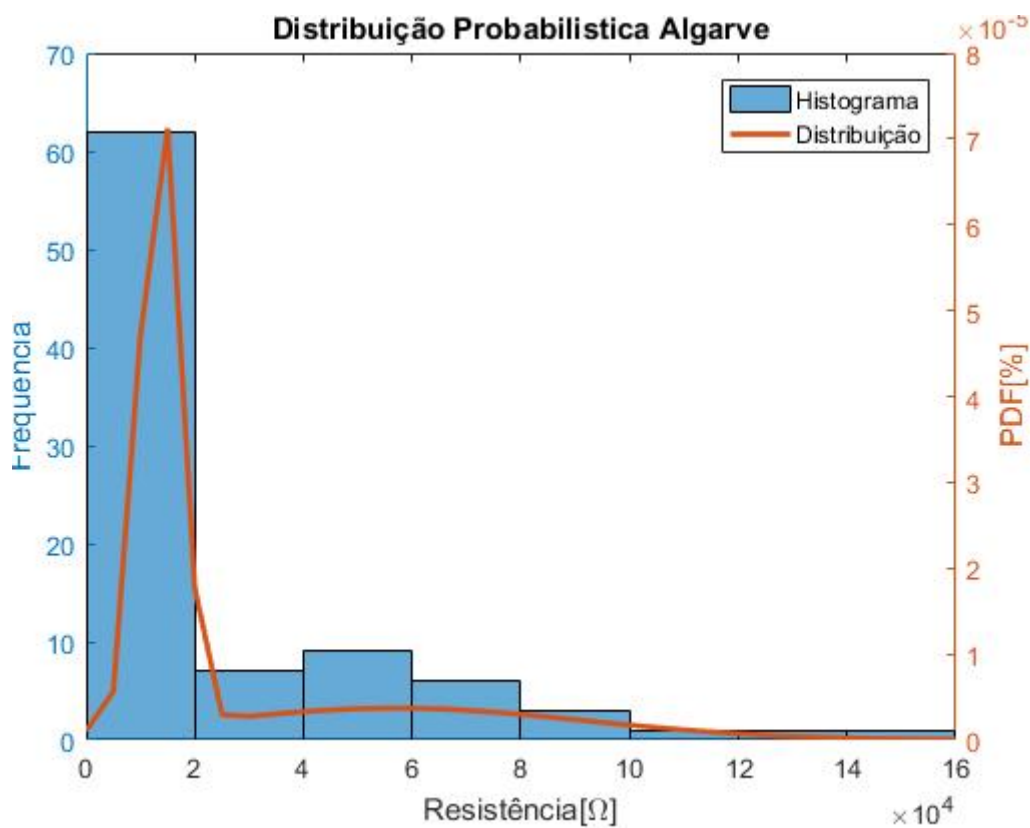


Figura A.1- Distribuição Probabilística da região do Algarve

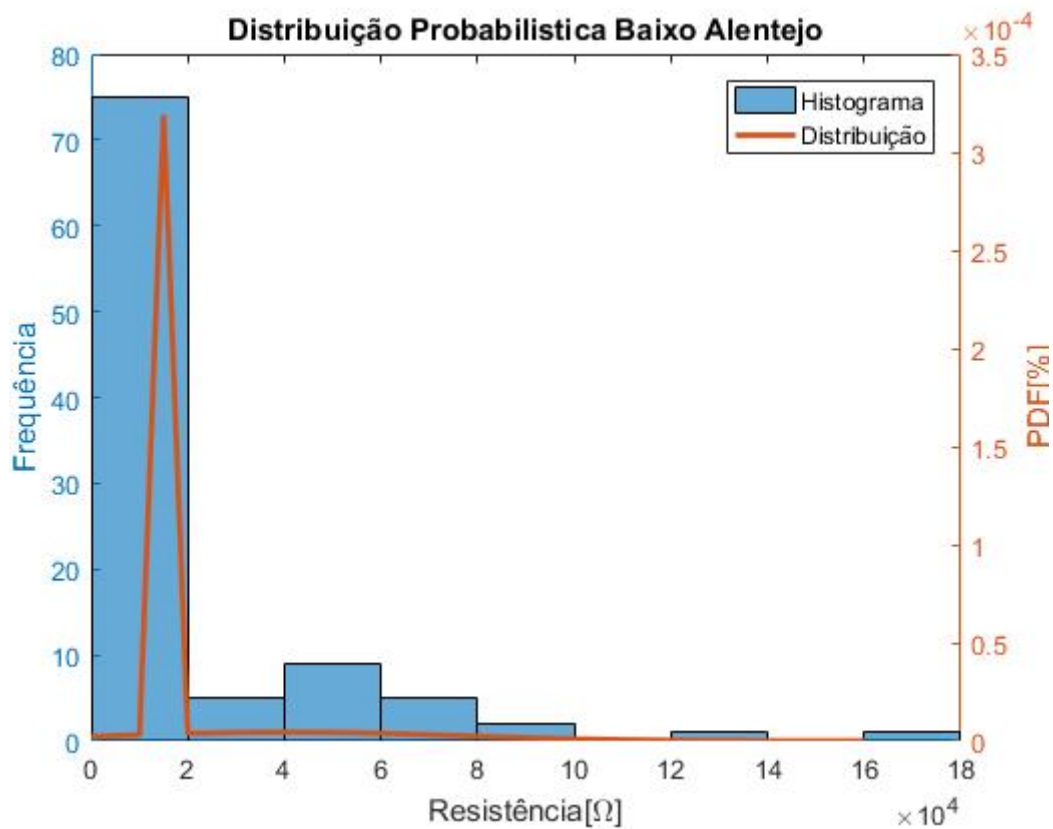


Figura A.2- Distribuição Probabilística da região do Baixo Alentejo

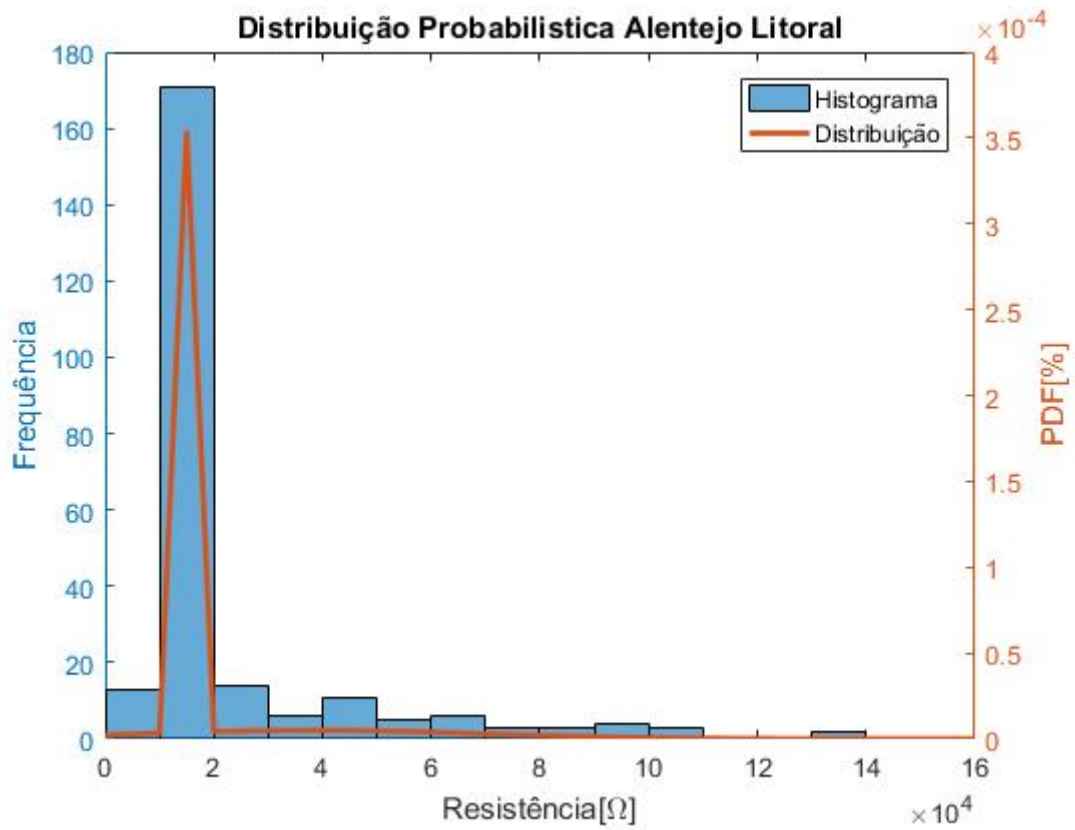


Figura A.3- Distribuição probabilística da região do Alentejo Litoral

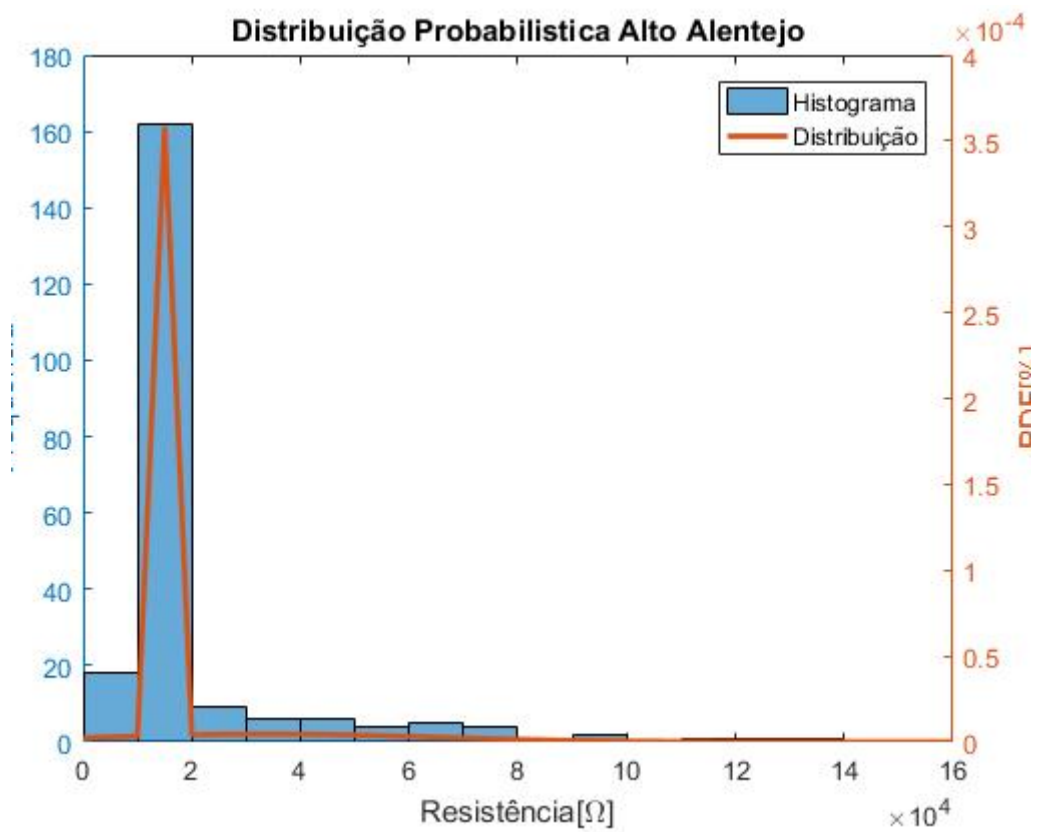


Figura A.4- Distribuição probabilística da região do Alto Alentejo

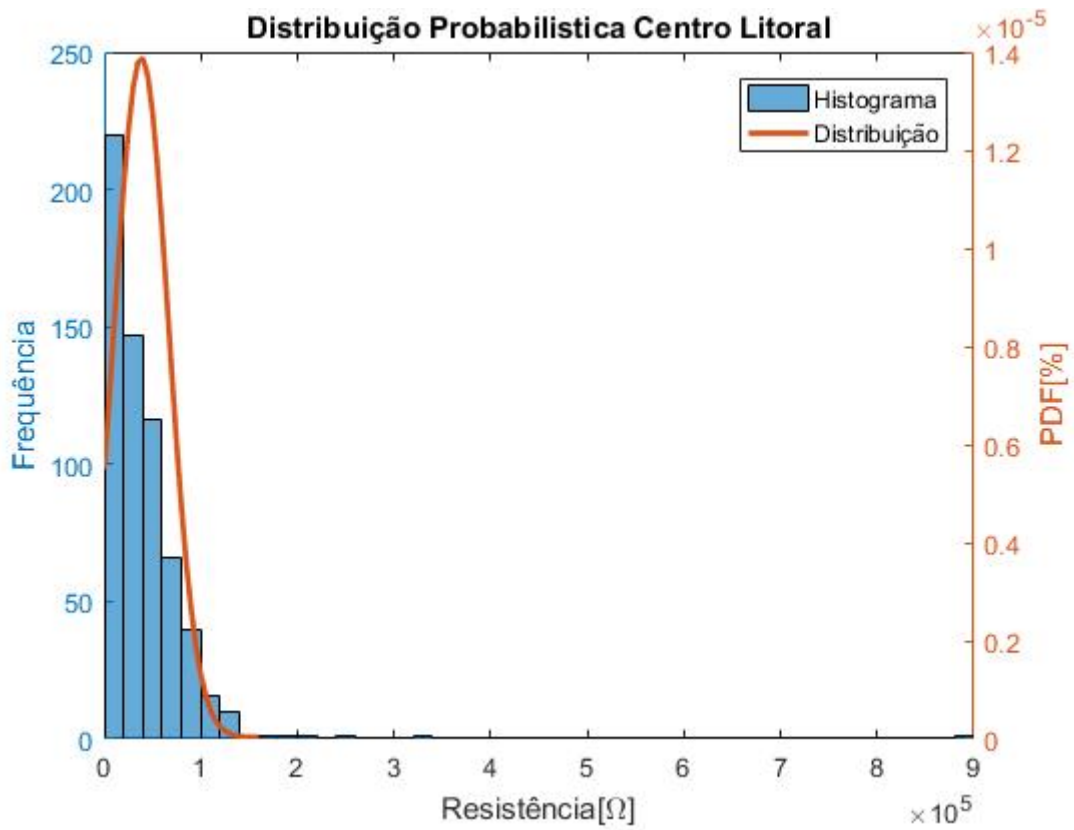


Figura A.5- Distribuição probabilística da Região do Centro Litoral

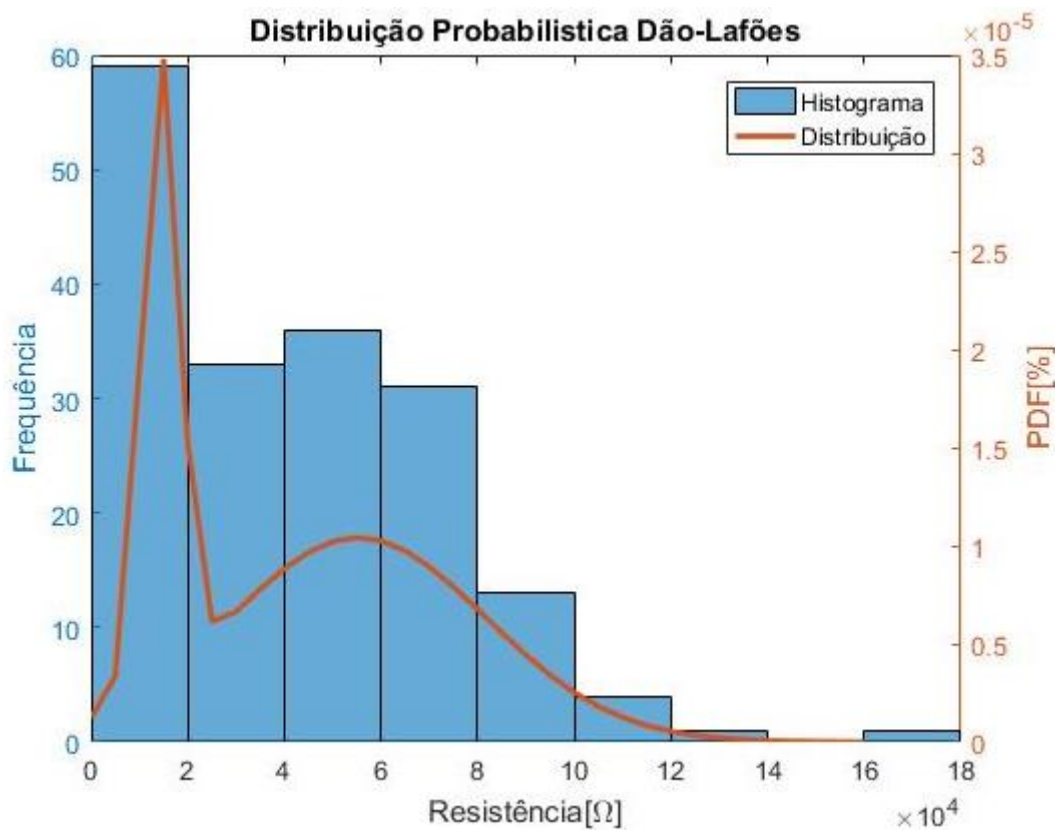


Figura A.6- Distribuição Probabilística da Região Dão-Lafões

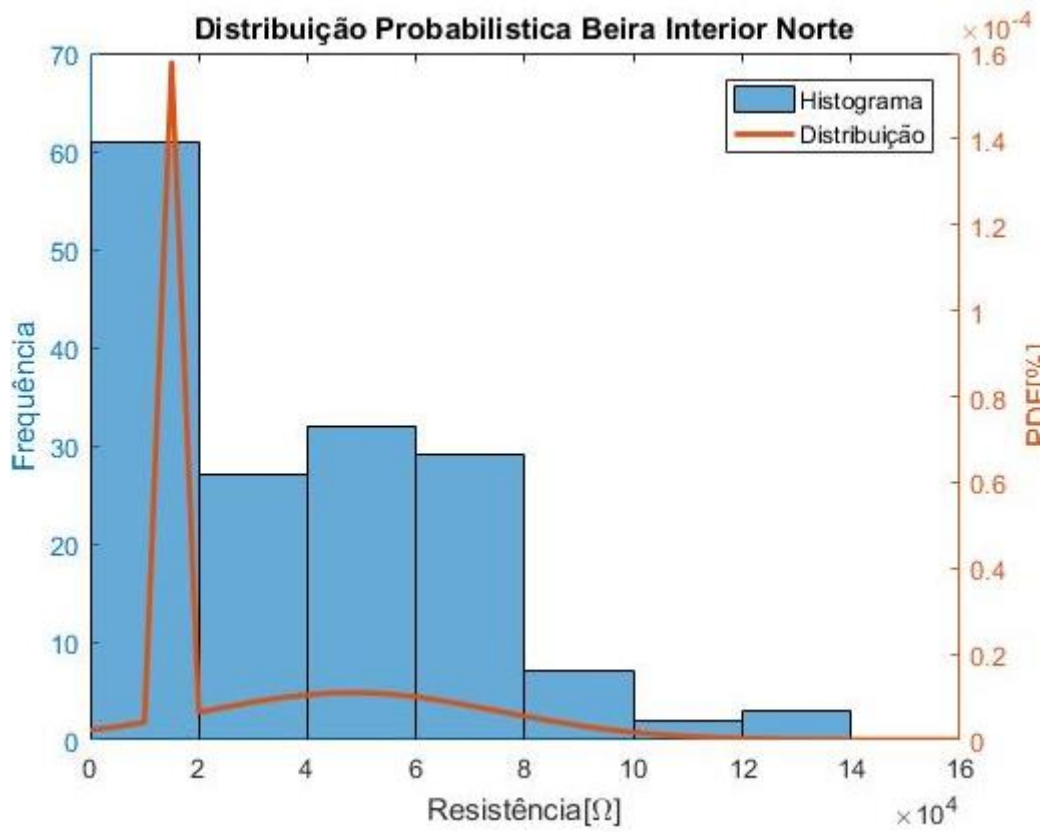


Figura A.7- Distribuição Probabilística da Região da Beira Interior Norte

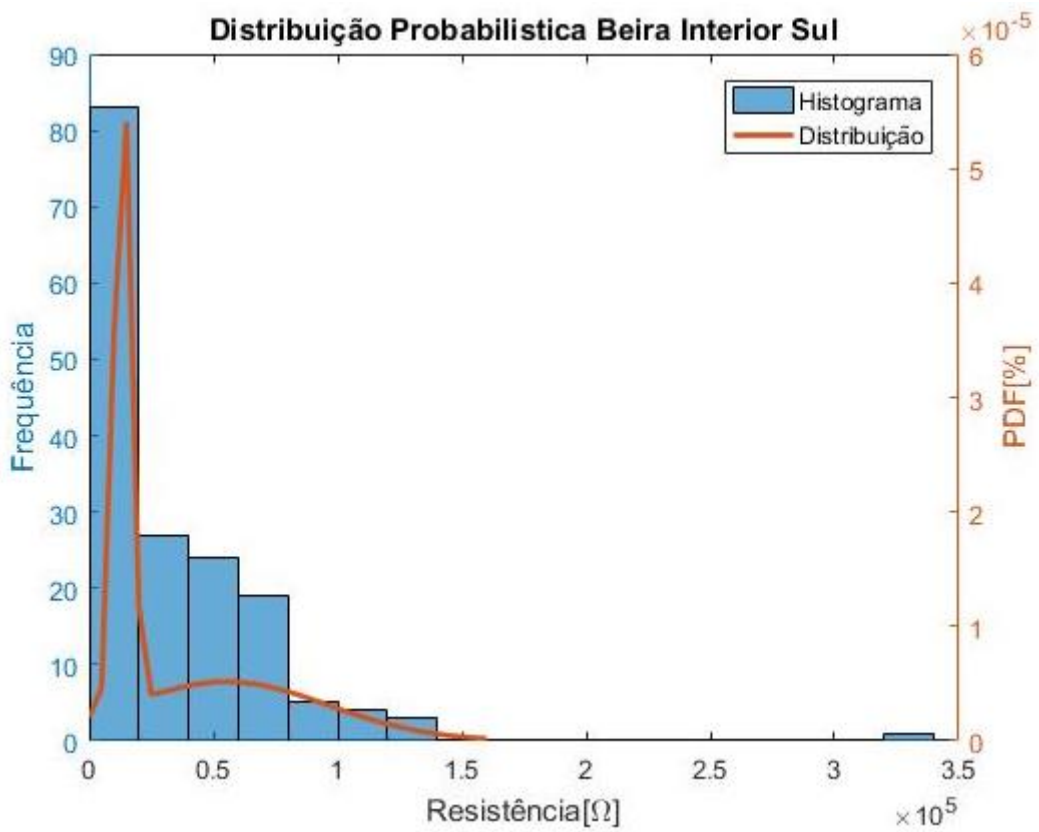


Figura A.8- Distribuição Probabilística da Região Beira Interior Sul

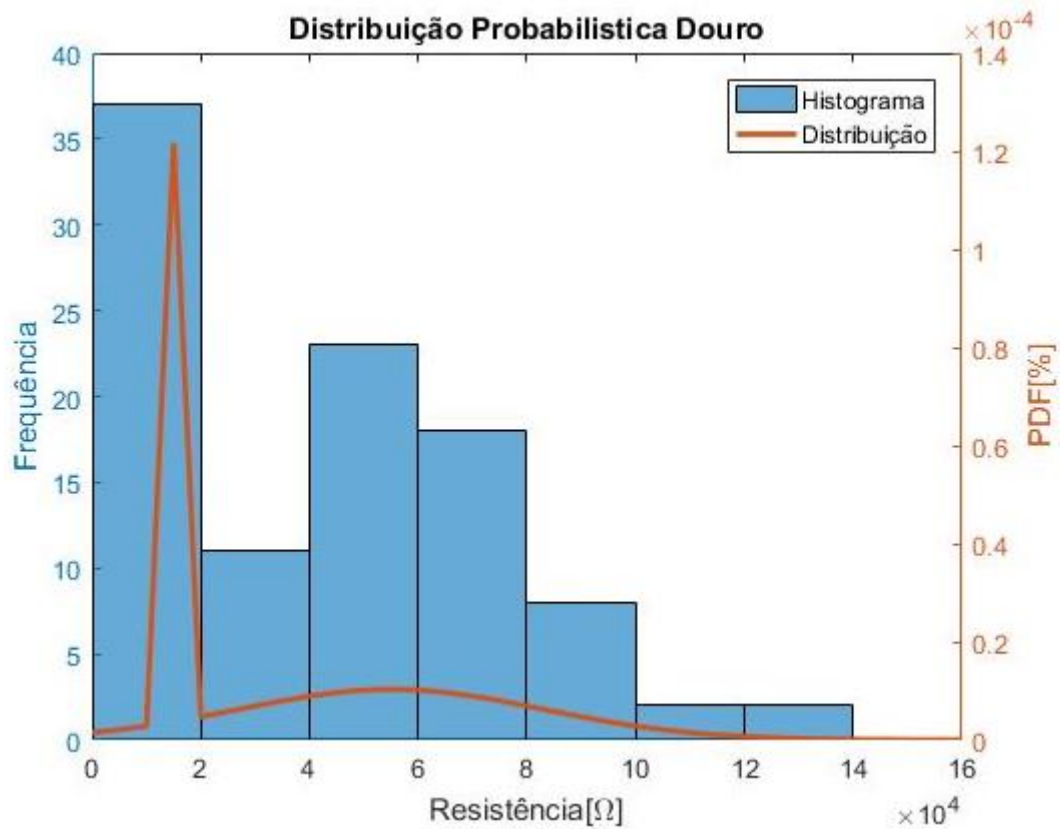


Figura A.9- Distribuição Probabilística da Região do Douro

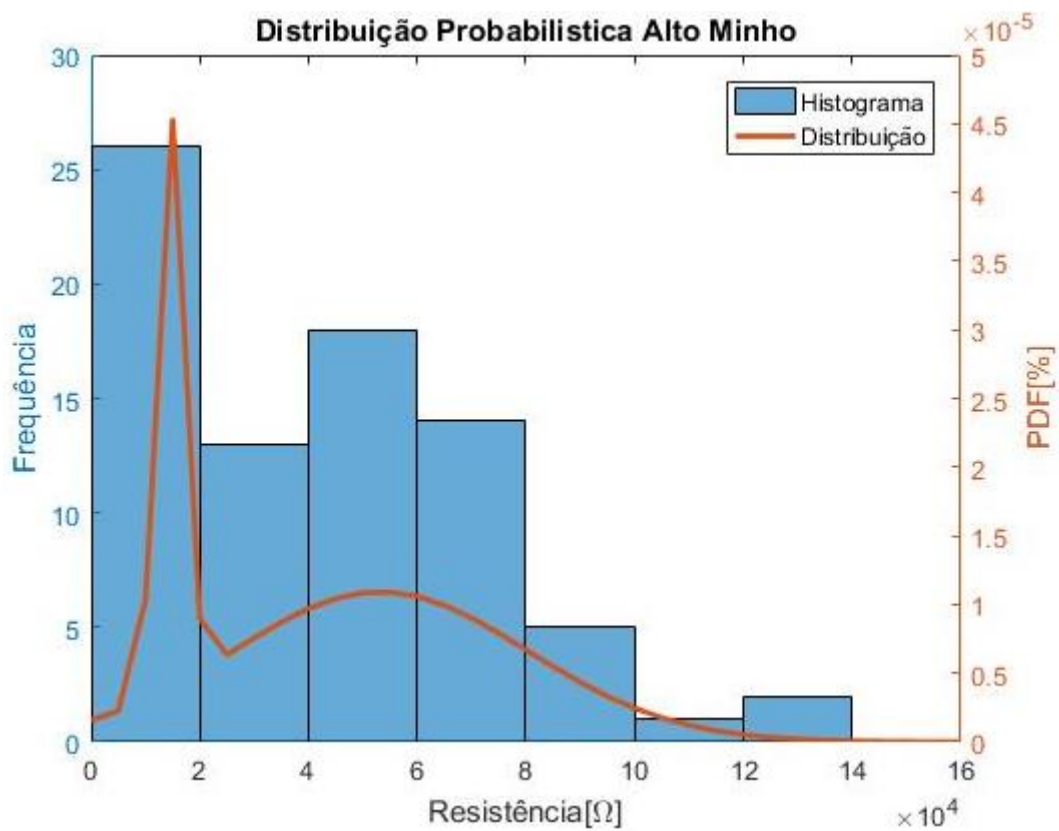


Figura A.10- Distribuição Probabilística da Região do Alto Minho

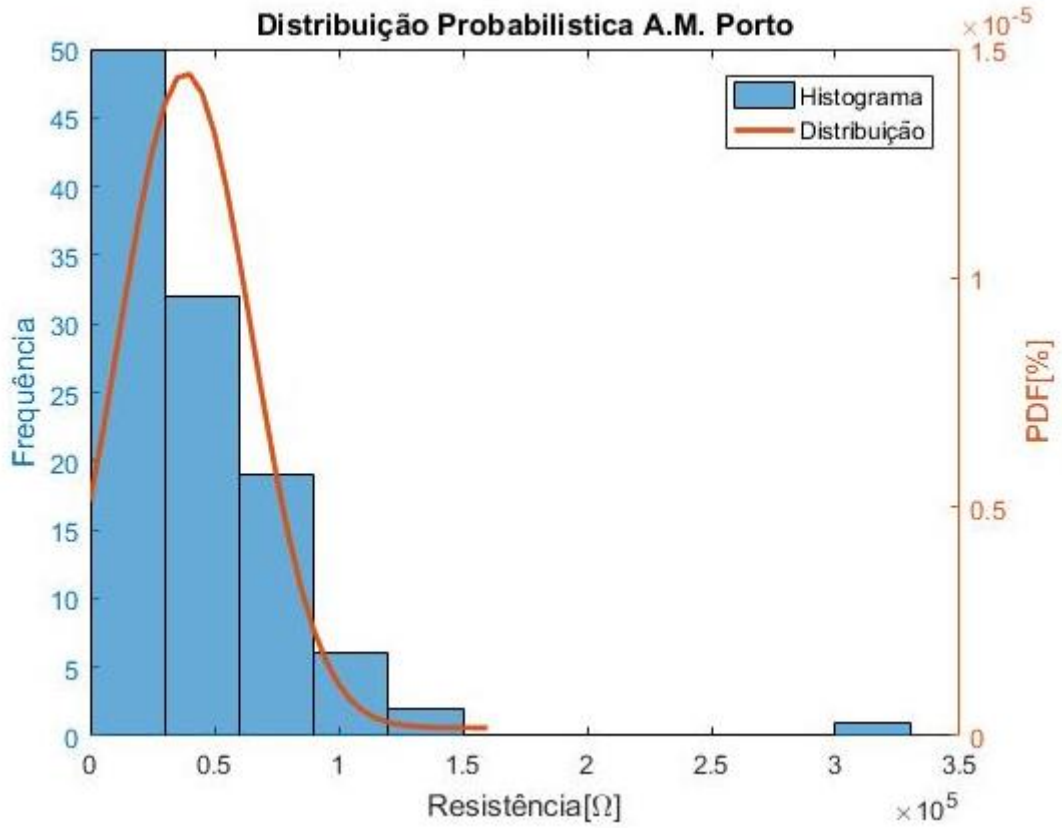


Figura A.11- Distribuição Probabilística da Região A.M. Porto

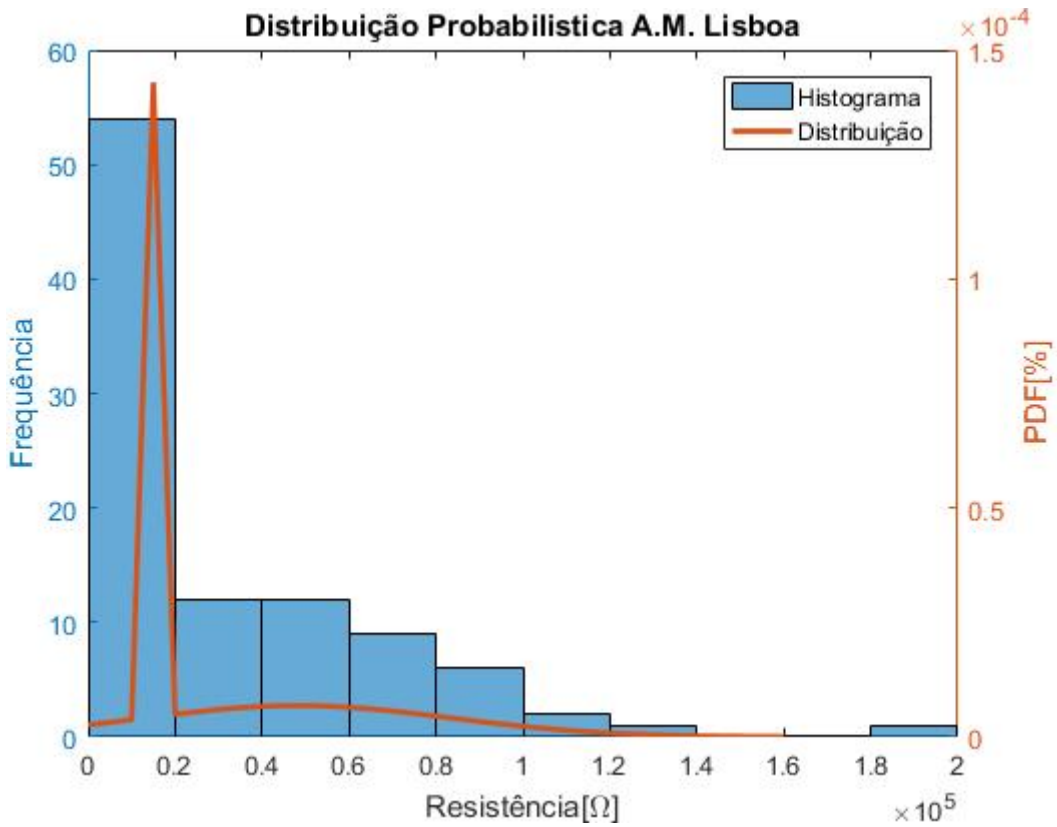


Figura A.12- Distribuição Probabilística da Região da A.M. Lisboa

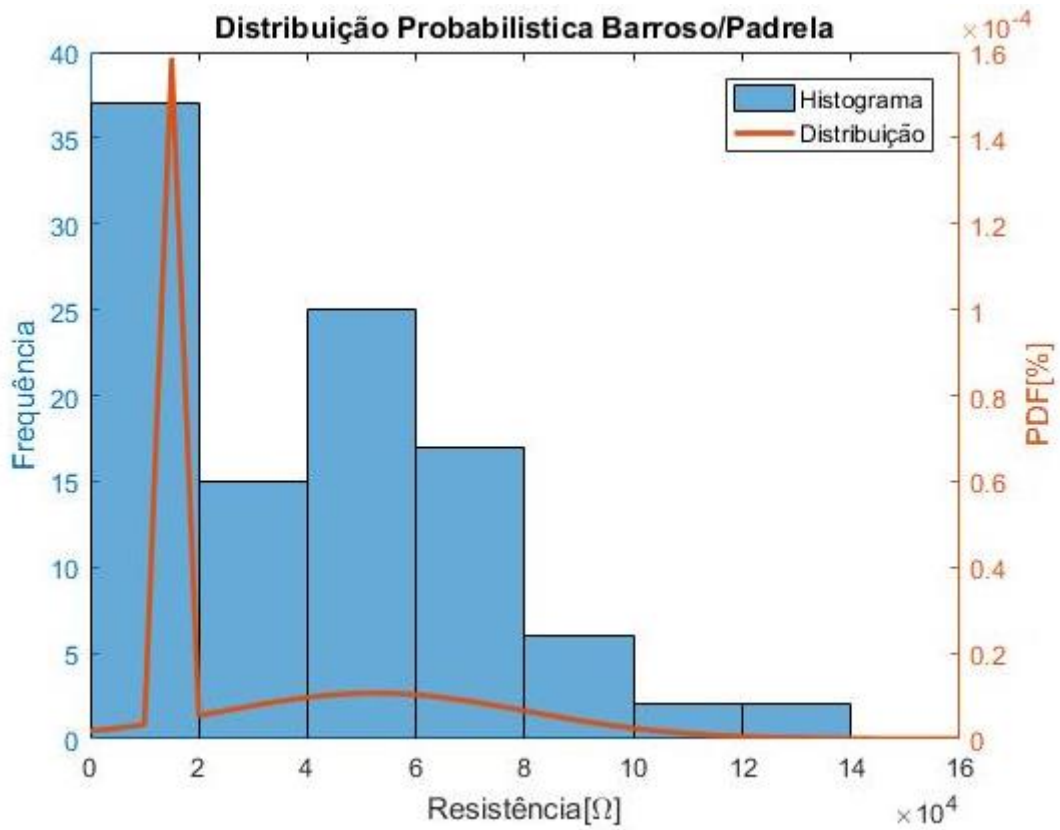


Figura A.13- Distribuição Probabilística da Região do Barroso/Padrela

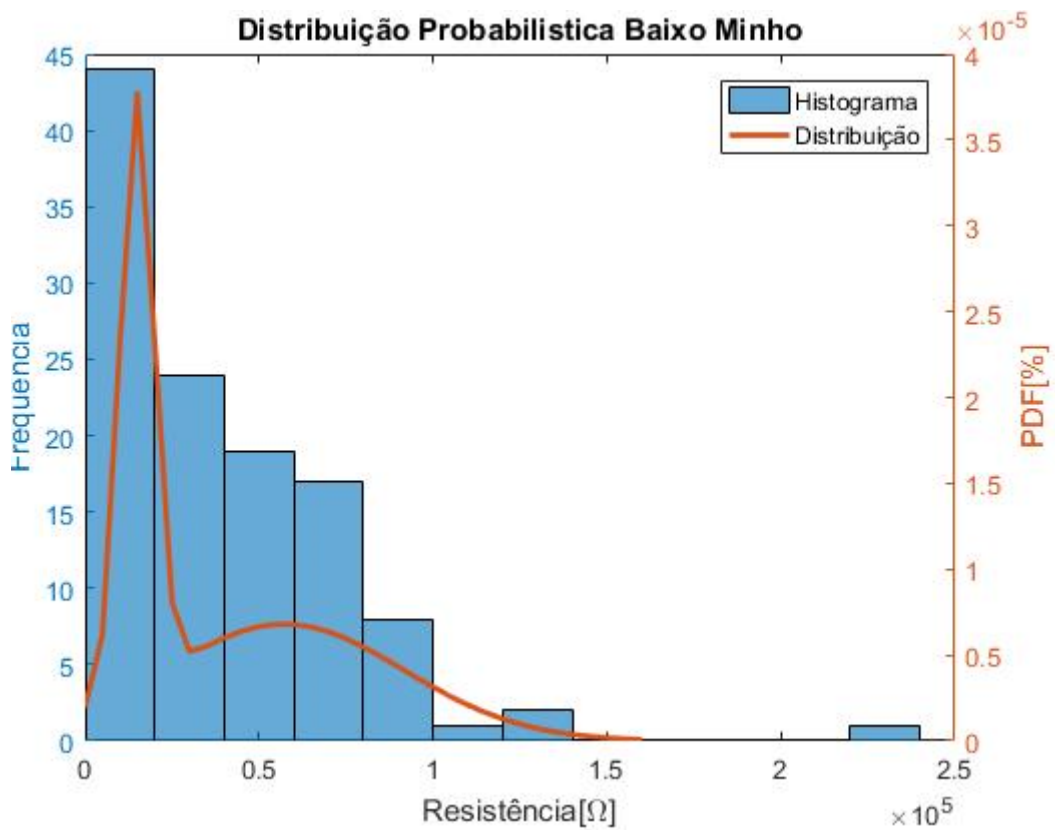


Figura A.14- Distribuição Probabilística da Região do Baixo Minho

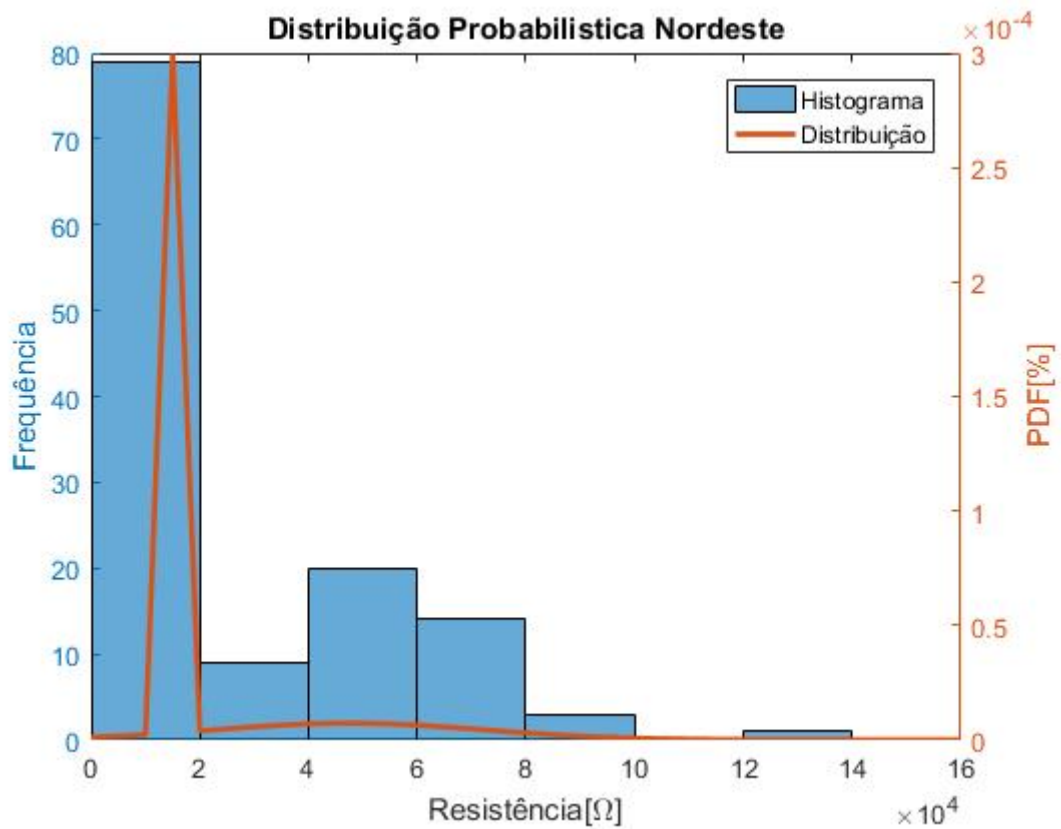


Figura A.15- Distribuição Probabilística da Região do Nordeste

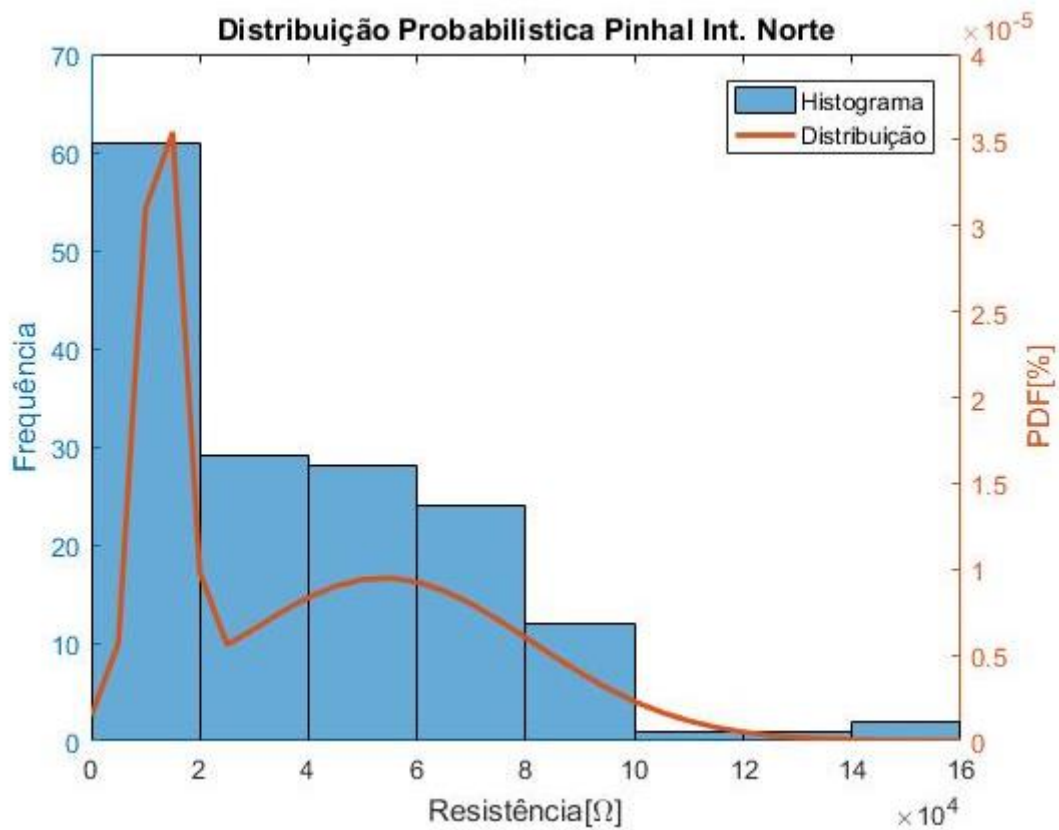


Figura A.16- Distribuição Probabilística da Região do Pinhal Interior Norte

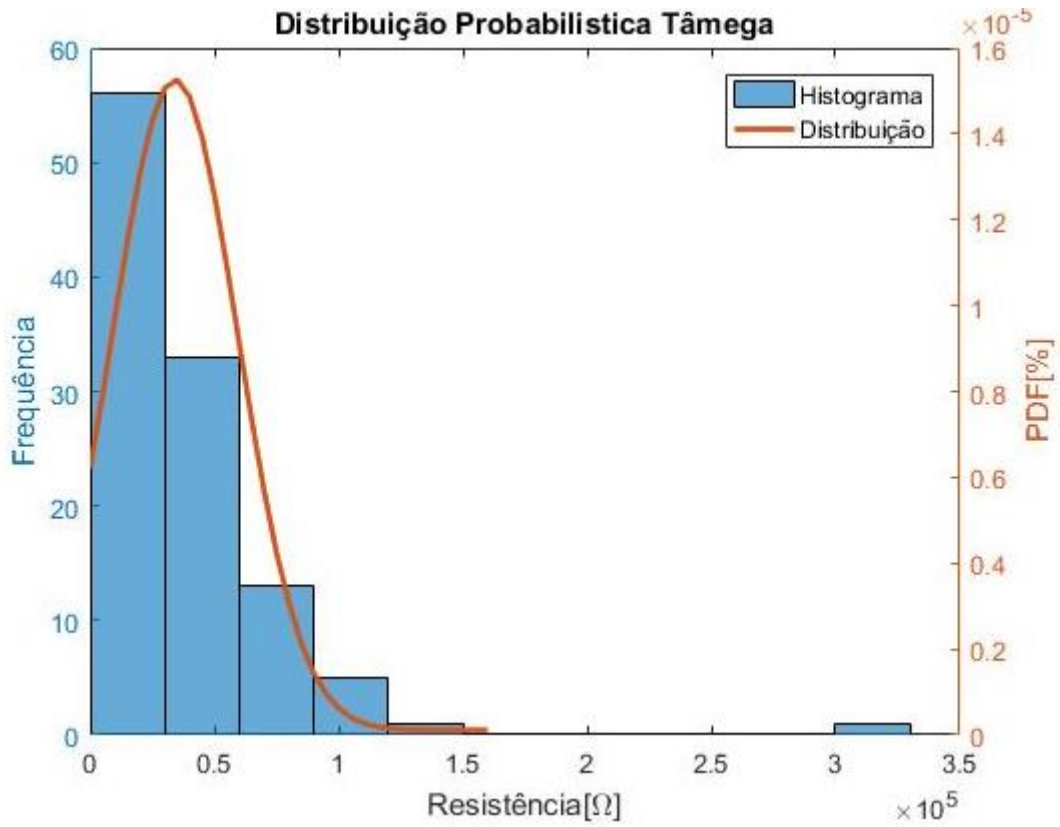


Figura A.17- Distribuição Probabilística da Região do Tâmega

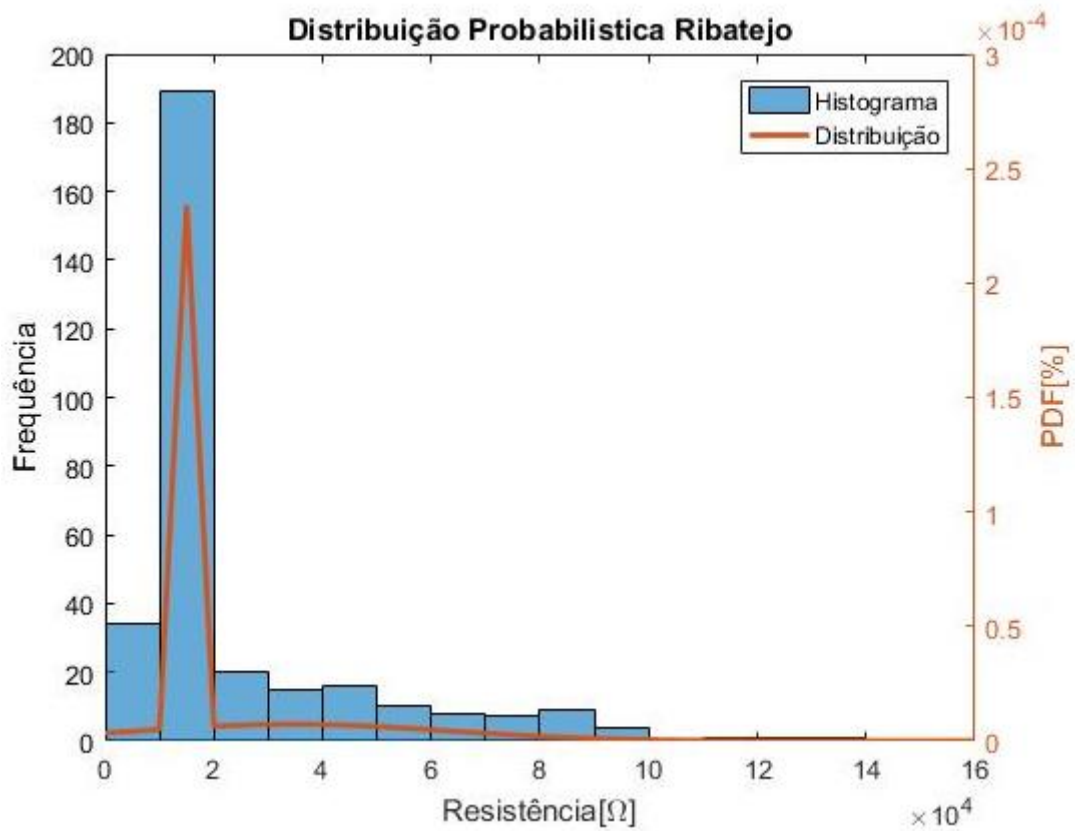


Figura A.18- Distribuição Probabilística do Região do Ribatejo

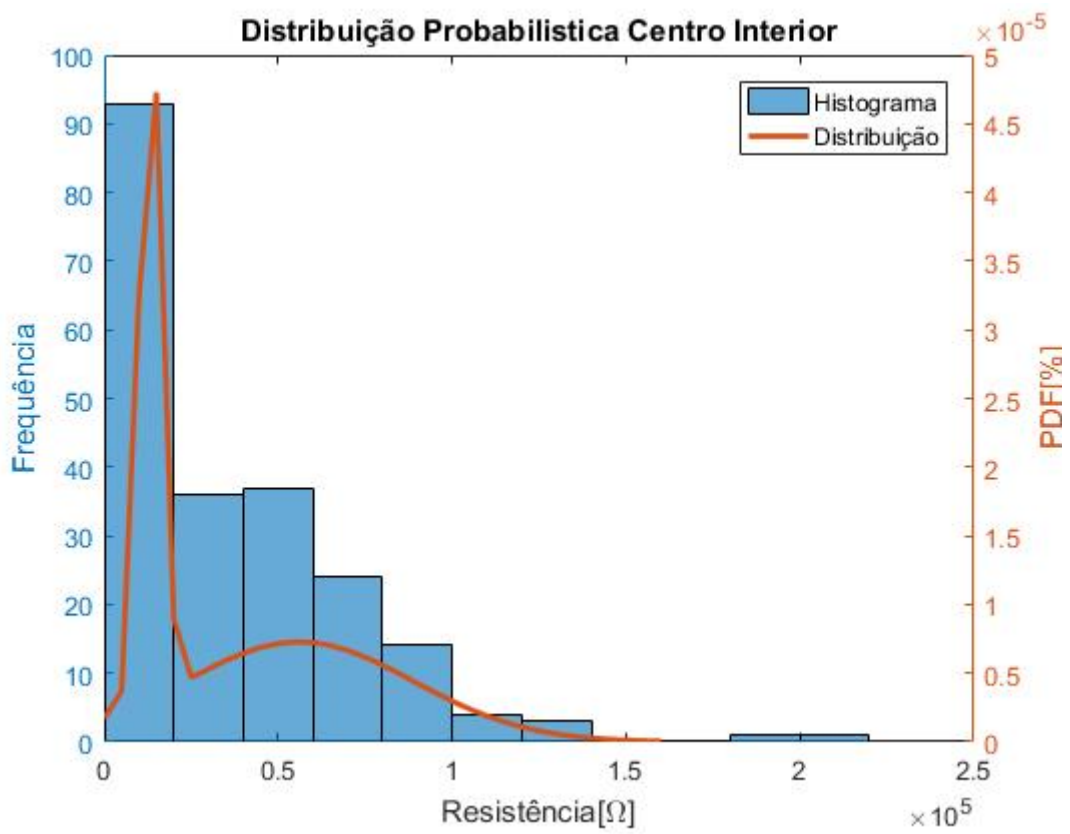


Figura A.19- Distribuição Probabilística da Região do Centro Interior

Anexo B. Informações UP

TPU S420:

Entradas analógicas de corrente	Frequência	50 Hz / 60 Hz
	Corrente nominal	1 A / 5 A
	Capacidade térmica	5 A / 15 A permanentes 50 A / 200 A durante 1 s
	Corrente nominal da 4ª entrada	5 A / 1 A / 0,2 A / 0,04 A
	Capacidade térmica	15 A / 5 A / 1,5 A / 0,5 A permanentes 200 A / 50 A / 10 A / 4 A durante 1 s
	Consumo	< 0,25 VA @ In

Figura B.1- Entradas Analógicas da TPU S420, retirado de [24]

Protecção de Máximo de Corrente Universal de tempo definido para defeitos fase-terra	Corrente operacional	0,1 .. 40 pu
	Temporização	0,04 .. 300 s
	Precisão temporal	± 10 ms
	Precisão da corrente	3% (mínimo 3% I _n)
	Factor de rearme	0,96
	Tempo máximo de rearme	30 ms

Figura B.2- Características da Função de tempo definido para defeitos Fase-Terra, retirado de [24]

Protecção Direccional de Terra	Relações de fase disponíveis	-90° .. 90° (frente/trás)
	Tensão residual mínima	0,005.. 0,8 pu

Figura B.3- Características da Função Direccional para defeitos Fase-Terra, retirado de [24]

7SJ64:

Earth-fault pickup for all types of earth faults	
Definite-time characteristic (ANSI 50Ns)	
Setting ranges	
Pickup threshold $I_{EE>}, I_{EE>>}$	
For sensitive input	0.001 to 1.5 A (in steps of 0.001 A)
For normal input	0.25 to 175 A ¹⁾ (in steps of 0.01 A)
Delay times T for $I_{EE>}, I_{EE>>}$	0 to 320 s or ∞ (in steps of 0.01 s)
Dropout delay time T_{DO}	0 to 60 s (in steps of 0.01 s)
Times	
Pickup times	Approx. 50 ms
Dropout ratio	Approx. 0.95
Tolerances	
Pickup threshold	
For sensitive input	2 % of setting value or 1 mA
For normal input	2 % of setting value or 50 mA ¹⁾
Delay times	1 % of setting value or 20 ms

Figura B.4- Características da Função de tempo definido para defeitos Fase-Terra, retirado de [64]