

# **Caracterização probabilística da resistência de defeito em redes de transporte de energia eléctrica**

**Patrícia Daniela Ferreira Duarte**

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

## **Engenharia Electrotécnica e de Computadores**

Orientador: Prof. Dra. Maria Teresa Nunes Padilha de Castro Correia de Barros

Dr. André Quaresma dos Santos

### **Júri**

Presidente: Prof. Dr. Rui Manuel Gameiro de Castro

Orientador: Prof. Dra. Maria Teresa Nunes Padilha de Castro Correia de Barros

Vogal: Eng. João Emanuel Afonso

**30 de Novembro de 2017**



## Agradecimentos

A elaboração desta dissertação só foi possível graças ao contributo de diversas pessoas que, nas suas mais variadas formas, directa ou indirectamente, me ajudaram e apoiaram e por isso merecem desde já o meu maior agradecimento.

Em primeiro lugar quero agradecer à Professora Doutora Maria Teresa Correia de Barros, minha orientadora, por toda a disponibilidade e ajuda que me deu ao longo destes meses. Quero agradecer ainda pela dedicação e orientação que foram sem dúvida imprescindíveis para o cumprimento de todas as metas e objectivos que foram propostos.

Quero também agradecer ao Doutor André dos Santos, meu co-orientador, que sempre acompanhou de perto todo o desenvolvimento desta dissertação e esteve sempre disponível para me ajudar em todas as dificuldades que foram aparecendo. A ele também o meu muito obrigado pelo empenho e prontidão demonstrados.

Aos meus pais, que foram sem dúvida o grande pilar, a todos os níveis, e me acompanharam em todo o meu percurso académico, o meu muito obrigado pelo orgulho que sempre demonstraram em mim e pela confiança nas minhas capacidades. Ao meu pai que sempre foi o meu exemplo, formando-se também no Instituto Superior Técnico, com muito mais dificuldades, mas mesmo assim ultrapassando todos os obstáculos e nunca desistindo. À minha mãe que desde muito cedo, abdicou de muitas coisas para me ver crescer e dar a melhor educação. Sem eles não seria o que sou hoje.

À minha irmã que é a minha confidente, que sempre me acompanhou em todos os momentos da vida até hoje e que certamente irá acompanhar sempre, que me apoia e que me ajuda, a todos os níveis. Também ela foi importante no meu desenvolvimento como pessoa e por isso me ajudou a chegar aqui.

Ao meu namorado, que para além de me ter ajudado ao longo destes meses, desde sempre foi um grande apoio. Por todo o carinho, compreensão, por todo o orgulho demonstrado, por estar sempre presente em todas as situações e por confiar em mim. A ele devo também o meu agradecimento por todos os momentos que me tem proporcionado e por nunca ter desistido de mim.

À minha colega Catarina Gaspar, por ter trabalhado comigo, por se ter mostrado sempre disponível para me ajudar e por me fornecer um dos algoritmos usados nesta dissertação.

Aos meus amigos, por me acompanharem durante os 6 anos, pelos dias de estudo em conjunto e por todos os bons momentos passados,

À empresa POWERSYS que forneceu o *software* EMTP-RV utilizado em simulações durante esta dissertação.



# Resumo

Os sistemas de energia eléctrica estão diariamente expostos a interrupções de serviço devido a defeitos originados por diversas causas. Qualquer defeito ocorrido no sistema de energia apresenta um certo valor de resistência, designado de resistência de defeito. Uma vez que depende de diversos factores, o valor da resistência de defeito pode ser imprevisível, e por isso é relevante fazer um estudo probabilístico, de forma a perceber o seu comportamento.

O objectivo principal desta dissertação é propor um modelo probabilístico que descreva a resistência de defeito, através do estudo de valores de resistência de defeito, obtidos para 100 defeitos reais registados na RNT. O cálculo da resistência de defeito relaciona-se com a localização do defeito, e por isso foram aplicados dois algoritmos de localização de defeitos, já existentes, que utilizam medições de tensão e corrente, efectuadas na linha onde ocorre o defeito. Um dos algoritmos utiliza medições de uma extremidade da linha e o outro de ambas as extremidades. Através do *software* EMTP-RV foram simulados, para os dois algoritmos, vários defeitos em duas diferentes localizações da rede de teste, correspondente à “RNT Sul”. Foi feita uma análise aos erros de cada algoritmo e concluiu-se que o mais adequado é o algoritmo que utiliza medições de ambas as extremidades da linha. Assim, a partir desse algoritmo, foram calculados os valores da resistência de defeito correspondentes aos 100 defeitos registados na RNT.

A partir da sua análise estatística são propostos dois modelos probabilísticos, um baseado numa distribuição de Weibull e o outro baseado numa distribuição normal em escala logarítmica. De forma a avaliar a adequação de cada modelo probabilístico proposto aos valores obtidos, é utilizado um procedimento, baseado na análise exploratória de dados (*Exploratory Data Analysis*). Para todos os níveis de tensão em conjunto e separadamente, é feito um gráfico quantil-quantil teórico e são aplicadas as funções de densidade de probabilidade e de distribuição cumulativa à distribuição de dados. Concluiu-se então que o modelo probabilístico que mais se ajusta aos valores de resistência de defeito obtidos é o modelo baseado numa distribuição normal em escala logarítmica.

## Palavras-chave:

Defeito, resistência de defeito, distribuição de Weibull, distribuição normal em escala logarítmica, análise exploratória de dados.



## Abstract

Electric power systems are daily exposed to service interruptions caused by faults due to different causes. Any fault in the power system has a certain resistance value, referred to as fault resistance. Since it depends on several factors, it can be unpredictable and therefore it is relevant to study its value probabilistically in order to understand its behavior.

The main objective of this dissertation is to propose a probabilistic model that describes the fault resistance, through the study of values of fault resistance obtained for 100 faults, recorded in RNT. Computation of fault resistance is related to fault location, and therefore, two existing fault location algorithms, which use current and voltage measurements are applied to the fault records. One algorithm uses measurements from one end of the line and the other from both ends. Through the EMTP-RV software, several faults, in two different test network locations corresponding to the “RNT Sul”, were simulated for the two algorithms. An analysis of the errors of each algorithm was made and it was concluded that the most adequate is the one that uses measurements from both ends of the line. Thus, from this algorithm, values of the fault resistance corresponding to the 100 faults, recorded in the RNT, were calculated.

From its statistical analysis, two probabilistic models are proposed, one based on a Weibull distribution and the other based on a normal distribution in a logarithmic scale. In order to evaluate the adequacy of each proposed probabilistic model to the values obtained, a procedure based on the exploratory data analysis is used. For all voltage levels together and separately, a theoretical quantil-quantil plot is made and the probability density and cumulative distribution functions are applied to the data distribution. It was concluded that the probabilistic model that best matches the values of fault resistance obtained is the model based on a normal logarithmic scale distribution.

### Keywords:

Fault, fault resistance, Weibull distribution, normal distribution in a logarithmic scale, exploratory data analysis.



## Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo .....	v
Abstract.....	vii
Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tabelas .....	xv
Lista de abreviaturas .....	xix
1 Introdução.....	1
2 Estado da arte .....	3
2.1 Componentes da resistência de defeito .....	3
2.2 Valores da resistência de defeito .....	8
2.3 Distribuições probabilísticas descritivas da resistência de defeito.....	14
3 Determinação da resistência de defeito .....	17
3.1 Algoritmos.....	17
3.1.1 Algoritmo baseado em medições numa extremidade da linha .....	17
3.1.2 Algoritmo baseado em medições nas duas extremidades da linha .....	19
3.2 Aferição da aplicação dos algoritmos de localização de defeito ao cálculo das resistências de defeito .....	20
3.2.1 Rede de teste .....	20
3.2.2 Resultados.....	30
4 Determinação de resistências de defeito na RNT.....	35
4.1 Caracterização dos defeitos .....	35
4.2 Resultados.....	35
4.3 Análise dos resultados .....	38
5 Análise probabilística da resistência de defeito .....	41
5.1 Distribuições probabilísticas adoptadas .....	41
5.1.1 Histogramas dos valores observados .....	41
5.1.2 Distribuição de Weibull .....	47
5.1.3 Distribuição normal em escala logarítmica.....	47
5.2 Análise da adequação das distribuições adoptadas .....	49
5.2.1 Procedimento adoptado – Análise exploratória de dados.....	49
5.2.2 Pré-análise dos dados.....	54
5.2.3 Ajuste às distribuições teóricas .....	58
5.2.4 Análise dos resultados .....	66
6 Conclusões .....	69
Bibliografia.....	71



## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Variação no tempo da resistência de várias espécies de árvores (extraída de [5]).	6
Figura 2.2 - Redução da resistência de terra efectiva, devido aos cabos de guarda, numa linha horizontal de 300 kV (extraída de [6]).	7
Figura 2.3 - Curvas de percentagem cumulativa e curva média da distribuição de frequência da resistência aparente de defeito (extraída de [7]).	9
Figura 2.4 - Valores de resistência de defeito [ $\Omega$ ] para defeitos fase-terra em linhas de 138 e 240 kV (extraída de [8]).	10
Figura 2.5 - Valores de resistência de defeito [ $\Omega$ ] para defeitos fase-terra em linhas de 765 kV, 400 kV e 230 kV (extraída de [9]).	12
Figura 2.6 - Comparação entre os valores de resistência de defeito [ $\Omega$ ] obtidos em [8] (a cinzento), para o nível de tensão de 240 kV (24 casos observados) e em [9] (a preto), para o nível de tensão de 230 kV (13 casos observados) (extraída de [9]).	12
Figura 2.7 - Valores de resistência de defeito [ $\Omega$ ] para defeitos fase-terra em linhas de 60 kV (extraída de [10]).	13
Figura 2.8 - Valores de resistência de defeito [ $k\Omega$ ] em regime de neutro isolado (extraída de [11]).	13
Figura 2.9 - Valores de resistência de defeito [ $k\Omega$ ] em regime de neutro solidamente ligado à Terra (extraída de [11]).	14
Figura 2.10 - Distribuição dos valores de resistência de defeito [ $\Omega$ ] e comparação com a função de densidade de probabilidade da distribuição de Weibull para o nível de tensão de 138 kV (à esquerda) e para o nível de tensão de 230 kV (à direita) (extraída de [12]).	15
Figura 2.11 - Funções de densidade de probabilidade e de distribuição cumulativa da distribuição de Weibull ajustada aos valores de resistência de defeito obtidos (círculos), para os níveis de tensão de 220 kV (a linha cheia) e 132 kV (a tracejado) (extraída de [12]).	15
Figura 2.12 - Histograma da distribuição dos valores de resistência de defeito, para o nível de tensão de 60 kV, e respectiva função de densidade de probabilidade da distribuição de Weibull ajustada aos dados (extraída de [12]).	16
Figura 2.13 - Função de densidade de probabilidade de Weibull (extraída de [13]).	16
Figura 3.1 - Circuito monofásico representativo de um defeito resistivo.	17
Figura 3.2 - Rede de teste – RNT Sul	20
Figura 4.1 - Histograma comparativo dos valores de resistência de defeito obtidos, para 400 kV, nesta dissertação (a vermelho) e os publicados em [9] (a azul).	38
Figura 4.2 - Histograma comparativo dos valores de resistência de defeito, para os níveis de tensão de 220 kV, 230 kV e 240 kV, obtidos nesta dissertação (vermelho), os publicados em [9] (azul) e os publicados em [8] (verde), respectivamente.	39
Figura 4.3 - Histograma comparativo dos valores de resistência de defeito, para os níveis de tensão de 150 kV e 138 kV, obtidos nesta dissertação (a vermelho) e os publicados em [8] (a verde).	40

Figura 5.1 - Histograma da distribuição dos valores de resistência de defeito para todos os níveis de tensão em conjunto (400 kV, 220 kV, 150 kV), baseado em 100 observações. Representação do valor médio dos dados (círculo a vermelho). .....	42
Figura 5.2 - Histograma da distribuição dos valores de resistência de defeito para 400 kV baseado em 62 observações. Representação do valor médio dos dados (círculo a vermelho). .....	42
Figura 5.3 - Histograma da distribuição dos valores de resistência de defeito para 220 kV baseado em 9 observações Representação do valor médio dos dados (círculo a vermelho). .....	43
Figura 5.4 - Histograma da distribuição dos valores de resistência de defeito, para 150 kV baseado em 29 observações. Representação do valor médio dos dados (círculo a vermelho). .....	43
Figura 5.5 - Histograma da distribuição dos valores de resistência de defeito, em escala logarítmica, para 400 kV, baseado em 62 observações. Representação do valor médio dos dados (círculo a vermelho).....	45
Figura 5.6 - Histograma da distribuição dos valores de resistência de defeito, em escala logarítmica, para todos os níveis de tensão em conjunto (400 kV, 220 kV, 150 kV), baseado em 100 observações. Representação do valor médio dos dados (círculo a vermelho).....	45
Figura 5.7 - Histograma da distribuição dos valores de resistência de defeito, em escala logarítmica, para 150 kV baseado em 29 observações. ....	46
Figura 5.8 - Ajuste da função de distribuição normal à distribuição dos valores de resistividade do solo medidos a 4m do solo na região Norte (a vermelho) e na região Sul (a preto) de Portugal. (extraída de [8]).....	48
Figura 5.9 - <i>Boxplot</i> anotada. ....	54
Figura 5.10 - <i>Boxplot</i> dos valores de resistência de defeito para todos os níveis de tensão em conjunto (à esquerda), para o nível de tensão de 400 kV (ao centro) e para o nível de tensão de 150 kV (à direita). ....	55
Figura 5.11 - Função de densidade de probabilidade de Weibull para diferentes valores de $\beta$ (extraída de [23]). ....	55
Figura 5.12 - <i>Boxplot</i> dos valores do logaritmo da resistência de defeito, para todos os níveis de tensão em conjunto (à direita), para o nível de tensão de 400 kV (ao centro), e para o nível de tensão de 150 kV (à direita). ....	57
Figura 5.13 - Gráfico quantil-quantil teórico para a distribuição de Weibull, para o conjunto de todos os níveis de tensão (400 kV, 220 kV, 150 kV). ....	59
Figura 5.14 - Ajuste da função de distribuição cumulativa de Weibull, à distribuição dos valores de resistência de defeito, para o conjunto de todos os níveis de tensão (400 kV, 220 kV, 150 kV). .....	59
Figura 5.15 - Ajuste da função de densidade de probabilidade de Weibull, à distribuição dos valores de resistência de defeito, para o conjunto de todos os níveis de tensão (400 kV, 220 kV, 150 kV). ...	59
Figura 5.16 - Gráfico quantil-quantil teórico para a distribuição de Weibull, para 400 kV. ....	60
Figura 5.17 - Ajuste da função de densidade de probabilidade de Weibull à distribuição dos valores de resistência de defeito, para 400 kV. ....	60
Figura 5.18 - Ajuste da função de distribuição cumulativa de Weibull à distribuição dos valores de resistência de defeito, para 400 kV. ....	60

Figura 5.19 - Gráfico quantil-quantil teórico para a distribuição de Weibull, para 150 kV .....	61
Figura 5.20 - Ajuste da função de densidade de probabilidade de Weibull à distribuição dos valores de resistência de defeito, para 150 kV. ....	61
Figura 5.21 - Ajuste da função de distribuição cumulativa de Weibull à distribuição dos valores de resistência de defeito, para 150 kV. ....	61
Figura 5.22 - Gráfico quantil-quantil teórico para a distribuição normal em escala logarítmica, para o conjunto de todos os níveis de tensão (400 kV, 220 kV, 150 kV).....	62
Figura 5.23 - Ajuste da função de distribuição cumulativa normal em escala logarítmica, à distribuição dos valores de resistência de defeito, para o conjunto de todos os níveis de tensão (400 kV, 220 kV, 150 kV). ....	62
Figura 5.24 - Ajuste da função de densidade de probabilidade normal em escala logarítmica, à distribuição dos valores de resistência de defeito, para o conjunto de todos os níveis de tensão (400 kV, 220 kV, 150 kV).....	62
Figura 5.25 - Gráfico quantil-quantil teórico para a distribuição normal em escala logarítmica, para 400 kV.....	63
Figura 5.26 - Ajuste da função de distribuição cumulativa normal em escala logarítmica, à distribuição dos valores de resistência de defeito, para 400 kV. ....	63
Figura 5.27 - Ajuste da função de densidade de probabilidade normal em escala logarítmica, à distribuição dos valores de resistência de defeito, para 400 kV. ....	63
Figura 5.28 - Gráfico quantil-quantil teórico para a distribuição normal em escala logarítmica, para 150 kV. ....	64
Figura 5.29 - Ajuste da função de distribuição cumulativa normal em escala logarítmica, à distribuição dos valores de resistência de defeito, para 150 kV. ....	64
Figura 5.30 - Ajuste da função de densidade de probabilidade normal em escala logarítmica, à distribuição dos valores de resistência de defeito, para 150 kV. ....	64



## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Valores mínimos e máximos da corrente de curto-circuito [kA] na RNT (Valores extraídos de [2]).	4
Tabela 2.2 - Comprimento da cadeia de isoladores e distância dos condutores ao solo [m] na RNT (Valores de projecto tipo extraídos de [3]).	4
Tabela 2.3 - Valores da resistência de arco eléctrico [ $\Omega$ ]. Valores calculados para o comprimento do arco eléctrico correspondente ao comprimento da cadeia de isoladores (tabela 2.2).	4
Tabela 2.4 - Valores da resistência de arco eléctrico [ $\Omega$ ]. Valores calculados para o comprimento do arco eléctrico correspondente à distância entre os condutores e o solo (tabela 2.2).	4
Tabela 2.5 - Resistência de arco eléctrico [ $\Omega$ ] para defeitos fase terra. Valores extraídos de [4].	5
Tabela 2.6 - Resistência efectiva de terra dos apoios (valores extraídos de [4]).	7
Tabela 2.7 - Moda, mediana e valor médio da resistência aparente de defeito [ $\Omega$ ] (valores extraídos de [7]).	8
Tabela 2.8 - Resistência de defeito obtida através de medições directas [ $\Omega$ ] (valores extraídos de [7]).	9
Tabela 2.9 - Resumo dos valores de resistência de defeito, em $\Omega$ , obtidos para defeitos fase-terra em linhas de 765 kV, 400 kV e 230 kV (valores extraídos de [9]).	11
Tabela 2.10 - Parâmetros da distribuição de Weibull (valores extraídos de [12]).	14
Tabela 3.1 - Características dos equivalentes de Thévenin da rede de teste.	21
Tabela 3.2 - Impedâncias de Thévenin da rede de teste.	22
Tabela 3.3 – Componentes simétricas das susceptâncias para o troço LSN_PO3_t1 da rede de teste [F / km], sendo h a componente homopolar, i a inversa e d a directa.	22
Tabela 3.4 – Componentes simétricas das impedâncias para o troço LSN_PO3_t1 da rede de teste [ $\Omega$ / km], sendo h a componente homopolar, i a inversa e d a directa.	23
Tabela 3.5 – Componentes simétricas das susceptâncias para o troço LSN_PO3_t2 da rede de teste [F / km], sendo h a componente homopolar, i a inversa e d a directa.	23
Tabela 3.6 – Componentes simétricas das impedâncias para o troço LSN_PO3_t2 da rede de teste [ $\Omega$ / km], sendo h a componente homopolar, i a inversa e d a directa.	24
Tabela 3.7 – Componentes simétricas das susceptâncias para o troço LPO_TN3_t1 da rede de teste [F / km], sendo h a componente homopolar, i a inversa e d a directa.	25
Tabela 3.8 – Componentes simétricas das impedâncias do troço LPO_TN3_t1 da rede de teste [ $\Omega$ / km], sendo h a componente homopolar, i a inversa e d a directa.	25
Tabela 3.9 – Componentes simétricas das susceptâncias para o troço LPO_TN3_t2 da rede de teste [F / km], sendo h a componente homopolar, i a inversa e d a directa.	25
Tabela 3.10 – Componentes simétricas das impedâncias para o troço LPO_TN3_t2 da rede de teste [ $\Omega$ / km], sendo h a componente homopolar, i a inversa e d a directa.	26

Tabela 3.11 – Componentes simétricas das susceptâncias para o troço LPO_TN3_t3 da rede de teste [F/ km] , sendo h a componente homopolar, i a inversa e d a directa. ....	26
Tabela 3.12 – Componentes simétricas das impedâncias do troço LPO_TN3_t3 da rede de teste [Ω/ km] , sendo h a componente homopolar, i a inversa e d a directa.....	27
Tabela 3.13 - Parâmetros directo e homopolar do troço LSN_PO3_t1 da rede de teste. R e X em Ω/ km e C em nF / km .....	28
Tabela 3.14 - Parâmetros directo e homopolar do troço LSN_PO3_t2 da rede de teste. R e X em Ω/ km e C em nF / km .....	28
Tabela 3.15 - Parâmetros do troço LPO_TN3_t1 da rede de teste. R e X em Ω/ km e C em nF / km . ....	29
Tabela 3.16 - Parâmetros do troço LPO_TN3_t2 da rede de teste. R e X em Ω/ km e C em nF / km . ....	29
Tabela 3.17 - Parâmetros do troço LPO_TN3_t3 da rede de teste. R e X em Ω/ km e C em nF / km . ....	29
Tabela 3.18 - Matriz de impedância dih para a linha LSN_PO3 considerada no algoritmo de localização de defeito[Ω] . ....	30
Tabela 3.19 - Matriz de impedância dih para a linha LPO_TN3 considerada no algoritmo de localização de defeito[Ω] . ....	30
Tabela 3.20 - Valores de resistência de defeito e erros, absoluto e relativo, do algoritmo que utiliza informações de uma extremidade da linha, para o defeito Sines-Portimão (visto de Sines). ....	31
Tabela 3.21 – Valores de resistência de defeito e erros, absoluto e relativo, do algoritmo que utiliza informações de uma extremidade da linha, para o defeito Sines-Portimão (visto de Portimão). ....	31
Tabela 3.22 - Valores de resistência de defeito e erros, absoluto e relativo, do algoritmo que utiliza informações das duas extremidades da linha, para o defeito Sines-Portimão. ....	32
Tabela 3.23 - Valores de resistência de defeito e erros, absoluto e relativo, do algoritmo que utiliza informações de uma extremidade da linha, para o defeito Portimão-Tunes (visto de Portimão). ....	32
Tabela 3.24 - Valores de resistência de defeito e erros, absoluto e relativo, do algoritmo que utiliza informações de uma extremidade da linha, para o defeito Portimão-Tunes (visto de Tunes). ....	32
Tabela 3.25 - Valores de resistência de defeito e erros, absoluto e relativo, do algoritmo que utiliza informações das duas extremidades da linha, para o defeito Portimão-Tunes. ....	33
Tabela 4.1 - Valores de resistência de defeito obtidos a partir da aplicação do algoritmo que utiliza informação das duas extremidades da linha (incidente 1 a 53). ....	36
Tabela 4.2 - Percentagem de observações para cada intervalo definido na figura 4.1. ....	38
Tabela 4.3 - Percentagem de observações para cada intervalo definido na figura 4.2. ....	39
Tabela 4.4 – Percentagem de observações para cada intervalo definido na figura 4.3. ....	40
Tabela 5.1 - Valores máximo, mínimo, média e mediana da resistência de defeito [Ω] . ....	41
Tabela 5.2 - Densidade de observações para cada intervalo definido na figura 5.1 para todos os níveis de tensão em conjunto (400 kV, 220 kV, 150 kV). ....	42

Tabela 5.3 - Densidade de observações para cada intervalo definido na figura 5.2, para o nível de tensão de 400 kV.....	42
Tabela 5.4 - Densidade de observações para cada intervalo definido na figura 5.3, para o nível de tensão de 220 kV.....	43
Tabela 5.5 - Densidade de observações para cada intervalo definido na figura 5.4, para o nível de tensão de 150 kV.....	43
Tabela 5.6 - Valores máximo, mínimo, média e mediana do logaritmo da resistência de defeito [ $\Omega$ ].....	44
Tabela 5.7 - Densidade de observações para cada intervalo definido na figura 5.5, para todos os níveis de tensão em conjunto (400 kV, 220 kV, 150 kV). .....	45
Tabela 5.8 - Densidade de observações para cada intervalo definido na figura 5.6, para o nível de tensão de 400kV.....	45
Tabela 5.9 - Densidade de observações para cada intervalo definido na figura 5.6, para o nível de tensão de 150 kV.....	46
Tabela 5.10 - Pré-análise dos valores da resistência de defeito, incluindo os <i>outliers</i> [ $\Omega$ ] . .....	56
Tabela 5.11 - Pré-análise dos valores da resistência de defeito após a remoção dos <i>outliers</i> [ $\Omega$ ] . ...	56
Tabela 5.12 - Pré-análise dos valores do logaritmo da resistência de defeito, incluindo os <i>outliers</i> [ $\Omega$ ] .....	58
Tabela 5.13 - Pré-análise dos valores do logaritmo da resistência de defeito, após a remoção dos <i>outliers</i> [ $\Omega$ ] .....	58
Tabela 5.14 - Parâmetros da distribuição de Weibull. ....	65
Tabela 5.15 - Parâmetros da distribuição normal em escala logarítmica. ....	65
Tabela 5.16 - Comparação entre o valor médio dos valores de resistência de defeito após a remoção dos <i>outliers</i> e o valor médio da distribuição de Weibull [ $\Omega$ ]. ....	66
Tabela 5.17 - Comparação entre o valor médio dos valores do logaritmo da resistência de defeito após a remoção dos <i>outliers</i> e o valor médio da distribuição normal em escala logarítmica.....	66



## **Lista de abreviaturas**

PDIRT – Plano de Desenvolvimento e Investimento da Rede de Transporte de Electricidade

RNT – Rede Nacional de Transporte

EMTP – Electromagnetic Transients Program

CP – Concentrated Parameters

EDA – Exploratory Data Analysis



# 1 Introdução

Os sistemas de energia eléctrica estão constantemente expostos a interrupções de serviço, devido a defeitos que se devem a diversas causas como: descargas atmosféricas, poluição dos isoladores, aves e incêndios. Cada defeito ocorrido no sistema de energia apresenta um determinado valor de resistência, designado de resistência de defeito. A resistência de defeito é uma componente crítica no estudo de redes de transporte de energia eléctrica que envolvam cálculos de curto-circuito, nomeadamente para dimensionamento de equipamentos, para estudos de estabilidade transitória ou estudos de coordenação de protecções. Se não for considerada, pode comprometer a análise e resultados do estudo em questão. A resistência de defeito é composta pela resistência do arco eléctrico, pela resistência de terra efectiva dos apoios e pela resistência de objectos estranhos situados entre o condutor e o solo [9].

A inclusão da contribuição da resistência de defeito na análise de defeitos em linhas de transmissão, tem sido estudada e trabalhada por vários autores desde há já algumas dezenas de anos. Em [7], [8], [9], [10] e [11], foram publicados valores de resistência, para defeitos ocorridos em linhas de diferentes níveis de tensão, apresentados no capítulo 2. No entanto, em alguns dos estudos é analisado apenas um reduzido número de defeitos ocorridos. Assim, os resultados obtidos podem ser melhorados, através de uma análise mais completa que envolva um maior número de defeitos. É nesse sentido que surge o interesse desta dissertação.

Para além disso, por ser dependente de vários factores, a resistência de defeito pode apresentar valores imprevisíveis. Por isso, é importante estudá-los probabilisticamente de forma a perceber o seu comportamento. Estudos publicados, [12] e [13], apresentam modelos probabilísticos para caracterizar a resistência de defeito em linhas de transmissão. Uma vez que têm sido poucos os autores que até agora se dedicaram ao estudo da resistência de defeito de um ponto de vista probabilístico, é interessante poder perceber, a partir de casos reais, a adequação desses modelos. É ainda interessante poder confrontar os resultados publicados com novos modelos propostos.

O objectivo principal desta dissertação é assim propor um modelo probabilístico que descreva a resistência de defeito, utilizando para isso, valores calculados a partir de registos recolhidos na RNT. Este cálculo é efectuado através da aplicação de um algoritmo de localização de defeitos, que utiliza medições de tensão e corrente, registadas em ambas as extremidades da linha onde ocorreu o defeito.

Esta dissertação é dividida em 3 partes fundamentais. Na primeira parte, correspondente ao capítulo 2, é feita uma descrição da resistência de defeito, das suas componentes e respectiva influência no valor da resistência. São ainda apresentados resultados publicados na literatura. Estes resultados correspondem a valores de resistência de defeito obtidos em estudos anteriores, através de medições, para defeitos em linhas de transmissão com diferentes níveis de tensão. São ainda

apresentados modelos probabilísticos propostos por outros autores para descrever a resistência de defeito.

Na segunda parte, que abrange os capítulos 3 e 4, apresentam-se dois algoritmos para o cálculo da resistência de defeito a partir de medições de tensão e corrente numa ou nas duas extremidades da linha. O programa computacional correspondente ao algoritmo que utiliza medições de ambas as extremidades da linha foi desenvolvido em conjunto com a aluna Catarina Gaspar, a quem se deve a implementação do algoritmo correspondente a esse programa computacional. Posteriormente é feita uma aferição aos dois algoritmos, através da simulação de vários defeitos, com o *software* EMTP-RV, em duas diferentes localizações da rede de teste, correspondente à “RNT Sul”. São calculados os erros correspondentes a cada algoritmo de forma a escolher o mais viável e adequado. O algoritmo escolhido é aplicado a casos reais, nomeadamente a 100 defeitos registados na RNT.

Por fim, na terceira parte, correspondente ao capítulo 5, os valores de resistência de defeito calculados são estudados probabilisticamente, considerando todos os níveis de tensão em conjunto e separadamente, e são propostos dois modelos probabilísticos. São utilizadas ferramentas gráficas, provenientes da análise exploratória de dados (EDA), para aferir qual dos modelos é o mais adequado. Assim, para cada modelo proposto, e para os diversos níveis de tensão, em conjunto e separadamente, são apresentados: um gráfico quantil-quantil teórico; um histograma da distribuição dos dados e a respectiva função de densidade de probabilidade; e por fim um histograma cumulativo da distribuição dos dados e a respectiva função de distribuição cumulativa. Através da análise dos gráficos obtidos é escolhido o modelo probabilístico mais adequado para caracterizar a resistência de defeito para a rede em estudo.

## 2 Estado da arte

Este capítulo é dedicado à caracterização da resistência de defeito, nomeadamente à descrição das componentes que a constituem e à sua influência no valor da resistência de defeito. Para além disso é feita uma referência bibliográfica a estudos publicados na literatura, acerca de valores de resistência de defeito e de distribuições probabilísticas adoptadas para os caracterizar.

### 2.1 Componentes da resistência de defeito

O valor da resistência que caracteriza cada defeito depende do tipo e causa do defeito. O valor da resistência de defeito pode ser relevante apenas em defeitos que envolvam a terra, uma vez que, para defeitos entre fases, apenas existe a resistência do arco eléctrico. Para defeitos que envolvam a terra, o valor da resistência de defeito,  $R_F$ , é uma combinação de três factores, sendo eles: a resistência do arco eléctrico,  $R_{arco}$ , a resistência de terra efectiva dos apoios,  $R_{T_{ef}}$ , e ainda a resistência de possíveis objectos estranhos situados entre o condutor e a terra,  $R_o$ . É por isso definida como:

$$R_F = R_{arco} + R_{T_{ef}} + R_o \quad (2.1)$$

O arco eléctrico é um fenómeno não linear que depende de diversos factores. No entanto é comum considerar o arco como uma resistência, dependente da corrente e do comprimento do arco.

Segundo Warrington, o valor da resistência do arco eléctrico depende da corrente de curto-circuito e do comprimento do arco eléctrico [1] através de:

$$R_{arco} = \frac{k \times l}{I^{1,4}} \quad (2.2)$$

onde  $k = 28707,35 \text{ V/m}$ ,  $R_{arco}$  representa o valor da resistência do arco eléctrico [ $\Omega$ ],  $l$  representa o comprimento do arco eléctrico [m] e  $I$  corresponde à corrente de curto-circuito [A].

O comprimento do arco pode variar consoante o tipo de defeito, podendo corresponder ao comprimento da cadeia de isoladores, se o defeito se verificar nos apoios, ou à distância entre os condutores e o solo, se o defeito se verificar no vão.

De forma a poder concluir acerca da contribuição da resistência do arco eléctrico para o valor da resistência de defeito, apresentam-se nas tabelas 2.3 e 2.4, os valores de resistência do arco eléctrico obtidos, de acordo com (2.2). Estes valores foram obtidos para os valores de corrente de curto-circuito disponíveis no PDIRT 2016 – 2025 [2]. Os valores de corrente apresentados dependem da topologia da rede e do local onde ocorre o curto-circuito. São apresentados, na tabela 2.1, os valores máximos e mínimos da corrente de curto-circuito encontrados entre todas as instalações. Uma vez que a resistência do arco depende também do seu comprimento, são ainda apresentados, na tabela 2.2, os valores correspondentes ao comprimento da cadeia de isoladores e à distância dos

condutores ao solo, de acordo com o nível de tensão em questão. Estes valores são valores recomendados de projecto [3].

Tabela 2.1 - Valores mínimos e máximos da corrente de curto-circuito [kA] na RNT (Valores extraídos de [2]).

Nível de tensão [kV]	Corrente mínima de curto-circuito [kA]	Corrente máxima de curto-circuito [kA]
400	7,6	30,8
220	7,6	30,6
150	4,5	31,8

Tabela 2.2 - Comprimento da cadeia de isoladores e distância dos condutores ao solo [m] na RNT (Valores de projecto tipo extraídos de [3]).

Nível de tensão [kV]	Comprimento da cadeia de isoladores [m]	Distância dos condutores ao solo [m]
400	4	7,9
220	3	7,1
150	2	6,8

Tabela 2.3 - Valores da resistência de arco eléctrico [ $\Omega$ ]. Valores calculados para o comprimento do arco eléctrico correspondente ao comprimento da cadeia de isoladores (tabela 2.2).

Nível de tensão [kV]	Resistência do arco eléctrico [ $\Omega$ ]	
	Para corrente máxima de curto-circuito	Para corrente mínima de curto-circuito
400	0,0597	0,4236
220	0,0452	0,3177
150	0,0286	0,4411

Através da análise da tabela 2.3, é possível verificar que, para a corrente máxima de curto-circuito, os valores de resistência do arco eléctrico aumentam à medida que aumenta o nível de tensão. Para a corrente mínima de curto-circuito não se verifica esta tendência. Para além disso verifica-se que todos os valores de resistência de arco eléctrico são inferiores a  $0,5 \Omega$ , apresentando uma gama de valores entre  $0,0286 \Omega$  e  $0,4411 \Omega$ . São portanto valores reduzidos quando comparados com o valor típico da resistência de uma linha aérea ( $0,03 \Omega / \text{km}$ ).

Tabela 2.4 - Valores da resistência de arco eléctrico [ $\Omega$ ]. Valores calculados para o comprimento do arco eléctrico correspondente à distância entre os condutores e o solo (tabela 2.2).

Nível de tensão [kV]	Resistência do arco eléctrico [ $\Omega$ ]	
	Para corrente máxima de curto-circuito	Para corrente mínima de curto-circuito
400	0,1179	0,8365
220	0,1070	0,7518
150	0,0971	1,4997

Através da análise da tabela 2.4, é possível verificar que, para a corrente máxima de curto-circuito, os valores de resistência do arco eléctrico aumentam à medida que aumenta o nível de tensão. Para a corrente mínima de curto-circuito não se verifica esta tendência. É ainda possível observar que os valores de resistência de arco eléctrico obtidos são superiores aos da tabela 2.3, uma vez que o comprimento do arco é maior. Ainda assim são todos inferiores a  $1,5 \Omega$ , apresentando uma gama de valores entre  $0,0971 \Omega$  e  $1,4997 \Omega$ . Os valores de resistência do arco, para a corrente de curto-circuito mínima, já são da mesma ordem que o valor típico da resistência de uma linha aérea.

Também Andrade e Sorrentino, num estudo publicado, apresentam valores de resistência de arco calculados para vários níveis de tensão, a partir da corrente de curto-circuito [4]. Foram obtidos gráficos da resistência de arco para defeitos fase-terra, em função da corrente de curto-circuito, considerando diversos modelos de arco. Os resultados foram semelhantes para os vários modelos de arco. Através desses gráficos obteve-se a tabela 2.5, onde se apresenta um resumo dos valores de resistência de arco, a partir do momento em que a corrente de curto-circuito estabiliza. Em [4] é feita a distinção entre operação instantânea e operação temporizada das protecções. No entanto apenas serão considerados nesta dissertação os valores para o modo de operação instantânea.

Tabela 2.5 - Resistência de arco eléctrico [ $\Omega$ ] para defeitos fase terra. Valores extraídos de [4].

Nível de tensão nominal [kV]	Corrente de curto-circuito estabilizada [kA]	Valor máximo da resistência de arco eléctrico [ $\Omega$ ]
69	3	18
115	4	13
230	6	8,2
400	8	5,9
765	16	2,9

De acordo com (2.2), o valor máximo de resistência de arco é obtido para a corrente de curto-circuito mínima. Verifica-se que os valores das correntes de curto-circuito da tabela 2.5, que correspondem aos valores mínimos, são idênticos aos valores de corrente de curto-circuito mínimos da tabela 2.1 para os níveis de tensão comparáveis, nomeadamente 115/150 kV, 220/230 kV e 400 kV. No entanto verificam-se valores de resistência de arco eléctrico bastante superiores aos obtidos nesta dissertação. Isto deve-se ao facto de em [4] terem sido utilizados valores de comprimento do arco superiores aos da tabela 2.2.

O valor da resistência de defeito é imprevisível na medida em que se pode verificar a presença de objectos estranhos situados entre os condutores e o solo. O valor da resistência desses objectos é um valor fixo, dependente apenas do objecto em questão, e é considerado resistivo.

A figura 2.1 mostra os valores de resistência verificados para diversas espécies de árvores [5], onde é possível observar uma gama de valores de resistência aproximadamente entre 20 e 50 k $\Omega$ .

Se o objecto for metálico o valor de resistência é muito baixo, e por isso é desprezável. Se for uma árvore, como se pode verificar pela figura 2.1, o valor pode ser muito alto. Como se verá, os valores de resistência obtidos são sempre baixos e por isso esta situação é de rara ocorrência em redes de transporte.

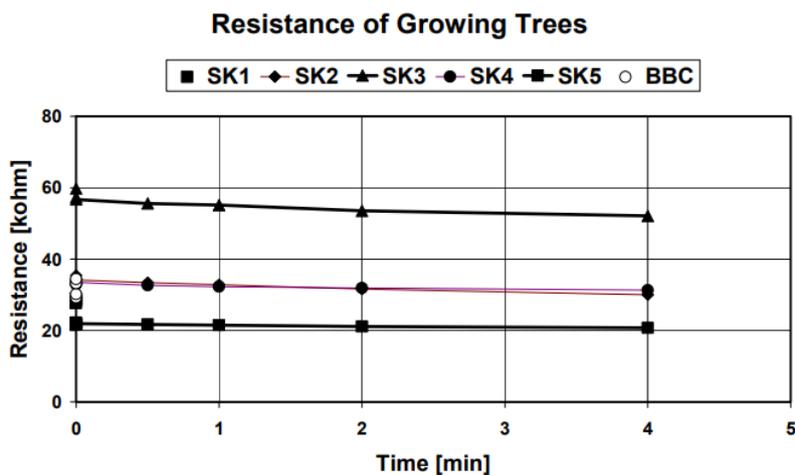


Figura 2.1 – Variação no tempo da resistência de várias espécies de árvores (extraída de [5]).

Em relação à resistência de terra efectiva dos apoios, é considerado nesta dissertação que na rede em estudo as linhas de transmissão têm cabos de guarda. Desta forma, num defeito fase-terra num apoio, uma parte da corrente flui por cada apoio e outra circula pelo cabo de guarda. Assim a corrente flui para a terra através de diversas resistências de terra dos apoios em paralelo. As resistências de terra dos apoios e os cabos de guarda podem ser representados por vários T ligados em série. Isto implica que a resistência de terra efectiva,  $R_{T_{ef}}$ , seja diferente da resistência de terra dos apoios individualmente,  $R_{T_{apoiio}}$ .

A resistência de terra de cada apoio é dada por:

$$R_{T_{apoiio}} = k_1 \times \rho \quad (2.3)$$

onde  $k_1$  representa uma constante que depende da geometria do eléctrodo e  $\rho$  representa a resistividade do solo [ $\Omega m$ ]. Uma vez que os apoios se situam todos na mesma região, a resistividade do solo, sendo característica da região em questão, pode ser assumida como a mesma para todos os apoios envolvidos.

Dado que os cabos de guarda interligam os apoios, a resistência de terra efectiva é dependente da combinação dos vários apoios envolvidos, nomeadamente do número de apoios. Uma vez que os cabos de guarda têm pouca influência na resistência de terra efectiva, esta é também proporcional à resistência de terra de cada apoio, e portanto

$$R_{Tef} = k_2 \times \rho \quad (2.4)$$

onde  $k_2$  é uma constante, diferente da anterior e  $\rho$  representa a resistividade do solo [ $\Omega m$ ].

O facto de os cabos de guarda, ao interligarem todos os apoios, colocarem a resistência de terra de cada apoio em paralelo com a resistência de terra dos apoios adjacentes, origina uma diminuição acentuada na resistência de terra efectiva [6], como mostra a figura 2.2. Na figura 2.2 estão representados dois diferentes tipos de cabos de guarda, nomeadamente: cabos de guarda de aço, com baixa condutividade e cabos de guarda de cobre, com alta condutividade.

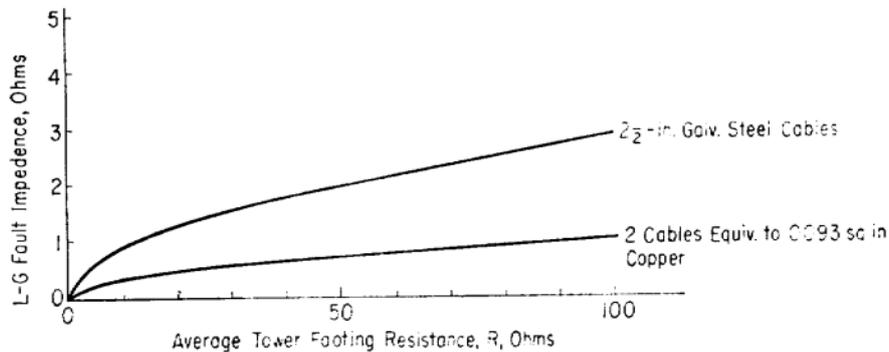


Figura 2.2 - Redução da resistência de terra efectiva, devido aos cabos de guarda, numa linha horizontal de 300 kV (extraída de [6]).

É possível verificar, através da figura 2.2, que até mesmo para uma resistência de terra dos apoios média de  $100 \Omega$  e cabos de guarda com baixa condutividade, a resistência de terra efectiva dos apoios é de apenas  $3 \Omega$ .

Andrade e Sorrentino publicaram um artigo onde, através de um modelo proposto, estudam a resistência de terra dos apoios, nomeadamente a resistência de terra efectiva [4]. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Resistência efectiva de terra dos apoios (valores extraídos de [4]).

Nível de tensão nominal [kV]	Valor mínimo [mΩ]	Valor máximo [ $\Omega$ ]
69	2,45	34,6
115	2,66	39,4
230	2,99	46,5
400	3,41	49,0
765	3,91	35,7

É possível observar, através da tabela 2.6 que, para o nível de tensão de 230 kV, o valor máximo é bastante mais elevado do que para a figura 2.2 (cujo nível de tensão é 300 kV e por isso comparável). No entanto, tendo em conta que em [4] se indica uma resistência de terra de cada apoio de  $800\Omega$ , o valor de  $46,5\ \Omega$  é relativamente moderado.

## 2.2 Valores da resistência de defeito

Gilkeson em conjunto com Jeanne e Davenport, publicaram um artigo onde a abordagem à resistência de defeito é maioritariamente estatística, e baseada em estudos de oscilografias de correntes de defeito em sistemas de energia [7]. Os estudos de oscilografias foram elaborados pelo *Joint Subcommittee on Development and Research of the Edison Electric Institute and Bell System*, em cooperação com empresas da área de energia.

A obtenção do valor da resistência de defeito foi feita recorrendo a diferentes linhas de raciocínio: a primeira através da medição da corrente de neutro, complementada com cálculos, de forma a obter a resistência de defeito aparente. Este método pode não fornecer o valor correcto da resistência de defeito, mas é usado como meio de chegar ao valor da corrente de defeito. A tabela 2.7 apresenta os valores de resistência de defeito obtidos, em  $\Omega$ , com este método, baseados em 1375 observações oscilográficas, durante 6 anos, para 5 sistemas de energia com diferentes níveis de tensão. É feita ainda uma análise a todos os sistemas em conjunto, e são apresentados os valores respeitantes à curva média de distribuição de frequência obtida.

Tabela 2.7 - Moda, mediana e valor médio da resistência aparente de defeito [ $\Omega$ ] (valores extraídos de [7]).

Sistema	Número de casos	Resistência aparente de defeito [ $\Omega$ ]			
		Gama de valores	Moda	Mediana	Valor médio
B – 33 kV	181	-9 a 87	8	22	25
C – 33 kV	89	-9 a 160	24	28	30
E – 44 kV	1031	-10 a 720	13	23	57
I – 132 kV	14	8 a 68	15	28	30
J – 220 kV	60	5 a 132	25	31	34
Curva média	--	-10 a 720	19	25	35

A figura 2.3 reproduz a distribuição estatística dos valores de resistência aparente de defeito obtidos na tabela 2.7. Para cada sistema é apresentada uma curva de percentagem cumulativa, e através de todas elas é deduzida a curva média de distribuição de frequência. A abcissa do gráfico correspondente ao pico da curva, representa a moda na tabela 2.7. Os valores de resistência aparente de defeito foram inseridos em classes de igual dimensão ( $10\ \Omega$ ) e as curvas ajustadas aos valores observados.

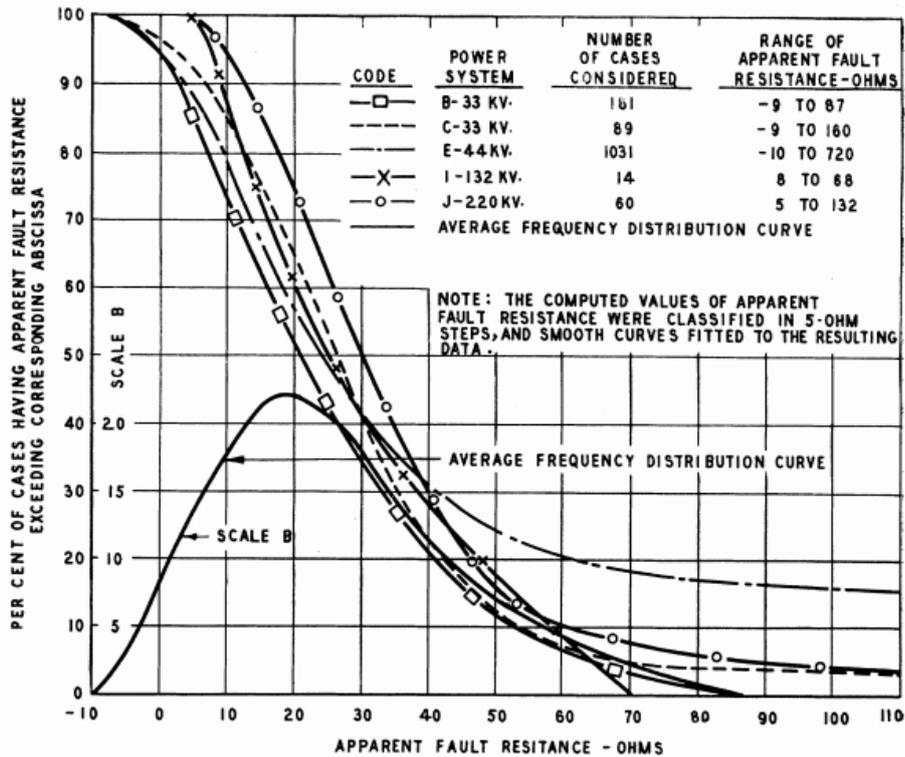


Figura 2.3 - Curvas de percentagem cumulativa e curva média da distribuição de frequência da resistência aparente de defeito (extraída de [7]).

Um segundo método de obter o valor da resistência de defeito foi sugerido por W.A. Lewis. Este método requer medições da corrente de fase e da tensão fase-terra ou fase-fase, em ambas as extremidades da linha. A partir dessas medições foram determinadas a localização do defeito e o valor da resistência de defeito, através de equações respeitantes à localização de defeitos em linhas de transmissão. A tabela 2.8 apresenta os valores de resistência de defeito obtidos para apenas 7 observações viáveis, em cada extremidade da linha de apenas um sistema de energia, num período de 30 meses, em 64 milhas de linhas.

Tabela 2.8 - Resistência de defeito obtida através de medições directas [ $\Omega$ ] (valores extraídos de [7]).

Número da observação	Resistência de defeito [ $\Omega$ ]		
	Extremidade 1	Extremidade 2	Média
1	16	12	14
2	45	45	45
3	7	7	7
4	7	22	14
5	36		30
6	32		
7	23		

Para as observações 1, 2, 3 e 4 não é conhecida a localização do defeito e por isso foram obtidos 2 valores de resistência de defeito. Para as observações 5, 6 e 7, a localização do defeito é

conhecida e por isso só foi obtido um valor de resistência de defeito para cada observação. Os valores de resistência de defeito foram obtidos a partir de 2 equações, cada uma delas dividida em parte real e imaginária, e resolvidas para determinar a localização do defeito e a resistência de defeito.

Através deste estudo foi concluído que os valores de resistência aparente de defeito mais frequentes nos sistemas estudados se situam entre os 5 e os 20  $\Omega$ . Salienta-se ainda que a medição directa da resistência de defeito durante o defeito é um método mais difícil de conseguir, pois em 78 observações apenas 7 foram consideradas viáveis.

Mais recentemente, Xia em conjunto com Wang, Vázquez, Xu, Wong e Ton, publicaram, no ano de 2015, um artigo onde se estima a resistência de defeito a partir de mais de 50 defeitos observados [8]. Para cada defeito, obtiveram-se registos para as duas extremidades da linha em defeito, nomeadamente a partir das formas de onda da tensão e corrente no momento do defeito. Não são especificadas quantas linhas fizeram parte do estudo. Os registos foram obtidos por uma empresa da área da energia em Alberta, Canadá, para defeitos fase-terra em linhas de transmissão de 240 kV e 138 kV. Os valores de resistência obtidos são reproduzidos na figura 2.4.

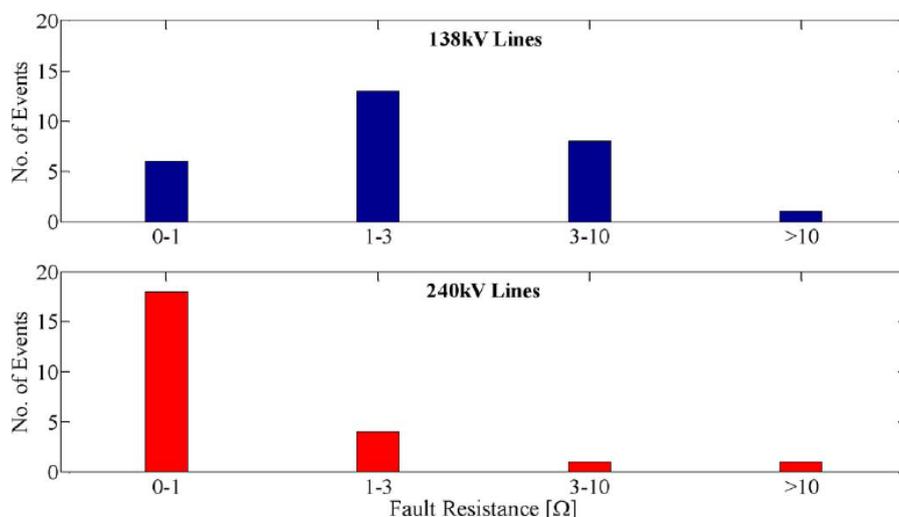


Figura 2.4 - Valores de resistência de defeito [ $\Omega$ ] para defeitos fase-terra em linhas de 138 e 240 kV (extraída de [8]).

Verifica-se que, para as linhas de 138 kV, a maior parte dos defeitos ocorreram com valores de resistências de defeito situados entre 1 e 3  $\Omega$  e que apenas 1 defeito se verificou para valores de resistência de defeito superiores a 10  $\Omega$ .

Para as linhas de 240 kV, observa-se um elevado número de defeitos ocorridos com valores de resistência de defeito inferiores a 1  $\Omega$ , baixando consideravelmente o número de defeitos à medida que aumentam os valores de resistência de defeito.

No ano de 2016, Sorrentino e Ayala publicaram um artigo, onde se analisaram 84 defeitos em linhas de transmissão de diferentes regiões da Venezuela [9]. Dos 84 defeitos apenas 70 foram

considerados viáveis. Foram então obtidos registos dos defeitos, através das tensões e correntes verificadas em ambas as extremidades das linhas, para 11 linhas de 765 kV, 3 linhas de 400 kV e 2 linhas de 230 kV. A tabela 2.9 apresenta um resumo dos valores obtidos para os diferentes níveis de tensão.

Tabela 2.9 - Resumo dos valores de resistência de defeito, em  $\Omega$ , obtidos para defeitos fase-terra em linhas de 765 kV, 400 kV e 230 kV (valores extraídos de [9]).

Número de linhas	Nível de tensão [kV]	Número de casos válidos	Valor máximo de resistência de defeito obtido [ $\Omega$ ]	Valores de resistência de defeito obtidos [ $\Omega$ ]
11	765	44	68,4	<40 para 95% dos casos
				<25 para 86% dos casos
				<12,5 para 75% dos casos
				<6 para 52% dos casos
3	400	13	13,9	<10 para 92% dos casos
				<7 para 77% dos casos
				<6 para 54% dos casos
2	230	13	9,3	<7 para 92% dos casos
				<5 para 77% dos casos
				<4 para 46% dos casos

Verifica-se que, para os níveis de tensão de 765 kV e 400 kV, mais de 50% dos defeitos ocorreram com valores de resistência de defeito inferiores a  $6 \Omega$ . Para o nível de tensão de 230 kV quase 50% dos defeitos ocorreram para valores inferiores a  $4 \Omega$ . Observa-se ainda que, para o nível de tensão de 765 kV, 5% dos casos ocorreram para valores de resistência de defeito bastante elevados, superiores ou iguais a  $40 \Omega$ .

A figura 2.5 apresenta detalhadamente o valor de resistência de defeito obtido para cada defeito registado, de acordo com o nível de tensão.

Estes autores fazem ainda uma comparação entre os valores obtidos, para o nível de tensão de 230 kV (13 casos observados), e os publicados em [8], para o nível de tensão de 240 kV (24 casos observados). Estes níveis de tensão são semelhantes e por isso comparáveis. A figura 2.6 reproduz um histograma onde é feita essa comparação. As barras a cinzento referem-se aos casos observados em [8], e as barras a preto referem-se aos casos observados em [9]. Observa-se uma discrepância entre os resultados das duas publicações, uma vez que, enquanto que a maioria dos casos observados em [8] ocorre com resistências de defeito inferiores a  $1 \Omega$ , não se verifica qualquer caso em [9] para este intervalo de valores. Já para o intervalo de valores de 3 a  $10 \Omega$  ocorre a situação contrária, verificando-se apenas cerca de 5% dos casos em [8] e cerca de 70% dos casos em [9]. No entanto, é de recordar que os registos em [9] correspondem a apenas 2 linhas de transmissão.

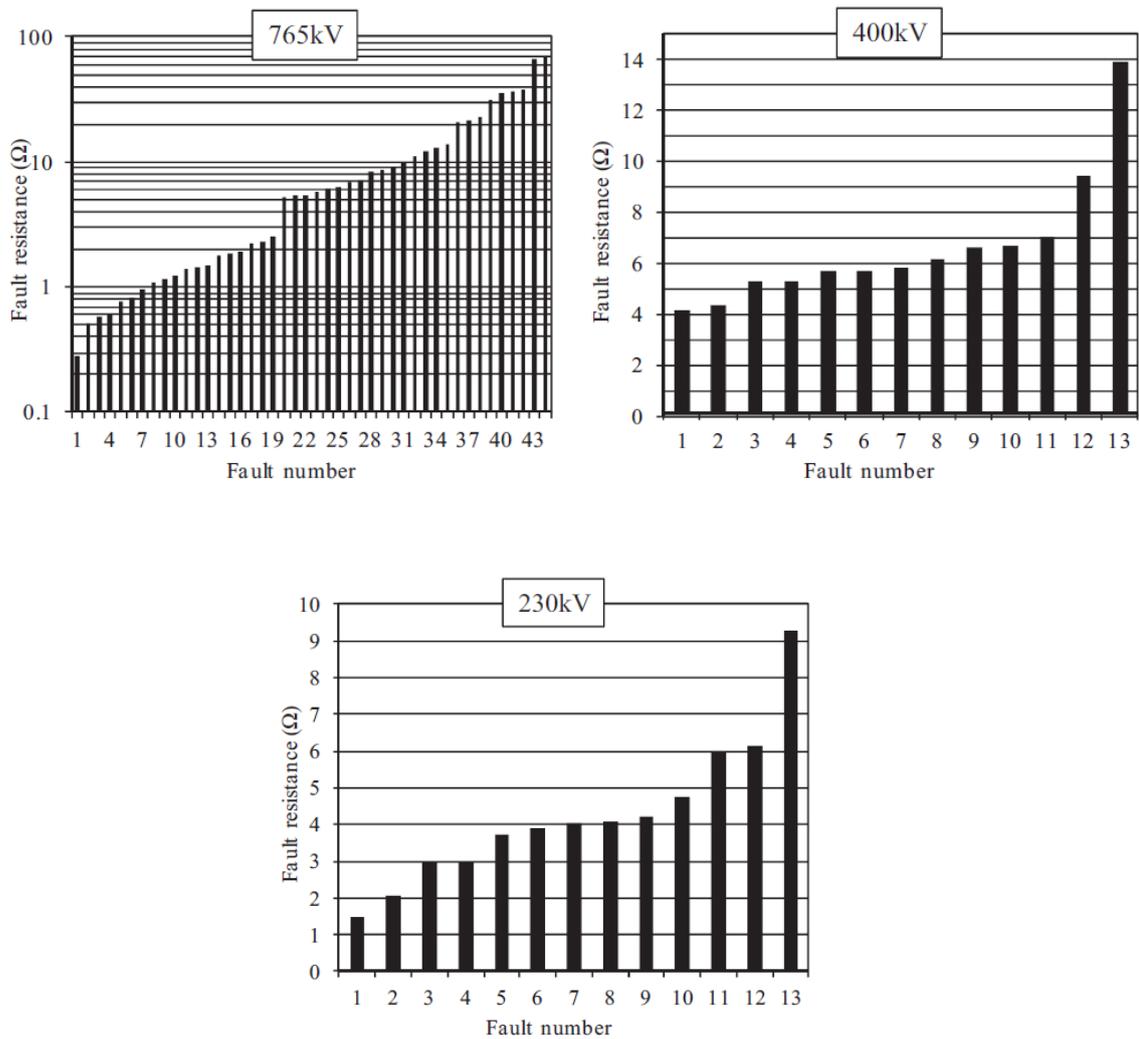


Figura 2.5 - Valores de resistência de defeito [ $\Omega$ ] para defeitos fase-terra em linhas de 765 kV, 400 kV e 230 kV (extraída de [9]).

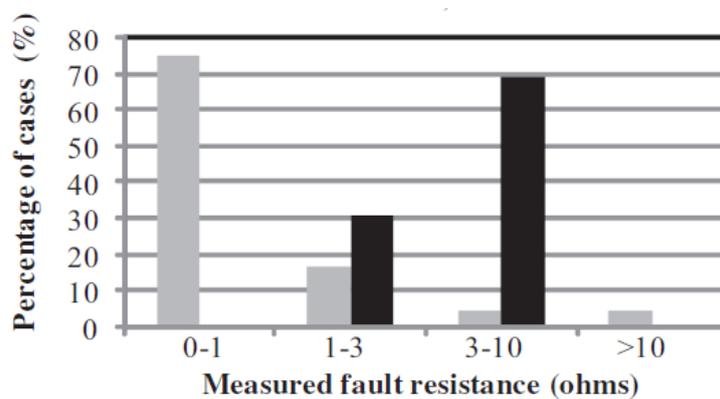


Figura 2.6 - Comparação entre os valores de resistência de defeito [ $\Omega$ ] obtidos em [8] (a cinzento), para o nível de tensão de 240 kV (24 casos observados) e em [9] (a preto), para o nível de tensão de 230 kV (13 casos observados) (extraída de [9]).

Também Gregoire e Klaja, num estudo da *Électricité De France*, obtiveram valores de resistência de defeito relativos a 6500 defeitos fase-terra para linhas de média tensão [10].

A figura 2.7 reproduz um histograma referente à percentagem de casos observados para diversas classes, de diferentes dimensões, de valores de resistência de defeito.

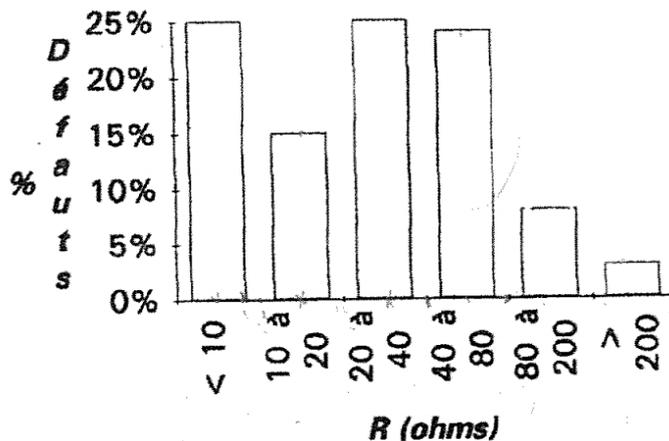


Figura 2.7 - Valores de resistência de defeito [ $\Omega$ ] para defeitos fase-terra em linhas de 60 kV (extraída de [10]).

Através da análise da figura 2.7 é possível observar que a grande maioria dos defeitos, cerca de 90%, ocorreu com valores de resistência de defeito inferiores a  $80 \Omega$ . Dá-se especial ênfase aos valores inferiores a  $10 \Omega$  (classe com menor dimensão) que correspondem a 25% da população em estudo. Verificam-se também valores bastante elevados de resistência de defeito (superiores a  $200 \Omega$ ) para este nível de tensão.

Também na média tensão, Hanninen faz uma abordagem à resistência de defeito, considerando regimes de neutro isolado e solidamente ligado à Terra [11]. Foram obtidos registos de defeitos ao longo de 3 anos (1994 a 1996). As figuras 2.8 e 2.9 reproduzem os valores das resistências de defeito obtidas para as duas situações consideradas.

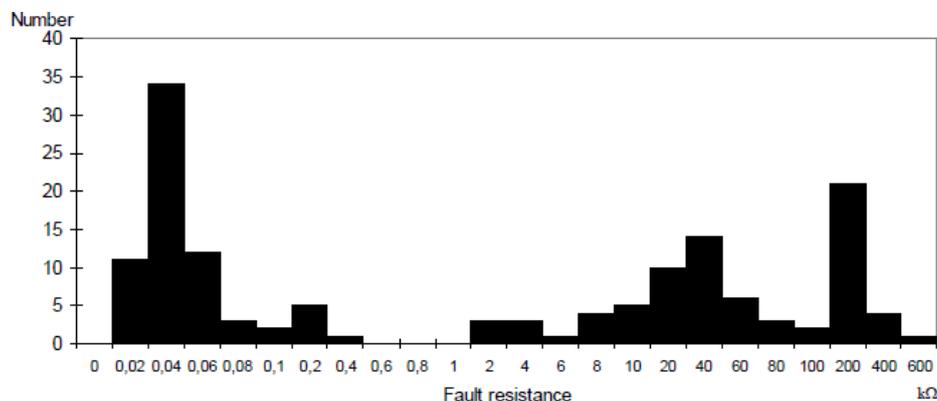


Figura 2.8 - Valores de resistência de defeito [ $k\Omega$ ] em regime de neutro isolado (extraída de [11]).

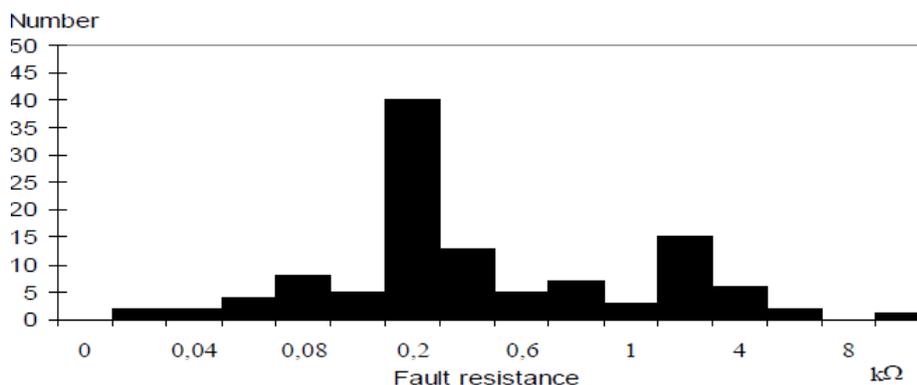


Figura 2.9 - Valores de resistência de defeito [ $k\Omega$ ] em regime de neutro solidamente ligado à Terra (extraída de [11]).

Através da análise das figuras 2.8 e 2.9 verifica-se que o regime de neutro tem uma grande influência nos valores de resistência de defeito. Para o regime de neutro isolado verifica-se uma gama de valores de resistência de defeito bastante abrangente, com maior incidência na zona das dezenas de  $\Omega$  e das dezenas de  $k\Omega$ . Verifica-se também um número considerável de defeitos para os 200  $k\Omega$ . Para o regime de neutro solidamente ligado à terra verifica-se uma gama de valores bastante mais reduzida (sem se verificarem defeitos para valores de dezenas e centenas de  $k\Omega$ , como na figura 2.8), com a grande maioria dos defeitos a apresentarem uma resistência de 0,2  $k\Omega$ . Para este regime, os valores encontrados na ordem das centenas de  $\Omega$ , são resultado da inexistência de cabos de guarda na média tensão (e por isso não haver redução da resistência de terra efectiva) e da impedância homopolar das linhas ser muito elevada.

### 2.3 Distribuições probabilísticas descritivas da resistência de defeito

Com base nos valores publicados em [7] e em [10] e apresentados em 2.2, M.T.Correia de Barros e A.dos Santos publicaram um artigo onde incluem um estudo estatístico dos valores de resistência de defeito obtidos, para defeitos fase-terra, de forma a poder descrevê-los de acordo com um modelo probabilístico [12]. Foi então sugerido um modelo baseado numa distribuição de Weibull cujos parâmetros, apresentados na tabela 2.10, são definidos por nível de tensão.

Tabela 2.10 - Parâmetros da distribuição de Weibull (valores extraídos de [12]).

Nível de tensão [kV]	$\delta$ [ $\Omega$ ]	$\beta$
138	33,1156	1,4594
220	38,2712	1,8406

Na figura 2.10 são reproduzidos os histogramas da distribuição dos valores de resistência de defeito publicados, para 138 kV e 230 kV respectivamente. São ainda comparados à função de densidade de probabilidade de Weibull que os permite descrever.

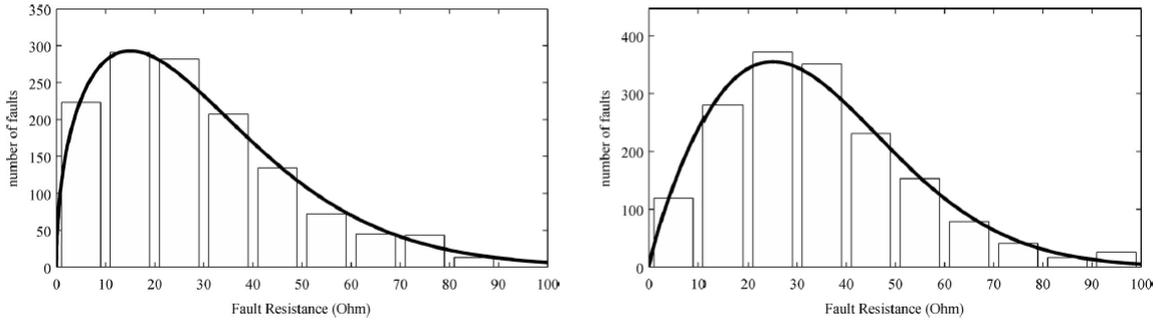


Figura 2.10 - Distribuição dos valores de resistência de defeito [ $\Omega$ ] e comparação com a função de densidade de probabilidade da distribuição de Weibull para o nível de tensão de 138 kV (à esquerda) e para o nível de tensão de 230 kV (à direita) (extraída de [12]).

São reproduzidas na figura 2.11, para os níveis de tensão de 220 kV (a linha cheia) e 132 kV (a tracejado), as funções de densidade de probabilidade e de distribuição cumulativa da distribuição de Weibull ajustada aos valores de resistência de defeito obtidos (círculos). O valor médio e a moda, apresentados na tabela 2.7, foram utilizados para o cálculo dos parâmetros da distribuição de Weibull.

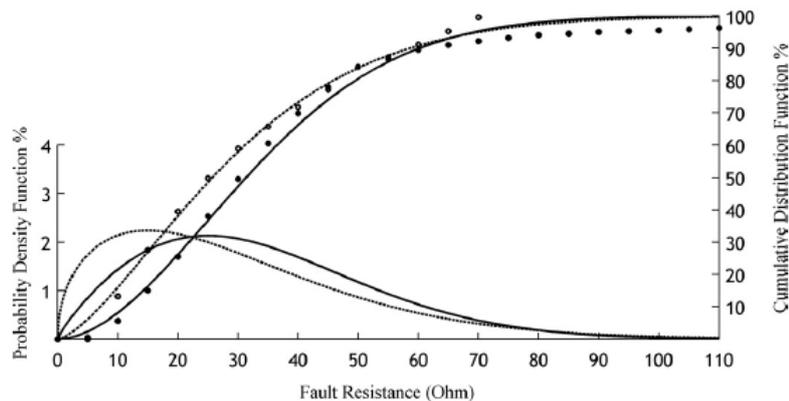


Figura 2.11 - Funções de densidade de probabilidade e de distribuição cumulativa da distribuição de Weibull ajustada aos valores de resistência de defeito obtidos (círculos), para os níveis de tensão de 220 kV (a linha cheia) e 132 kV (a tracejado) (extraída de [12]).

A figura 2.12 reproduz, para o nível de tensão de 60 kV, a partir de [10], um histograma da distribuição dos valores de resistência de defeito, de acordo com a figura 2.7. Associada ao histograma, aparece a respectiva função de densidade de probabilidade da distribuição de Weibull ajustada aos dados.

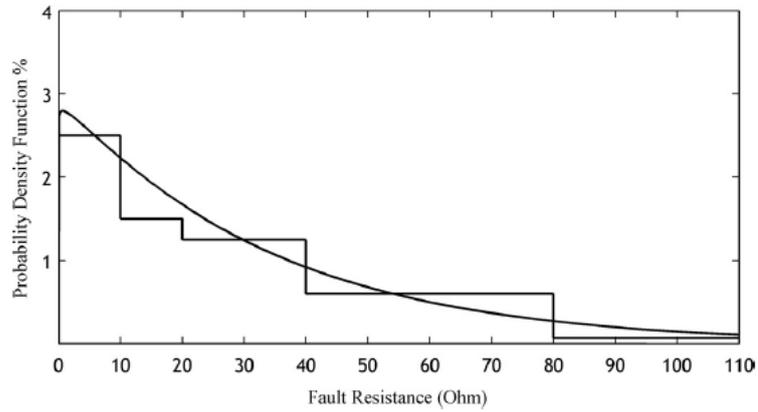


Figura 2.12 - Histograma da distribuição dos valores de resistência de defeito, para o nível de tensão de 60 kV, e respectiva função de densidade de probabilidade da distribuição de Weibull ajustada aos dados (extraída de [12]).

Também Barnard e Pahwa estudaram o comportamento de valores de resistência de defeito na rede de distribuição, e propuseram um modelo probabilístico para os descrever [13]. O modelo proposto é baseado numa distribuição de Weibull cuja função de densidade é apresentada na figura 2.13 com parâmetros  $\beta = 1,5$  e  $\delta = 62,9961$ .

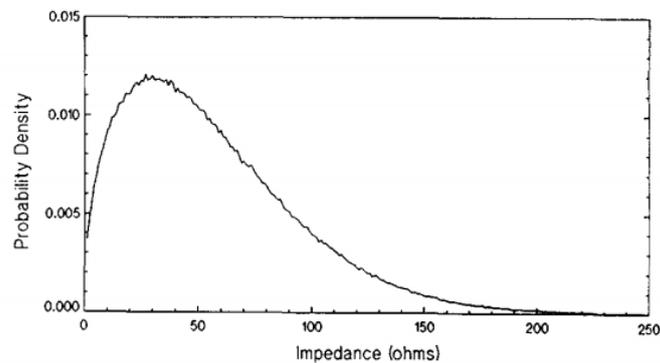


Figura 2.13 - Função de densidade de probabilidade de Weibull (extraída de [13]).

### 3 Determinação da resistência de defeito

Neste capítulo são apresentados métodos de cálculo da resistência de defeito e ainda os respectivos valores calculados para casos reais da RNT.

#### 3.1 Algoritmos

A determinação da resistência de defeito está directamente relacionada com a determinação da localização de defeitos, e por isso são apresentados dois algoritmos, em 3.1.1 e 3.1.2, para o cálculo da localização do defeito e posterior obtenção do valor da resistência de defeito. Apesar dos dois algoritmos serem distintos, ambos são baseados em medições de corrente e tensão. Nos dois algoritmos é assumido para as linhas um modelo de linha curta (<100 km) e de parâmetros concentrados.

##### 3.1.1 Algoritmo baseado em medições numa extremidade da linha

O primeiro algoritmo a ser apresentado é um algoritmo que utiliza medições de corrente e tensão, efectuadas em apenas uma extremidade da linha, quando ocorre um defeito.

O princípio de funcionamento do algoritmo, de acordo com [14], baseia-se numa análise de circuitos e por isso é apresentado na figura 3.1 um circuito monofásico, o mais simples de ser analisado. O circuito contém uma representação da linha onde ocorreu o defeito, uma representação da restante rede e ainda a localização do defeito.

Assim, na figura 3.1,  $F$  representa o local na linha onde ocorreu o defeito, assumido como defeito resistivo, e por isso representado por uma resistência  $R_F$ . Esta resistência corresponde à resistência do defeito, a calcular.  $\bar{Z}_l$  representa a impedância da linha de transmissão, que é conhecida, e cada extremidade da linha, S e R, é representada pelo seu equivalente de Thévenin. A extremidade S é representada pela fonte de tensão  $\bar{U}_S$  e pela impedância equivalente da rede  $\bar{Z}_S$  e a extremidade R é representada pela fonte de tensão  $\bar{U}_R$  e pela impedância equivalente da rede  $\bar{Z}_R$ . A distância ao defeito, vista da extremidade S é representada por  $d$ . Uma vez que este algoritmo só utiliza apenas medições de corrente e tensão de uma das extremidades da linha apenas são conhecidos  $\bar{V}_S$  e  $\bar{I}_S$ .

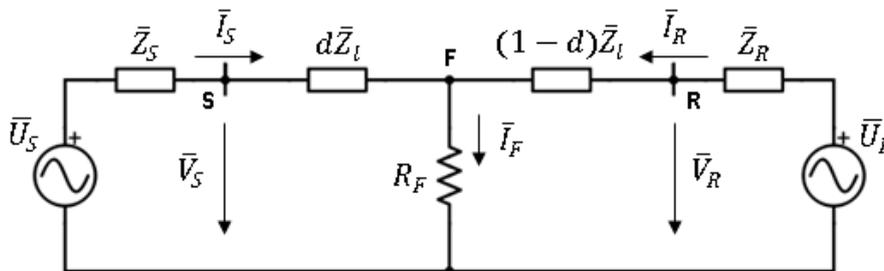


Figura 3.1 - Circuito monofásico representativo de um defeito resistivo.

O estudo do circuito baseia-se na análise das malhas que o constituem e uma vez que se conhece  $\bar{V}_S$  e  $\bar{I}_S$  a malha a ser analisada será a malha da esquerda. De acordo com as leis de Kirchhoff tem-se:

$$\bar{V}_S = d\bar{Z}_l\bar{I}_S + R_F\bar{I}_F \quad (3.1)$$

com  $R_F$  e  $\bar{I}_F$  desconhecido e:

$$\bar{I}_F = \bar{I}_S + \bar{I}_R \quad (3.2)$$

Como  $\bar{I}_R$  é desconhecido (pois com este algoritmo só se conhece a corrente e a tensão de uma extremidade da linha) também  $\bar{I}_F$  é desconhecido. Uma vez que, para além disso,  $R_F$  também é desconhecido, então não é possível obter o valor de  $d$  a partir da equação (3.1).

Para isso assume-se que a corrente  $\bar{I}_F$  é proporcional à variação de corrente em  $S$ , de acordo com [14], e por isso tem-se:

$$\bar{I}_S - \bar{I}_{S0} \equiv \Delta I_x = k_d \bar{I}_F \quad (3.3)$$

onde  $\bar{I}_{S0}$  corresponde à corrente antes do defeito e  $k_d$  corresponde ao factor de distribuição, que descreve a contribuição da corrente  $\bar{I}_S$  na corrente  $\bar{I}_F$ . O factor de distribuição é assumido como 1, de acordo com [15].

Assim sendo obtém-se:

$$\bar{V}_S = d\bar{Z}_l\bar{I}_S + R_F(\bar{I}_S - \bar{I}_{S0}) \quad (3.4)$$

onde as únicas incógnitas são agora  $d$  e  $R_F$ , que são exactamente os valores que se pretendem calcular. Como a equação (3.4) é complexa pode ser separada em parte real e parte imaginária,

$$\begin{cases} \text{Real}\{\bar{V}_S\} = d \times \text{Real}\{\bar{Z}_l\bar{I}_S\} + R_F \times \text{Real}\{(\bar{I}_S - \bar{I}_{S0})\} \\ \text{Imag}\{\bar{V}_S\} = d \times \text{Imag}\{\bar{Z}_l\bar{I}_S\} + R_F \times \text{Imag}\{(\bar{I}_S - \bar{I}_{S0})\} \end{cases} \quad (3.5)$$

e obtém-se um sistema de duas equações a duas incógnitas,  $d$  e  $R_F$ , cuja solução é dada por:

$$x = A^{-1}b \quad (3.6)$$

com

$$x = \begin{bmatrix} d \\ R_F \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

sendo

$$A = \begin{bmatrix} Z_{l_{real}} I_{S_{real}} & -Z_{l_{imag}} I_{S_{imag}} & I_{S_{real}} & -I_{S0_{real}} \\ Z_{l_{real}} I_{S_{imag}} & -Z_{l_{imag}} I_{S_{real}} & I_{S_{imag}} & -I_{S0_{imag}} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

e

$$b = \begin{bmatrix} V_{S_{real}} \\ V_{S_{imag}} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Assim, é possível calcular os valores da distância ao defeito,  $d$ , e da resistência de defeito,  $R_F$ .

### 3.1.2 Algoritmo baseado em medições nas duas extremidades da linha

O segundo algoritmo a ser apresentado é um algoritmo que utiliza medições de corrente e tensão efectuadas em ambas as extremidades da linha, quando ocorre um defeito.

O princípio de funcionamento do algoritmo baseia-se, tal como no primeiro algoritmo, na análise das malhas do circuito da figura 3.1. No entanto uma vez que se tem medições de ambas as extremidades da linha, também a malha da direita vai ser analisada [16]. Assim obtém-se para esta malha a equação (3.10).

$$\bar{V}_R = (1-d)\bar{Z}_l\bar{I}_R + \bar{V}_F \quad (3.10)$$

onde

$$\bar{V}_F = R_F\bar{I}_F \quad (3.11)$$

Pode agora obter-se duas equações, em ordem a  $\bar{V}_F$ , através das equações (3.1) e (3.10)

$$\bar{V}_F = \bar{V}_S - d\bar{Z}_l\bar{I}_S \quad (3.12)$$

e

$$\bar{V}_F = \bar{V}_R - (1-d)\bar{Z}_l\bar{I}_R \quad (3.13)$$

Igualando as equações (3.12) e (3.13) e resolvendo em ordem a  $d$  obtém-se

$$d = \frac{\bar{V}_S - \bar{V}_R + \bar{Z}_l \bar{I}_R}{\bar{Z}_l (\bar{I}_S + \bar{I}_R)} \quad (3.14)$$

Desta forma, calcula-se o valor da distância ao defeito vista da extremidade S.

Tendo a distância ao defeito calculada, calcula-se  $\bar{V}_F$  a partir da equação (3.13). Pode ainda calcular-se  $\bar{I}_F$  através da equação (3.2) e uma vez calculados  $\bar{V}_F$  e  $\bar{I}_F$  é agora possível calcular a resistência de defeito,  $R_F$ , através de

$$R_F = \frac{\bar{V}_F}{\bar{I}_F} \quad (3.15)$$

### 3.2 Aferição da aplicação dos algoritmos de localização de defeito ao cálculo das resistências de defeito

De acordo com os algoritmos anteriormente identificados e explicados é feita uma aferição, a partir de vários defeitos simulados em duas diferentes localizações da rede de teste, correspondente à “RNT Sul”. Para isso são aplicados os dois algoritmos, e com base na análise aos erros de cada um deles, é escolhido o algoritmo mais adequado ao cálculo dos valores de resistência de defeito.

#### 3.2.1 Rede de teste

De forma a testar o funcionamento e a viabilidade dos algoritmos identificados em 3.1, foram efectuadas várias simulações com o *software* EMTP-RV na rede de teste apresentada na figura 3.2, que corresponde à “RNT Sul”. A rede de teste apresenta três níveis de tensão, nomeadamente 400kV, 150kV e 60kV.

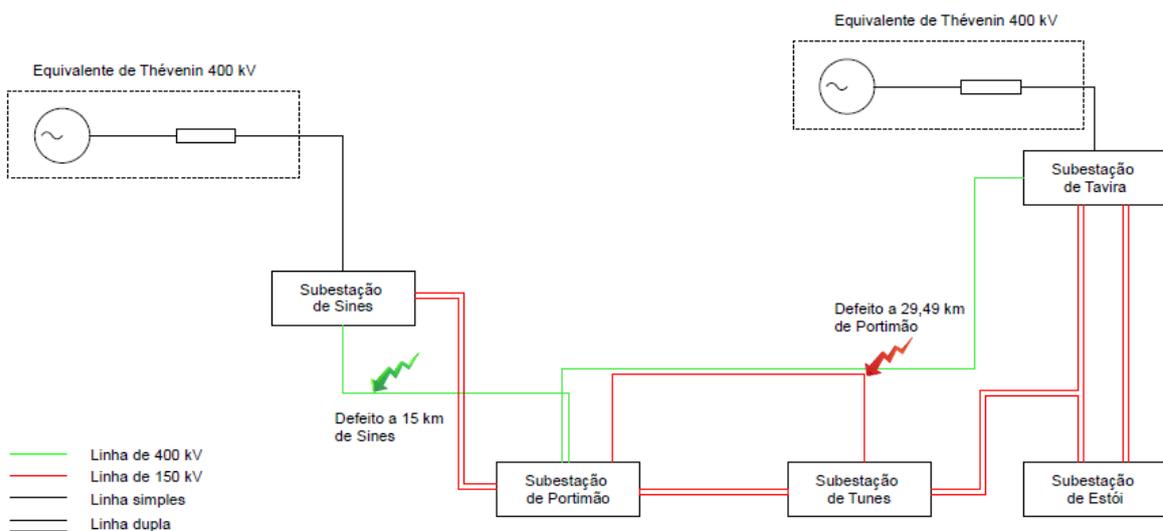


Figura 3.2 - Rede de teste – RNT Sul.

De acordo com a figura 3.2 é possível observar que a rede inclui cinco subestações: Sines, Portimão, Tunes, Estói e Tavira, cada uma delas composta por vários transformadores de potência que garantem a ligação entre os diferentes níveis de tensão.

Todos os transformadores de potência presentes em cada subestação são constituídos por três enrolamentos. O primeiro e o segundo enrolamento estão ligados em estrela, e o terceiro enrolamento está ligado em triângulo. Tanto a subestação de Sines como a de Tavira inclui dois transformadores de 150/400/20 kV e ainda dois transformadores de 150/60/10 kV. A subestação de Portimão inclui apenas um transformador de 150/400/20 kV e também dois transformadores de 150/60/10 kV. A subestação de Tunes contém quatro transformadores de 150/60/10 kV. Por último, a subestação de Estói contém três transformadores de 150/60/10 kV.

A rede de teste apresenta também dois equivalentes de Thévenin da rede a montante das subestações de Sines e de Tavira. Ambos são caracterizados pelas correntes mínimas de curto-circuito trifásico e monofásico, e pela relação máxima  $X/R$ . São ambos constituídos por uma fonte de tensão, de 400kV de tensão composta, e uma impedância em série com a fonte. A tabela 3.1 apresenta as características referidas anteriormente onde os valores foram retirados do PDIRT 2016-2025 [2].

Tabela 3.1 - Características dos equivalentes de Thévenin da rede de teste.

	Sines	Tavira
$I_{cc_{min}} 3\phi$ [kA]	13,9	8,3
$I_{cc_{min}} 1\phi$ [kA]	14,9	8,0
$\frac{X}{R}$	10,9	8,8

O equivalente de Thévenin das redes a montante é representado na simulação em componentes simétricas, sendo calculadas através de:

$$X_d = X_i = \frac{V_{comp}}{\sqrt{3}I_{cc_{min}3\phi}} \quad (3.16)$$

$$X_h = \frac{\sqrt{3}V_{comp}}{I_{cc_{min}1\phi}} - 2X_d \quad (3.17)$$

$$R_k = \frac{X}{R}^{-1} \times X_k, k = \{d, i, h\} \quad (3.18)$$

Através das equações (3.16) a (3.18) obtêm-se as impedâncias de Thévenin, apresentadas na tabela 3.2, calculadas para os valores obtidos na tabela 3.1.

Tabela 3.2 - Impedâncias de Thévenin da rede de teste.

	Sines	Tavira
$Z_d[\Omega]$	1,52+j16,6	3,16+j27,8
$Z_i[\Omega]$	1,52+j16,6	3,16+j27,8
$Z_h[\Omega]$	1,22+j13,3	3,52+j31,0

A rede de teste é ainda constituída por diversas linhas de transmissão, podendo estas ser simples (com um terno por apoio) ou duplas (com dois ternos por apoio), a interligar as várias subestações. Cada linha foi modelada através do modelo de parâmetros concentrados (modelo CP no *software* EMTP), construído a partir dos dados de geometria da linha e das características eléctricas dos condutores que a constituem.

Foram obtidas e calculadas, com o *software* EMTP-RV e utilizando o modelo CP, as componentes das susceptâncias transversais e impedâncias longitudinais para as diversas linhas da rede de teste, em componentes directa, inversa e homopolar.

A linha que liga a subestação de Sines à de Portimão a 400kV, designada de LSN\_PO3, é uma das linhas envolvidas nos defeitos simulados. Esta linha tem 98,4 km de comprimento, e está dividida em dois troços distintos, com diferentes características geométricas e eléctricas. O primeiro troço de linha, LSN\_PO3\_t1, tem 95,4 km de comprimento e é de linha simples. O segundo troço, LSN\_PO3\_t2, tem 3,0 km e é duplo. Uma vez que os defeitos simulados nesta linha se dão a uma distância de 15 km de Sines, separou-se o primeiro troço em duas partes tendo uma delas 15 km e a outra perfazendo os restantes 80,436 km. Para ambas as partes do primeiro troço as componentes simétricas são iguais. Nas tabelas 3.3 e 3.5 apresentam-se as componentes simétricas das susceptâncias, e nas tabelas 3.4 e 3.6 apresentam-se as componentes simétricas das impedâncias, para os dois troços da linha, LSN\_PO3\_t1 e LSN\_PO3\_t2, respectivamente.

Tabela 3.3 – Componentes simétricas das susceptâncias para o troço LSN\_PO3\_t1 da rede de teste [F/km], sendo h a componente homopolar, i a inversa e d a directa.

	h	i	d
h	$7,56261 \times 10^{-9}$		
d	$1,27149 \times 10^{-10}$	$-4,11316 \times 10^{-10}$	
i	$1,27149 \times 10^{-10}$	$1,13056 \times 10^{-8}$	$-4,11316 \times 10^{-10}$

Tabela 3.4 – Componentes simétricas das impedâncias para o troço LSN\_PO3\_t1 da rede de teste [ $\Omega / \text{km}$ ], sendo h a componente homopolar, i a inversa e d a directa.

	h	i	d
h	$1,93517 \times 10^{-1}$ $+ j6,78199 \times 10^{-1}$		
d	$-7,84417 \times 10^{-3}$ $- j3,00433 \times 10^{-3}$	$-2,17424 \times 10^{-2}$ $+ j1,46772 \times 10^{-2}$	
i	$6,52391 \times 10^{-3}$ $- j5,29109 \times 10^{-3}$	$3,24338 \times 10^{-2}$ $+ j3,22148 \times 10^{-1}$	$2,35820 \times 10^{-2}$ $+ j1,14909 \times 10^{-2}$

Tabela 3.5 – Componentes simétricas das susceptâncias para o troço LSN\_PO3\_t2 da rede de teste [ $F / \text{km}$ ], sendo h a componente homopolar, i a inversa e d a directa.

	Terno 1			Terno 2		
	h	i	d	h	i	d
Terno 1	h	$6,50966 \times 10^{-9}$				
	d	$2,68173 \times 10^{-10}$	$-4,52250 \times 10^{-10}$			
	i	$2,68173 \times 10^{-10}$	$1,16841 \times 10^{-8}$	$-4,52250 \times 10^{-10}$		
Terno 2	h	$-2,07897 \times 10^{-9}$	$5,37123 \times 10^{-11}$	$5,37123 \times 10^{-11}$	$6,50966 \times 10^{-9}$	
	d	$-1,16614 \times 10^{-11}$	$1,51382 \times 10^{-10}$	$2,15281 \times 10^{-10}$	$6,50086 \times 10^{-11}$	$-5,27397 \times 10^{-10}$
	i	$-1,16614 \times 10^{-11}$	$2,15281 \times 10^{-10}$	$1,51382 \times 10^{-10}$	$6,50086 \times 10^{-11}$	$1,16841 \times 10^{-8}$

Tabela 3.6 – Componentes simétricas das impedâncias para o troço LSN\_PO3\_t2 da rede de teste [ $\Omega / \text{km}$ ], sendo h a componente homopolar, i a inversa e d a directa.

	Terno 1			Terno 2		
	h	i	d	h	i	d
Terno 1	h	$1,71325 \times 10^{-1} + j8,01086 \times 10^{-1}$				
	d	$4,87363 \times 10^{-4}$ $-j2,60552 \times 10^{-2}$	$-2,350 \times 10^{-2}$ $+j1,37863 \times 10^{-2}$			
	i	$7,60558 \times 10^{-3}$ $-j2,94376 \times 10^{-2}$	$2,939566 \times 10^{-2}$ $+j3,11577 \times 10^{-1}$	$2,45531 \times 10^{-2}$ $+j1,28045 \times 10^{-2}$		
Terno 2	h	$1,40744 \times 10^{-1}$ $+j3,81825 \times 10^{-1}$	$6,13513 \times 10^{-3}$ $-j1,92997 \times 10^{-2}$	$3,11724 \times 10^{-4}$ $-j2,23091 \times 10^{-2}$	$1,71325 \times 10^{-1}$ $+j8,01086 \times 10^{-1}$	
	d	$-1,94761 \times 10^{-2}$ $+j1,08846 \times 10^{-2}$	$9,41293 \times 10^{-3}$ $-j5,83657 \times 10^{-3}$	$-2,53283 \times 10^{-4}$ $-j8,67288 \times 10^{-3}$	$-2,92965 \times 10^{-2}$ $+j8,13217 \times 10^{-3}$	$-2,33656 \times 10^{-2}$ $-j1,48614 \times 10^{-2}$
	i	$1,36464 \times 10^{-2}$ $+j1,49630 \times 10^{-2}$	$-4,89891 \times 10^{-4}$ $-j8,68434 \times 10^{-3}$	$-9,76109 \times 10^{-3}$ $-j5,23355 \times 10^{-3}$	$2,23208 \times 10^{-2}$ $+j1,34497 \times 10^{-2}$	$2,939566 \times 10^{-2}$ $+j3,11577 \times 10^{-1}$

O outro defeito simulado ocorre na linha LPO\_TN3, que liga a subestação de Portimão à de Tunes. Esta linha tem um comprimento de 41,9 km, e está dividida em três troços, com diferentes características geométricas e eléctricas. O primeiro troço, LPO\_TN3\_t1, tem 3,6 km de comprimento e é simples, com um nível de tensão de 150 kV. O segundo troço, LPO\_TN3\_t2, tem 25,9 km, e é um troço de linha dupla, com um terno a 400 kV e outro a 150 kV. O terceiro troço, LPO\_TN3\_t3, tem 12,4 km e é um troço de linha simples com um nível de tensão de 150 kV. Nas tabelas 3.7, 3.9 e 3.11 apresentam-se as componentes simétricas das susceptâncias obtidas e nas tabelas 3.8, 3.10 e 3.12 apresentam-se as componentes simétricas das impedâncias para os troços LPO\_TN3\_t1, LPO\_TN3\_t2 e LPO\_TN3\_t3.

Tabela 3.7 – Componentes simétricas das susceptâncias para o troço LPO\_TN3\_t1 da rede de teste [F/km], sendo h a componente homopolar, i a inversa e d a directa.

	h	i	d
h	$6.42076 \times 10^{-9}$		
d	$1.91792 \times 10^{-10}$	$-4.25148 \times 10^{-10}$	
i	$1.91792 \times 10^{-10}$	$1.17214 \times 10^{-8}$	$-4.25148 \times 10^{-10}$

Tabela 3.8 – Componentes simétricas das impedâncias do troço LPO\_TN3\_t1 da rede de teste [ $\Omega$ /km], sendo h a componente homopolar, i a inversa e d a directa.

	h	i	d
h	$1.71938 \times 10^{-1}$ $+j8.00312 \times 10^{-1}$		
d	$-2.99081 \times 10^{-2}$ $+j8.78559 \times 10^{-3}$	$-2.44827 \times 10^{-2}$ $+j1.30323 \times 10^{-2}$	
i	$2.32389 \times 10^{-2}$ $+j1.40525 \times 10^{-2}$	$2.94051 \times 10^{-2}$ $+j3.11562 \times 10^{-1}$	$2.47719 \times 10^{-2}$ $+j1.160 \times 10^{-2}$

Tabela 3.9 – Componentes simétricas das susceptâncias para o troço LPO\_TN3\_t2 da rede de teste [F/km], sendo h a componente homopolar, i a inversa e d a directa.

		Terno 1			Terno 2		
		h	i	d	h	i	d
Terno 1	h	$7.06695 \times 10^{-9}$					
	d	$1.10634 \times 10^{-10}$	$-4.65578 \times 10^{-10}$				
	i	$1.10634 \times 10^{-10}$	$1.17528 \times 10^{-8}$	$-4.65578 \times 10^{-10}$			
Terno 2	h	$-1.69730 \times 10^{-9}$	$-4.55835 \times 10^{-11}$	$-4.55835 \times 10^{-11}$	$7.06695 \times 10^{-9}$		
	d	$1.20078 \times 10^{-10}$	$1.28296 \times 10^{-10}$	$1.75135 \times 10^{-10}$	$2.71057 \times 10^{-10}$	$-4.54821 \times 10^{-10}$	
	i	$1.20078 \times 10^{-10}$	$1.75135 \times 10^{-10}$	$1.28296 \times 10^{-10}$	$2.71057 \times 10^{-10}$	$1.17528 \times 10^{-8}$	$-4.54821 \times 10^{-10}$

Tabela 3.10 – Componentes simétricas das impedâncias para o troço LPO\_TN3\_t2 da rede de teste [ $\Omega / \text{km}$ ], sendo h a componente homopolar, i a inversa e d a directa.

		Terno 1			Terno 2		
		h	i	d	h	i	d
Terno 1	h	$1.70747 \times 10^{-1} + j8.07112 \times 10^{-1}$					
	d	$-4.49102 \times 10^{-4}$ $-j2.48957 \times 10^{-2}$	$-2.36648 \times 10^{-2}$ $+j1.38933 \times 10^{-2}$				
	i	$7.59357 \times 10^{-3}$ $-j2.79217 \times 10^{-2}$	$2.93217 \times 10^{-2}$ $+j3.11753 \times 10^{-1}$	$2.45887 \times 10^{-2}$ $+j1.29840 \times 10^{-2}$			
Terno 2	h	$1.40495 \times 10^{-1} + j3.87315 \times 10^{-1}$	$5.42848 \times 10^{-3} - j1.83746 \times 10^{-2}$	$4.18250 \times 10^{-4} - j2.11006 \times 10^{-2}$	$1.70747 \times 10^{-1} + j8.07112 \times 10^{-1}$		
	d	$-1.84828 \times 10^{-2} + j1.01881 \times 10^{-2}$	$9.43712 \times 10^{-3} - j5.86792 \times 10^{-3}$	$-2.70340 \times 10^{-4} - j8.73416 \times 10^{-3}$	$-2.79776 \times 10^{-2} + j7.38460 \times 10^{-3}$	$-2.35388 \times 10^{-2} + j1.48024 \times 10^{-2}$	
	i	$1.31986 \times 10^{-2} + j1.38885 \times 10^{-2}$	$-4.88595 \times 10^{-4} - j8.71486 \times 10^{-3}$	$-9.80033 \times 10^{-3} - j5.23882 \times 10^{-3}$	$2.17848 \times 10^{-2} + j1.20589 \times 10^{-2}$	$2.93217 \times 10^{-2} + j3.11753 \times 10^{-1}$	$2.38643 \times 10^{-2} + j1.35477 \times 10^{-2}$

Tabela 3.11 – Componentes simétricas das susceptâncias para o troço LPO\_TN3\_t3 da rede de teste [ $\text{F} / \text{km}$ ], sendo h a componente homopolar, i a inversa e d a directa.

	h	i	d
h	$6.37745 \times 10^{-9}$		
d	$2.35470 \times 10^{-10}$	$-4.86555 \times 10^{-10}$	
i	$2.35470 \times 10^{-10}$	$1.17054 \times 10^{-8}$	$-4.86555 \times 10^{-10}$

Tabela 3.12 – Componentes simétricas das impedâncias do troço LPO\_TN3\_t3 da rede de teste [ $\Omega / \text{km}$ ], sendo h a componente homopolar, i a inversa e d a directa.

	h	i	d
h	$1.69736 \times 10^{-1}$ $+ j8.11709 \times 10^{-1}$		
d	$-2.74973 \times 10^{-2}$ $+ j7.03230 \times 10^{-3}$	$-2.36194 \times 10^{-2}$ $+ j1.47714 \times 10^{-2}$	
i	$2.14988 \times 10^{-2}$ $+ j1.15271 \times 10^{-2}$	$2.92812 \times 10^{-2}$ $+ j3.11831 \times 10^{-1}$	$2.39371 \times 10^{-2}$ $+ j1.35959 \times 10^{-2}$

Através das componentes simétricas das susceptâncias e das impedâncias é possível obter as matrizes de impedâncias directa, inversa e homopolar dos troços das linhas em questão. Para os troços de linha simples, os valores das impedâncias são retirados directamente das matrizes apresentadas acima, no entanto para os troços de linha dupla é necessário somar a contribuição da componente mútua a cada terno.

Os parâmetros R, X e C de cada troço das linhas em questão são obtidos a partir das componentes simétricas das susceptâncias e das impedâncias, através do procedimento abaixo indicado. É de notar que as componentes directa e inversa apresentam o mesmo valor e portanto só se faz referência aos parâmetros da componente inversa.

Para os troços de linha simples:

- 1) O parâmetro C da sequência directa, inversa e homopolar é retirado da matriz de componentes simétricas das susceptâncias. Na sequência homopolar corresponde à posição (1,1) da matriz e na sequência inversa à posição (3,2) da matriz.
- 2) O parâmetro R da sequência directa, inversa e homopolar é retirado da matriz de componentes simétricas das impedâncias. Na sequência homopolar corresponde à parte real do elemento na posição (1,1) da matriz e na sequência inversa à parte real do elemento posição (3,2) da matriz.
- 3) O parâmetro X é retirado da mesma forma que o parâmetro R mas corresponde à parte imaginária dos elementos referidos em 2).

Para os troços de linha dupla:

- 1) O parâmetro C da sequência directa, inversa e homopolar é retirado da matriz de componentes simétricas das susceptâncias. Para o terno 1, o parâmetro C na sequência homopolar corresponde à posição (1,1) da matriz e na sequência inversa à posição (3,2) da matriz. Para o terno 2, o parâmetro C na sequência homopolar corresponde à posição (4,4) da matriz e na sequência inversa à posição (6,5). Em relação à parte mútua o parâmetro C na sequência homopolar corresponde à posição (4,1) da matriz e na sequência inversa à posição (6,2) da matriz.

- 2) O parâmetro R da sequência directa, inversa e homopolar é retirado da matriz de componentes simétricas das impedâncias. Para o terno 1, o parâmetro R na sequência homopolar corresponde à parte real do elemento na posição (1,1) da matriz e na sequência inversa à parte real do elemento na posição (3,2) da matriz. Para o terno 2, o parâmetro R na sequência homopolar corresponde à parte real do elemento na posição (4,4) da matriz e na sequência inversa à parte real do elemento na posição (6,5). Em relação à parte mútua o parâmetro R na sequência homopolar corresponde à parte real do elemento na posição (4,1) da matriz e na sequência inversa à parte real do elemento na posição (6,2) da matriz.
- 3) O parâmetro X é retirado da mesma forma que o parâmetro R mas corresponde à parte imaginária dos elementos referidos em 2).
- 4) O valor de cada parâmetro R, X e C final para cada terno corresponde à soma entre os parâmetros iniciais para cada terno e a componente mútua.

As tabelas 3.13 a 3.17 apresentam os parâmetros dos vários troços das linhas onde ocorreram os defeitos simulados. As componentes directa e inversa apresentam sempre os mesmos valores e por isso só serão apresentados os valores para a componente directa.

Tabela 3.13 - Parâmetros directo e homopolar do troço LSN\_PO3\_t1 da rede de teste. R e X em  $\Omega / km$  e C em  $nF / km$ .

Sequência	Parâmetros	Terno 1
Directo	R [ $\Omega / km$ ]	0,03243
	X [ $\Omega / km$ ]	0,3221
	C [ $nF / km$ ]	11,31
Homopolar	R [ $\Omega / km$ ]	0,1935
	X [ $\Omega / km$ ]	0,6782
	C [ $nF / km$ ]	7,5626

Tabela 3.14 - Parâmetros directo e homopolar do troço LSN\_PO3\_t2 da rede de teste. R e X em  $\Omega / km$  e C em  $nF / km$ .

Sequência	Parâmetros	Terno 1	Terno 2
Directo	R [ $\Omega / km$ ]	0,0289	0,0289
	X [ $\Omega / km$ ]	0,3029	0,3029
	C [ $nF / km$ ]	11,8994	11,8994
Homopolar	R [ $\Omega / km$ ]	0,3121	0,3121
	X [ $\Omega / km$ ]	1,1829	1,1829
	C [ $nF / km$ ]	4,4307	4,4307

Tabela 3.15 - Parâmetros do trecho LPO\_TN3\_t1 da rede de teste. R e X em  $\Omega / km$  e C em  $nF / km$ .

Sequência	Parâmetros	Terno 1
Directo	R [ $\Omega / km$ ]	0,0294
	X [ $\Omega / km$ ]	0,3116
	C [nF / km]	11,721
Homopolar	R [ $\Omega / km$ ]	0,1719
	X [ $\Omega / km$ ]	0,8003
	C [nF / km]	6,4206

Tabela 3.16 - Parâmetros do trecho LPO\_TN3\_t2 da rede de teste. R e X em  $\Omega / km$  e C em  $nF / km$ .

Sequência	Parâmetros	Terno 1	Terno 2
Directo	R [ $\Omega / km$ ]	0,0288	0,0288
	X [ $\Omega / km$ ]	0,3030	0,3030
	C [nF / km]	11,9279	11,9279
Homopolar	R [ $\Omega / km$ ]	0,3112	0,3112
	X [ $\Omega / km$ ]	1,1944	1,1944
	C [nF / km]	5,3697	5,3697

Tabela 3.17 - Parâmetros do trecho LPO\_TN3\_t3 da rede de teste. R e X em  $\Omega / km$  e C em  $nF / km$ .

Sequência	Parâmetros	Terno 1
Directo	R [ $\Omega / km$ ]	0,0293
	X [ $\Omega / km$ ]	0,3118
	C [nF / km]	11,7054
Homopolar	R [ $\Omega / km$ ]	0,1697
	X [ $\Omega / km$ ]	0,8117
	C [nF / km]	6,3775

Para o cálculo da matriz de impedâncias directa, inversa e homopolar da linha é necessário ter em conta a contribuição de todos os trechos. Salienta-se que, para os trechos de linha dupla, o terno que entra em consideração para o cálculo da matriz de impedâncias da linha é o que efectivamente faz a ligação entre as duas subestações em questão. Assim, para o primeiro defeito é considerado o terno 1 do trecho LSN\_PO3\_t2, e para o segundo defeito é considerado o terno 2 do trecho LPO\_TN3\_t2.

Tendo cada troço definido, multiplicam-se as impedâncias directa, inversa e homopolar pelo comprimento do troço. Posteriormente somam-se as impedâncias directas, as impedâncias inversas e as impedâncias homopolares dos vários troços. Obtém-se assim a matriz de impedâncias diagonal de cada linha em questão, representadas nas tabelas 3.18 e 3.19, onde os valores são apresentados em  $\Omega$ . Dado os troços analisados constituírem linhas não perfeitamente transpostas, os elementos fora da diagonal principal não são exactamente zero. No entanto são muito pequenos, o que faz com que se desprezem e por isso são representados como zero.

Tabela 3.18 - Matriz de impedâncias diu para a linha LSN\_PO3 considerada no algoritmo de localização de defeito [ $\Omega$ ].

	d	i	h
d	$3,1805 + j31,637$	0	0
i	0	$3,1805 + j31,637$	0
h	0	0	$19,3962 + j68,249$

Tabela 3.19 - Matriz de impedâncias diu para a linha LPO\_TN3 considerada no algoritmo de localização de defeito [ $\Omega$ ].

	d	i	h
d	$1,2151 + j12,8358$	0	0
i	0	$1,2151 + j12,8358$	0
h	0	0	$10,7832 + j43,8811$

### 3.2.2 Resultados

Para o cálculo da resistência de defeito consideraram-se os defeitos fase-terra correspondentes a Sines-Portimão e Portimão-Tunes, representados na figura 3.2.

Para cada um dos algoritmos foram calculados valores de resistência de defeito e comparados com valores de resistência definidos na simulação com o *software* EMTP-RV. Consideraram-se assim 6 casos diferentes, assumindo resistências de 0, 10, 20, 30, 40 e 50  $\Omega$ .

De forma a aferir e justificar qual o algoritmo adequado para o cálculo da resistência de defeito, são apresentados, nas tabelas 3.20 a 3.25, os valores de resistência de defeito calculados e os erros associados a cada um dos dois algoritmos apresentados em 3.1. Para o algoritmo que utiliza medições de apenas uma extremidade da linha são apresentados os resultados vistos de cada uma das extremidades da linha.

É apresentado um erro absoluto, correspondente à diferença entre o valor de resistência obtido com o algoritmo em questão e o valor da resistência definido na simulação. É também apresentado um erro relativo, em percentagem.

Tabela 3.20 - Valores de resistência de defeito e erros, absoluto e relativo, do algoritmo que utiliza informações de uma extremidade da linha, para o defeito Sines-Portimão (visto de Sines).

Valor da resistência de defeito [ $\Omega$ ]	Valor da resistência de defeito obtido através do 1º algoritmo [ $\Omega$ ]	Erro absoluto [ $\Omega$ ]	Erro relativo [%]
0	0	0	-
10	8,8	1,2	12,5
20	17,3	2,7	13,3
30	25,9	4,1	13,6
40	34,5	5,5	13,7
50	43,1	6,9	13,7

Tabela 3.21 – Valores de resistência de defeito e erros, absoluto e relativo, do algoritmo que utiliza informações de uma extremidade da linha, para o defeito Sines-Portimão (visto de Portimão).

Valor da resistência de defeito [ $\Omega$ ]	Valor da resistência de defeito obtido através do 1º algoritmo [ $\Omega$ ]	Erro absoluto [ $\Omega$ ]	Erro relativo [%]
0	1,0	1,0	-
10	38,9	28,9	288,5
20	76,2	56,2	281,0
30	113,5	83,5	278,3
40	150,7	110,7	276,9
50	188,0	138,0	276,0

Através da análise da tabela 3.20 é possível observar erros relativos relativamente baixos e quase constantes. Verifica-se ainda que, à medida que aumentam os valores de resistência de defeito, aumenta o erro absoluto. Por outro lado, através da análise da tabela 3.21, é possível observar erros extremamente elevados para qualquer um dos 6 casos avaliados, verificando-se erros entre os 270% e o 290%. Estes erros provêm do facto de se ter considerado  $k_d = 1$ . Verifica-se também que à medida que aumentam os valores de resistência de defeito, aumenta o erro absoluto. Isso não se verifica para o erro relativo, uma vez que este diminui à medida que aumentam os valores de resistência de defeito.

Constata-se assim uma grande diferença entre os erros associados a este algoritmo, quando o defeito é visto de extremidades diferentes. Para além disso, uma vez que os erros obtidos para este algoritmo são extremamente elevados quando o defeito é visto de Portimão, conclui-se que este algoritmo é pouco preciso nos resultados e portanto não é viável utilizá-lo na obtenção dos valores de resistência de defeito.

Tabela 3.22 - Valores de resistência de defeito e erros, absoluto e relativo, do algoritmo que utiliza informações das duas extremidades da linha, para o defeito Sines-Portimão.

Valor da resistência de defeito [ $\Omega$ ]	Valor da resistência de defeito obtido através do 2º algoritmo [ $\Omega$ ]	Erro absoluto [ $\Omega$ ]	Erro relativo [%]
0	1,9	1,9	-
10	12,3	2,3	23,1
20	22,5	2,5	12,5
30	32,7	2,7	8,9
40	42,8	2,8	7,1
50	52,9	2,9	6,0

A tabela 3.22 permite observar erros absolutos e relativos aceitáveis e bastante melhores para o algoritmo que utiliza medições de ambas as extremidades da linha, verificando-se erros entre os 6 e os 23%. Verifica-se ainda que, à medida que aumentam os valores de resistência de defeito, aumenta ligeiramente o erro absoluto e por outro lado diminui o erro relativo.

Tabela 3.23 - Valores de resistência de defeito e erros, absoluto e relativo, do algoritmo que utiliza informações de uma extremidade da linha, para o defeito Portimão-Tunes (visto de Portimão).

Valor da resistência de defeito [ $\Omega$ ]	Valor da resistência de defeito obtido através do 1º algoritmo [ $\Omega$ ]	Erro absoluto [ $\Omega$ ]	Erro relativo [%]
0	0	0	-
10	12,6	2,6	26,0
20	25,2	5,2	26,2
30	37,9	7,9	26,4
40	50,6	10,6	26,6
50	63,4	13,4	26,7

Tabela 3.24 - Valores de resistência de defeito e erros, absoluto e relativo, do algoritmo que utiliza informações de uma extremidade da linha, para o defeito Portimão-Tunes (visto de Tunes).

Valor da resistência de defeito [ $\Omega$ ]	Valor da resistência de defeito obtido através do 1º algoritmo [ $\Omega$ ]	Erro absoluto [ $\Omega$ ]	Erro relativo [%]
0	0,1	0,1	-
10	9,4	0,6	6,3
20	18,6	1,4	7,0
30	27,9	2,1	7,1
40	37,2	2,8	7,1
50	46,5	3,5	7,0

Através da análise das tabelas 3.23 e 3.24 é possível observar erros relativos aproximadamente constantes para o defeito visto de Portimão e visto de Tunes. Ainda assim verifica-se que, apesar de não demasiado elevados, os erros relativos vistos de Portimão são mais elevados que os vistos de Tunes, que são reduzidos para qualquer um dos 6 casos avaliados. Verifica-se também que, à medida que aumentam os valores de resistência de defeito, aumenta o erro absoluto em ambas as tabelas.

Tabela 3.25 - Valores de resistência de defeito e erros, absoluto e relativo, do algoritmo que utiliza informações das duas extremidade sda linha, para o defeito Portimão-Tunes.

Valor da resistência de defeito [ $\Omega$ ]	Valor da resistência de defeito obtido através do 2º algoritmo [ $\Omega$ ]	Erro absoluto [ $\Omega$ ]	Erro relativo [%]
0	1,2	1,2	-
10	11,4	1,4	13,6
20	21,4	1,4	6,9
30	31,4	1,4	4,8
40	41,5	1,5	3,7
50	51,6	1,6	3,1

A tabela 3.25 permite observar erros absolutos e relativos relativamente baixos e melhores para o algoritmo que utiliza medições de ambas as extremidades da linha em comparação com o algoritmo que utiliza medições de apenas uma extremidade da linha, verificando-se erros relativos entre os 3 e os 14%. Verifica-se ainda que, à medida que aumentam os valores de resistência de defeito, aumenta ligeiramente o erro absoluto, sendo praticamente constante. O valor quase constante do erro absoluto deverá estar associado ao facto da linha não ser homogénea em todo o seu comprimento, e de não se considerar a capacidade da linha nem o acoplamento entre circuitos em linhas duplas (nos troços duplos). Por outro lado diminui o erro relativo, tal como acontecia para o defeito anterior.

Verifica-se ainda que os resultados obtidos para ambos os algoritmos são bastante melhores para o segundo defeito.

Tendo em conta a análise feita aos erros associados a cada algoritmo, conclui-se que o algoritmo que utiliza medições de ambas as extremidades da linha é o mais adequado para o cálculo da resistência de defeito em defeitos fase-terra.



## **4 Determinação de resistências de defeito na RNT**

Uma vez determinado qual o algoritmo a utilizar, procede-se à sua aplicação a casos reais, nomeadamente a defeitos ocorridos na rede de transporte correspondente à RNT. Assim, é calculado o valor da resistência associado a cada um dos defeitos observados.

### **4.1 Caracterização dos defeitos**

Para a aplicação do algoritmo escolhido em 3.1 a casos reais, foram utilizados 200 registos correspondentes a 100 defeitos ocorridos na rede de transporte em estudo, correspondente à RNT. Os registos foram obtidos ao longo de 3 anos: 2013, 2014 e 2015. Para cada defeito obtêm-se 2 registos, vistos de diferentes extremidades da linha. O valor da resistência de defeito obtido será igual para os dois registos, uma vez que ambos se referem ao mesmo defeito. Por isso, de forma a evitar repetição dos resultados, estes são apresentados por defeito e não por registo. Desta forma, para cada defeito é obtida a informação acerca da linha de transmissão onde ocorreu o defeito, num total de 44 linhas diferentes, do correspondente nível de tensão da linha: 150, 220 ou 400 kV e ainda das subestações ligadas a essa linha, num total de 44 subestações.

### **4.2 Resultados**

A tabela 4.1 apresenta os valores de resistência de defeito obtidos a partir do algoritmo que utiliza medições em ambas as extremidades da linha, tendo em conta a linha de transmissão onde se verificou o defeito, as correspondentes subestações em cada extremidade da linha, e o nível de tensão em questão.

As linhas de transmissão são representadas pela letra L, seguida de um número identificador da linha, da mesma forma que as subestações são representadas pela letra S, seguida de um número identificador da subestação.

Tabela 4.1 - Valores de resistência de defeito obtidos a partir da aplicação do algoritmo que utiliza informação das duas extremidades da linha (incidente 1 a 53).

Defeito	Nível de tensão [kV]	Linha de transmissão	Subestações		Resistência de defeito [ $\Omega$ ]
1	400	L1	S1	S2	3,48
2	400	L1	S1	S2	2,72
3	400	L2	S3	S4	3,95
4	400	L3	S5	S6	3,24
5	150	L4	S7	S8	1,97
6	400	L5	S9	S10	3,12
7	220	L6	S11	S12	2,24
8	400	L7	S13	S1	1,3
9	400	L7	S13	S1	1,49
10	400	L1	S1	S2	3,52
11	150	L8	S14	S15	0,98
12	400	L2	S3	S4	3
13	400	L2	S3	S4	3,95
14	400	L2	S3	S4	2,31
15	150	L9	S16	S17	2,91
16	150	L10	S17	S18	4,19
17	400	L11	S17	S7	3,13
18	400	L12	S13	S19	2,84
19	400	L12	S19	S13	4,11
20	400	L12	S13	S19	1,12
21	400	L12	S19	S13	3,9
22	400	L12	S13	S19	2,6
23	150	L13	S19	S20	1,47
24	220	L14	S21	S5	2,38
25	220	L15	S11	S22	6,1
26	220	L15	S22	S11	2,24
27	400	L16	S23	S24	4,51
28	400	L16	S24	S23	3,4
29	400	L17	S25	S7	10,3
30	150	L18	S26	S7	3,15
31	150	L4	S7	S8	3,13
32	150	L19	S27	S7	2,92
33	150	L18	S26	S7	3,1
34	400	L20	S4	S7	4,11
35	400	L20	S7	S4	2,67
36	400	L20	S4	S7	3,32
37	400	L20	S4	S7	3,76
38	400	L20	S4	S7	1,47
39	220	L21	S28	S29	2,47
40	220	L22	S30	S29	1,99
41	150	L23	S4	S8	0,91
42	150	L23	S4	S8	2,9
43	150	L24	S25	S31	2,66
44	150	L24	S25	S31	2,46
45	400	L25	S32	S2	1,33
46	220	L26	S30	S28	2,43
47	400	L5	S9	S10	8,23
48	400	L5	S9	S10	3,12
49	400	L27	S33	S32	0,77
50	400	L11	S7	S1	1,49
51	400	L1	S1	S2	3,76
52	400	L28	S32	S34	2,66
53	400	L7	S13	S1	1,84

Tabela 4.1 (continuação) - Valores de resistência de defeito obtidos a partir da aplicação do algoritmo que utiliza informação das duas extremidades da linha (incidente 54 a100).

Defeito	Nível de tensão [kV]	Linha de transmissão	Subestações		Resistência de defeito [ $\Omega$ ]
			S	S	
54	400	L29	S5	S35	3,5
55	150	L19	L27	L7	1,79
56	150	L30	S8	S31	2,33
57	150	L31	S26	S17	4,36
58	400	L1	S1	S2	2,77
59	400	L7	S13	S1	2,02
60	400	L1	S1	S1	4,17
61	150	L23	S8	S4	4,17
62	400	L1	S1	S2	3,39
63	150	L32	S36	S31	1,39
64	400	L12	S19	S13	3,58
65	400	L28	S32	S34	22,1
66	400	L11	S17	S7	2,54
67	150	L33	S25	S31	1,48
68	150	L34	S37	S15	1,14
69	400	L12	S13	S19	2,91
70	400	L36	S33	S10	4,08
71	400	L29	S5	S35	3,96
72	220	L37	S40	S41	3,4
73	400	L7	S13	S1	2,88
74	150	L24	S25	S31	0,59
75	400	L28	S32	S34	2,66
76	400	L7	S13	S1	1,84
77	150	L9	S16	S17	1,24
78	400	L7	S13	S1	26,13
79	400	L1	S1	S2	2,32
80	150	L38	S42	S24	1,78
81	150	L18	S26	S7	2,76
82	150	L18	S7	S26	4,13
83	400	L7	S13	S1	2,33
84	400	L7	S13	S1	1,88
85	400	L7	S13	S1	1,37
86	400	L7	S1	S13	1,27
87	400	L7	S13	S1	2,73
88	400	L7	S13	S1	2,35
89	400	L7	S1	S13	1,69
90	400	L28	S32	S34	5,03
91	220	L39	S43	S44	0,01
92	400	L40	S44	S17	3,25
93	400	L40	S17	S44	2,74
94	400	L5	S9	S10	2,8
95	400	L41	S32	S10	37,51
96	150	L34	S37	S15	1,64
97	150	L42	S42	S37	1,38
98	150	L43	S25	S7	1,04
99	150	L44	S25	S31	0,1
100	400	L29	S5	S35	5,76

### 4.3 Análise dos resultados

De acordo com os valores de resistência de defeito obtidos em 4.2, é feita uma análise aos valores por nível de tensão, que corresponde à percentagem de casos verificados para diferentes intervalos de valores de resistência. É feita também uma comparação com os valores publicados na literatura e apresentados em 2.2.

Assim, é apresentado, por nível de tensão, um histograma onde se compara a percentagem de casos observados em 4.2, para diferentes intervalos de valores de resistência, com a percentagem de casos observados, para os mesmos intervalos de valores de resistência, provenientes de estudos anteriores. É ainda apresentada uma tabela as respectivas percentagens.

A figura 4.1 apresenta, para o nível de tensão de 400 kV, um histograma com os resultados obtidos nesta dissertação e os resultados obtidos em [9]. A tabela 4.2 apresenta as percentagens correspondentes.

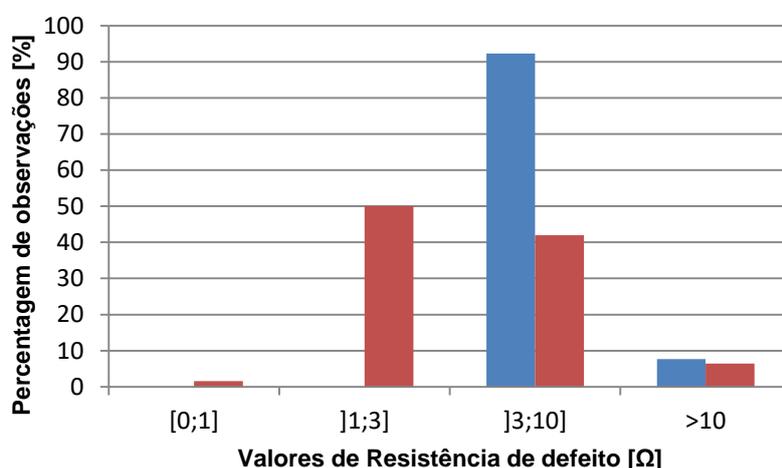


Figura 4.1 - Histograma comparativo dos valores de resistência de defeito obtidos nesta dissertação (a vermelho) – 400 kV e os publicados em [9] (a azul) – 400 kV.

Tabela 4.2 - Percentagem de observações para cada intervalo definido na figura 4.1.

Intervalo [ $\Omega$ ]	Percentagem de observações de acordo com esta dissertação [%]	Percentagem de observações de acordo com [9] [%]
[0;1]	1,6	0
]1;3]	50	0
]3;10]	41,9	92,3
>10	6,5	7,7

Verifica-se que os resultados obtidos apresentam algumas diferenças pois, enquanto que em [9] não se obtiveram valores de resistência inferiores a  $3\Omega$ , nesta dissertação cerca de 52% dos

casos observados foram para valores neste intervalo. No entanto, é de salientar a grande diferença na dimensão da população em estudo para as duas fontes de resultados, uma vez que, enquanto que nesta dissertação foram obtidos valores de resistência para 62 defeitos, em [9] apenas se analisaram 13 defeitos. Para valores de resistência de defeito superiores a  $10 \Omega$  os resultados são semelhantes.

A figura 4.2 apresenta um histograma com os resultados obtidos nesta dissertação, para o nível de tensão de 220 kV, os resultados obtidos em [9], para 230 kV e os resultados obtidos em [8], para 240 kV. Apesar dos níveis de tensão serem ligeiramente diferentes são comparáveis. A tabela 4.3 apresenta as percentagens correspondentes.

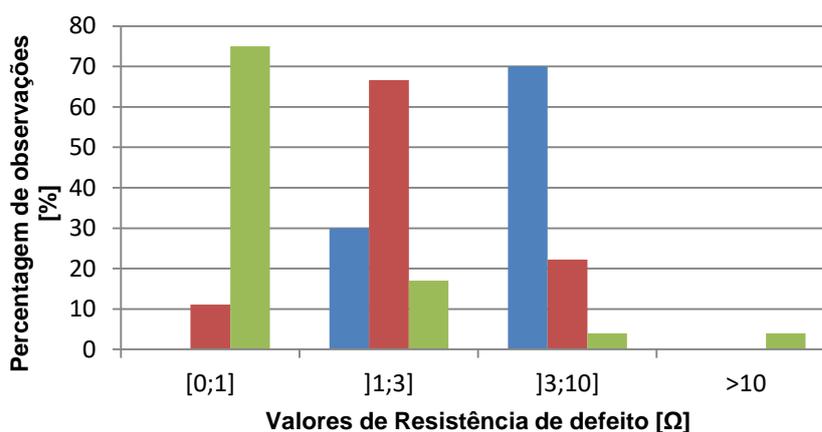


Figura 4.2 - Histograma comparativo dos valores de resistência de defeito obtidos nesta dissertação (vermelho) – 220kV, os publicados em [9] (azul) – 230 kV e os publicados em [8] (verde) – 240 kV

Tabela 4.3 - Percentagem de observações para cada intervalo definido na figura 4.2.

Intervalo [ $\Omega$ ]	Percentagem de observações de acordo com esta dissertação [%]	Percentagem de observações de acordo com [9] [%]	Percentagem de observações de acordo com [8] [%]
[0;1]	11,1	0	75
[1;3]	66,7	30	17
[3;10]	22,2	70	4
>10	0	0	4

Verificam-se diferenças nos resultados obtidos, principalmente nas percentagens máximas. Para esta dissertação, a percentagem máxima de casos observados, cerca de 67%, verificou-se para valores de resistência entre 1 e  $3 \Omega$ . Para [9] a percentagem máxima, 70%, verificou-se para valores entre os 3 e os  $10 \Omega$  e para [8], a percentagem máxima, 75%, verificou-se para valores entre 0 e  $1 \Omega$ . Só para valores superiores a  $10 \Omega$  se verificam semelhanças entre os resultados obtidos. A dimensão da população é semelhante para esta dissertação e para [9] (9 defeitos para esta dissertação e 13 defeitos para [9]), com um ligeiro aumento para [8] (24 defeitos).

A figura 4.3 apresenta um histograma com os resultados obtidos nesta dissertação, para o nível de tensão de 150 kV, e os resultados obtidos em [8], para 138 kV. Apesar dos níveis de tensão serem ligeiramente diferentes são comparáveis. A tabela 4.4 apresenta as percentagens correspondentes.

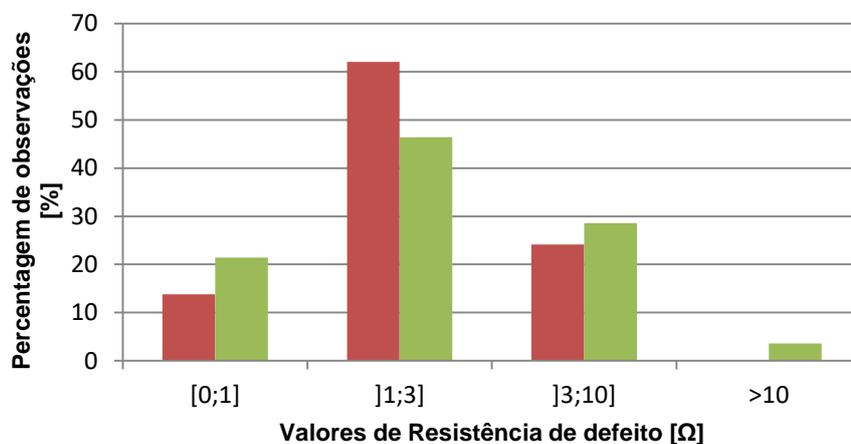


Figura 4.3 - Histograma comparativo dos valores de resistência de defeito obtidos nesta dissertação (a vermelho) – 150 kV e os publicados em [8] (a verde) – 138 kV.

Tabela 4.4 – Percentagem de observações para cada intervalo definido na figura 4.3

Intervalo [Ω]	Percentagem de observações de acordo com esta dissertação [%]	Percentagem de observações de acordo com [8] [%]
[0;1]	13,8	21,4
]1;3]	62,1	46,4
]3;10]	24,1	28,6
>10	0	3,6

Para este nível de tensão os resultados apresentados são relativamente semelhantes, na medida em que as percentagens obtidas por ordem crescente ocorrem para os mesmos intervalos de valores de resistência. Assim, as percentagens máximas para as duas fontes de resultados ocorrem para o intervalo entre 1 e 3 Ω, de seguida para o intervalo de 3 a 10 Ω e por fim para valores inferiores a 1 Ω. Para [8] verificam-se ainda 3,6% dos casos para valores superiores a 10 Ω, não se verificando qualquer caso nesta dissertação. A diferença de percentagens obtidas entre as duas fontes de resultados também é relativamente idêntica para todos os intervalos, com um ligeiro aumento para o segundo intervalo. A dimensão das populações é idêntica, com apenas 1 caso de diferença (29 defeitos para esta dissertação e 28 defeitos para [8]).

## 5 Análise probabilística da resistência de defeito

Neste capítulo, os valores de resistência de defeito obtidos no capítulo 4 são analisados estatisticamente, e são propostos modelos probabilísticos que os descrevam. Posteriormente é escolhido o modelo probabilístico que mais se adequa aos valores de resistência de defeito e comparado com modelos publicados na literatura.

### 5.1 Distribuições probabilísticas adoptadas

A escolha das distribuições probabilísticas que possam descrever o comportamento dos valores de resistência de defeito, obtidos no capítulo 4, baseia-se numa análise estatística dos valores obtidos. São apresentados histogramas da distribuição dos dados, e por análise dos mesmos são adoptadas distribuições probabilísticas, sendo posteriormente caracterizadas.

#### 5.1.1 Histogramas dos valores observados

A análise dos valores de resistência de defeito obtidos no capítulo anterior é iniciada com a apresentação dos valores máximo, mínimo, médio e mediana, para todos os níveis de tensão em conjunto e separadamente, de acordo com a tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Valores máximo, mínimo, média e mediana da resistência de defeito [ $\Omega$ ].

Nível de tensão [kV]	Número de observações	Valor máximo [ $\Omega$ ]	Valor mínimo [ $\Omega$ ]	Valor médio [ $\Omega$ ]	Mediana [ $\Omega$ ]
Todos	100	37,51	0,01	3,5357	2,73
400	62	37,51	0,77	4,3253	2,96
220	9	6,10	0,01	2,5844	2,38
150	29	4,36	0,10	2,1431	1,97

Através da análise da tabela 5.1 verifica-se uma diferença considerável na dimensão das amostras para os diferentes níveis de tensão. Para o nível de tensão de 400 kV existe um número elevado de observações, comparativamente com os níveis de tensão de 220 kV e 150 kV que apresentam um baixo número de observações.

Para além disso verifica-se uma certa dependência entre o nível de tensão e o valor médio e a mediana, uma vez que à medida que aumenta o nível de tensão aumentam também o valor médio e a mediana.

Dado ser pretendido estudar a resistência de defeito de um ponto de vista probabilístico, são apresentados, nas figuras 5.1 a 5.4, histogramas com a distribuição desses valores de resistência de defeito, para os diversos níveis de tensão (400 kV, 220 kV e 150 kV) em conjunto, e separadamente. Todos os valores são inseridos em intervalos de igual dimensão. Os valores foram obtidos para defeitos ocorridos entre os anos de 2013 e 2015 para curto-circuitos fase-terra. O círculo a vermelho representa o valor médio dos dados de acordo com a tabela 5.1. Nestes histogramas, cada barra representa a densidade de observações definida por:

$$\text{densidade} = \frac{\text{número de observações}}{\text{número total de observações} \times \text{largura da classe}} \quad (5.1)$$

Nas tabelas 5.2 a 5.5 são apresentadas as densidades de observações verificadas para cada intervalo definido nas figuras 5.1 a 5.4, respectivamente.

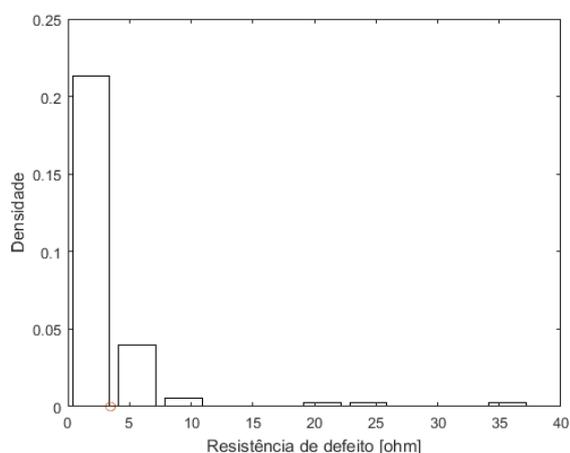


Figura 5.1 - Histograma da distribuição dos valores de resistência de defeito para todos os níveis de tensão em conjunto (400 kV, 220 kV, 150 kV), baseado em 100 observações. Representação do valor médio dos dados (círculo a vermelho).

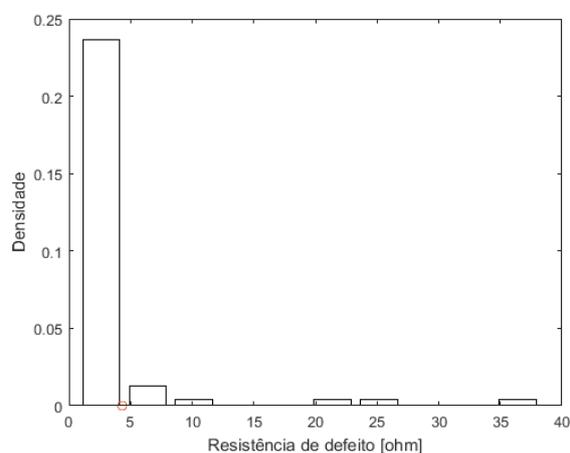


Figura 5.2 - Histograma da distribuição dos valores de resistência de defeito para 400 kV baseado em 62 observações. Representação do valor médio dos dados (círculo a vermelho).

Tabela 5.2 - Densidade de observações para cada intervalo definido na figura 5.1 para todos os níveis de tensão em conjunto (400 kV, 220 kV, 150 kV).

Intervalo [ $\Omega$ ]	Número de observações
[0,01;3,761[	80
[3,761;7,512[	15
[7,512;11,263[	2
[11,263;15,014[	0
[15,014;18,765[	0
[18,765;22,516[	1
[22,516;26,267[	1
[26,267;31,018[	0
[30,018;33,769[	0
[33,769;37,52[	1

Tabela 5.3 - Densidade de observações para cada intervalo definido na figura 5.2, para o nível de tensão de 400 kV.

Intervalo [ $\Omega$ ]	Número de observações
[0,770;4,521[	55
[4,521;8,272[	3
[8,272;12,023[	1
[12,023;15,774[	0
[15,774;19,525[	0
[19,525;23,276[	1
[23,276;27,027[	1
[27,027;30,778[	0
[30,778;34,529[	0
[34,529;38,28[	1

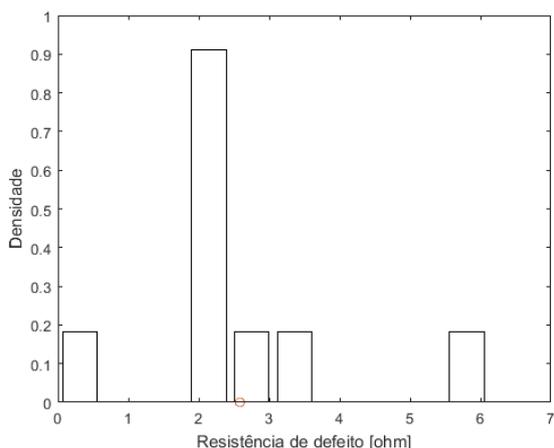


Figura 5.3 - Histograma da distribuição dos valores de resistência de defeito para 220 kV baseado em 9 observações. Representação do valor médio dos dados (círculo a vermelho).

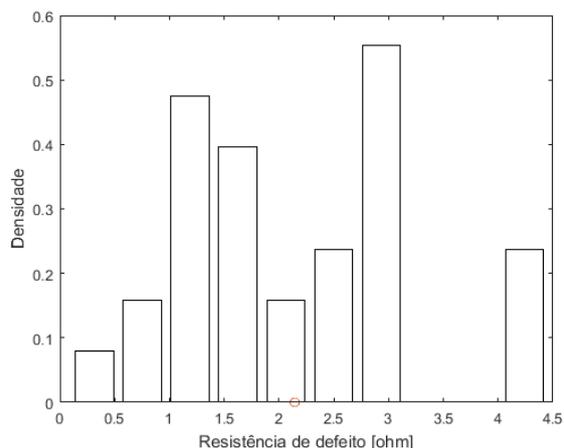


Figura 5.4 - Histograma da distribuição dos valores de resistência de defeito, para 150 kV baseado em 29 observações. Representação do valor médio dos dados (círculo a vermelho).

Tabela 5.4 - Densidade de observações para cada intervalo definido na figura 5.3, para o nível de tensão de 220 kV.

Intervalo [ $\Omega$ ]	Número de observações
[0,01;0,62[	1
[0,62;1,23[	0
[1,23;1,84[	0
[1,84;2,45[	5
[2,45;3,06[	1
[3,06;3,67[	1
[3,67;4,28[	0
[4,28;4,89[	0
[4,89;5,5[	0
[5,5;6,11[	1

Tabela 5.5 - Densidade de observações para cada intervalo definido na figura 5.4, para o nível de tensão de 150 kV.

Intervalo [ $\Omega$ ]	Número de observações
[0,1;0,536[	1
[0,536;0,972[	2
[0,972;1,408[	6
[1,408;1,844[	5
[1,844;2,28[	2
[2,28;2,716[	3
[2,716;3,152[	7
[3,152;3,588[	0
[3,588;4,024[	0
[4,024;4,46[	3

Através da análise dos histogramas é possível verificar, para o nível de tensão de 400 kV e para o conjunto de todos os níveis de tensão, uma grande densidade de observações correspondentes a valores de resistência inferiores a  $10 \Omega$ . À medida que os valores de resistência de defeito vão aumentando observa-se um acentuado decréscimo, a tender para zero.

Para o nível de tensão de 220 kV é de salientar a dimensão da população em estudo, que por ser bastante reduzida não permite concluir acerca da correcta, ou não, adequação da uma possível

distribuição teórica à distribuição dos dados. Desta forma, este nível de tensão não será estudado separadamente, tendo apenas contribuído para o estudo do conjunto de todos os níveis de tensão.

Para o nível de tensão de 150 kV, esta característica não é evidente. No entanto é de notar a curta gama de valores de resistência de defeito para este nível de tensão, em comparação com a gama de valores para os níveis de tensão referidos anteriormente, que é bastante mais abrangente.

De entre as distribuições probabilísticas que apresentam a característica identificada inicialmente, foram identificadas como potencialmente mais adequadas a distribuição de Weibull e a distribuição normal em escala logarítmica. Assim, são igualmente apresentadas, em escala logarítmica, a tabela 5.6 com os valores máximo, mínimo, médio e a mediana e ainda os histogramas dos valores observados (figuras 5.5 a 5.7). O nível de tensão de 220 kV é apenas considerado no estudo de todos os níveis de tensão em conjunto.

Tabela 5.6 - Valores máximo, mínimo, média e mediana do logaritmo da resistência de defeito [ $\Omega$ ].

Nível de tensão [kV]	Número de observações	Valor máximo [ $\Omega$ ]	Valor mínimo [ $\Omega$ ]	Valor médio [ $\Omega$ ]	Mediana [ $\Omega$ ]
Todos	100	1,5741	-2,0000	0,3925	0,4354
400	62	1,5714	-0,1135	0,4924	0,4705
150	29	0,6395	-1,0000	0,2501	0,2945

Através da análise da tabela 5.6 observa-se que, após uma transformação dos valores de escala linear para escala logarítmica, tanto a mediana como o valor médio aumentam com o aumento do nível de tensão, tal como acontecia com os valores representados em escala linear.

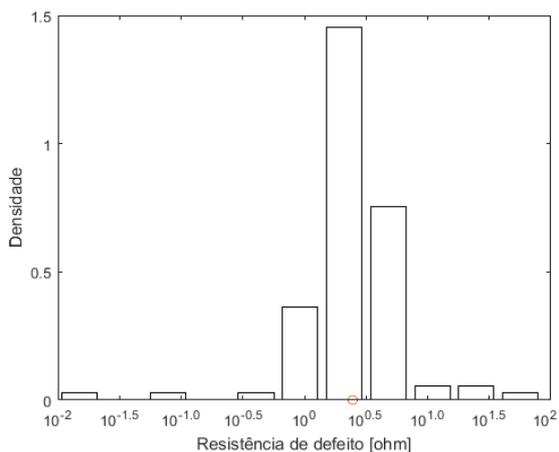


Figura 5.5 - Histograma da distribuição dos valores de resistência de defeito, em escala logarítmica, para todos os níveis de tensão em conjunto (400 kV, 220 kV, 150 kV), baseado em 100 observações. Representação do valor médio dos dados (círculo a vermelho).

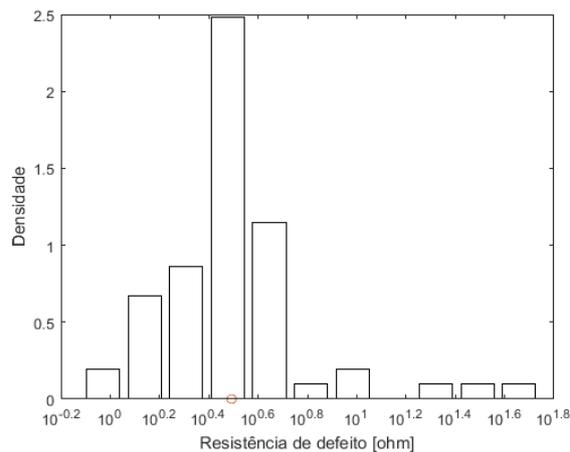


Figura 5.6 - Histograma da distribuição dos valores de resistência de defeito, em escala logarítmica, para 400 kV, baseado em 62 observações. Representação do valor médio dos dados (círculo a vermelho).

Tabela 5.7 - Densidade de observações para cada intervalo definido na figura 5.5, para todos os níveis de tensão em conjunto (400 kV, 220 kV, 150 kV).

Intervalo [ $\Omega$ ]	Número de observações
$[10^{-2}; 10^{-1,6426}[$	1
$[10^{-1,6426}; 10^{-1,2852}[$	0
$[10^{-1,2852}; 10^{-0,9278}[$	1
$[10^{-0,9278}; 10^{-0,5703}[$	0
$[10^{-0,5703}; 10^{-0,2129}[$	1
$[10^{-0,2129}; 10^{0,1445}[$	13
$[10^{0,1445}; 10^{0,5019}[$	52
$[10^{0,5019}; 10^{0,8593}[$	27
$[10^{0,8593}; 10^{1,2167}[$	2
$[10^{1,2167}; 10^{1,5741}[$	2
$[10^{1,5741}; 10^{1,9316}[$	1

Tabela 5.8 - Densidade de observações para cada intervalo definido na figura 5.6, para o nível de tensão de 400kV.

Intervalo [ $\Omega$ ]	Número de observações
$[10^{-0,1135}; 10^{0,0553}[$	2
$[10^{0,0553}; 10^{0,2240}[$	7
$[10^{0,2240}; 10^{0,3928}[$	9
$[10^{0,3928}; 10^{0,5616}[$	26
$[10^{0,5616}; 10^{0,7303}[$	12
$[10^{0,7303}; 10^{0,8991}[$	1
$[10^{0,8991}; 10^{1,0679}[$	2
$[10^{1,0679}; 10^{1,2366}[$	0
$[10^{1,2366}; 10^{1,4054}[$	1
$[10^{1,4054}; 10^{1,5741}[$	1
$[10^{1,5741}; 10^{1,7429}[$	1

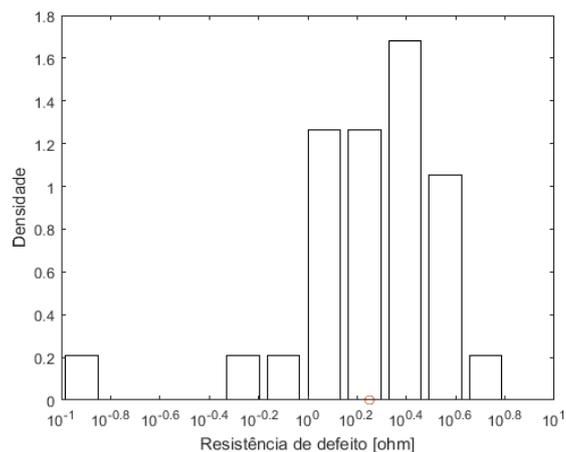


Figura 5.7 - Histograma da distribuição dos valores de resistência de defeito, em escala logarítmica, para 150 kV baseado em 29 observações.

Tabela 5.9 - Densidade de observações para cada intervalo definido na figura 5.6, para o nível de tensão de 150 kV.

Intervalo [ $\Omega$ ]	Número de observações
$[10^{-1}; 10^{-0,8361}[$	1
$[10^{-0,8361}; 10^{-0,6721}[$	0
$[10^{-0,6721}; 10^{-0,5082}[$	0
$[10^{-0,5082}; 10^{-0,3442}[$	0
$[10^{-0,3442}; 10^{-0,1803}[$	1
$[10^{-0,1803}; 10^{-0,0163}[$	1
$[10^{-0,0163}; 10^{0,1476}[$	6
$[10^{0,1476}; 10^{0,3116}[$	6
$[10^{0,3116}; 10^{0,4755}[$	8
$[10^{0,4755}; 10^{0,6395}[$	5
$[10^{0,6395}; 10^{0,8034}[$	1

Verifica-se, para qualquer um destes histogramas, que a transformação da escala linear em logarítmica evidencia características não visíveis na escala linear, nomeadamente alguma simetria em torno do valor médio. Este comportamento é expectável para uma distribuição normal.

A escolha da distribuição de Weibull e da distribuição normal em escala logarítmica fundamenta-se em bibliografia relevante, identificada em 5.1.2 e 5.1.3.

### 5.1.2 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é adoptada para descrever a resistência de defeito de acordo com trabalhos anteriores desenvolvidos por vários autores, André Santos em conjunto com M.T. Correia de Barros, e Barnard em conjunto com Pahwa, [12] e [13], respectivamente. Através de valores de resistência de defeito obtidos por medições, observou-se que a densidade de valores era maior para menores valores de resistência de defeito, com decréscimo, a tender para zero, à medida que os valores de resistência de defeito aumentavam. Foi concluído que a função de densidade de probabilidade de Weibull seria a que melhor se ajustava à distribuição dos valores de resistência de defeito obtidos.

A distribuição de Weibull é caracterizada por uma função de densidade de probabilidade dada por:

$$f(R_F) = \frac{\beta}{\delta} \left(\frac{R_F}{\delta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{R_F}{\delta}\right)^\beta\right] \quad (5.2)$$

e por uma função de distribuição cumulativa dada por:

$$F(R_F) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{R_F}{\delta}\right)^\beta\right] \quad (5.3)$$

onde  $R_F$  representa a resistência de defeito e  $\beta > 0$  e  $\delta > 0$  representam os parâmetros que caracterizam esta distribuição, respectivamente o parâmetro de forma e o parâmetro de escala.

É de salientar que a função de distribuição da distribuição de Weibull não apresenta simetria e que só pode ser aplicada para valores de  $R_F > 0$ .

### 5.1.3 Distribuição normal em escala logarítmica

A adequação da distribuição normal em escala logarítmica é fundamentada num estudo proposto por Wagner e Even [17], e trabalhado posteriormente por M.T. Correia de Barros e André Santos [18]. Através deste estudo concluiu-se que a resistividade do solo, de natureza incerta e dependente de vários factores, característicos das propriedades do solo [19], pode ser descrita por uma função de distribuição normal em escala logarítmica, demonstrada na figura 5.8.

Considerando que o solo tem comportamento linear, a resistividade do solo está directamente relacionada, em escala logarítmica, com a resistência de terra dos apoios para uma determinada geometria dos eléctrodos. Sendo a resistividade do solo passível de ser descrita estatisticamente por uma função normal em escala logarítmica, então também deverá ser a resistência de terra dos apoios.

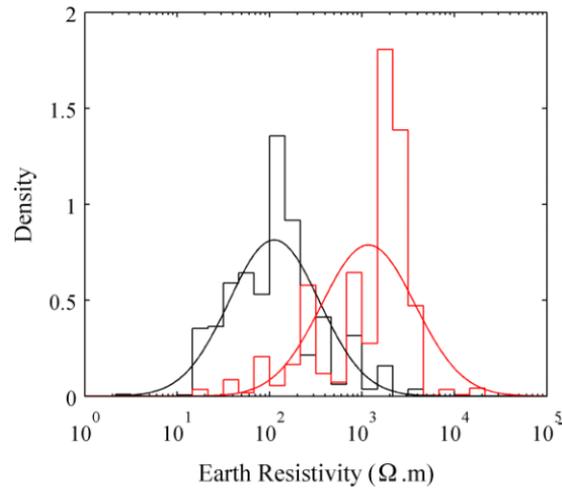


Figura 5.8 - Ajuste da função de distribuição normal à distribuição dos valores de resistividade do solo medidos a 4m do solo na região Norte (a vermelho) e na região Sul (a preto) de Portugal. (extraída de [18]).

Sendo a resistência de terra dos apoios um factor com bastante peso na resistência de defeito, então assume-se que também a resistência de defeito pode ser modelada por uma função de distribuição normal em escala logarítmica.

A distribuição normal é caracterizada por uma função de densidade de probabilidade dada por:

$$f(\log_{10}(R_f)) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(\log_{10}(R_f) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5.4)$$

E por uma função de distribuição cumulativa é dada por:

$$F(\log_{10}(R_f)) = \Phi\left(\frac{\log_{10}(R_f) - \mu}{\sigma}\right) \quad (5.5)$$

onde  $R_f$  representa a resistência de defeito e  $\mu$  e  $\sigma$  representam os parâmetros que caracterizam esta distribuição, respectivamente o parâmetro de localização, que corresponde ao valor médio e o parâmetro de escala que corresponde ao desvio padrão.

$\Phi(\log_{10}(R_f))$  corresponde à distribuição normal padrão, isto é, à distribuição normal com média igual a 0 ( $\mu = 0$ ) e variância igual a 1 ( $\sigma^2 = 1$ ).

A função de densidade da distribuição normal apresenta simetria em torno de  $\mu$ , tendo a forma de sino e não apresenta qualquer restrição relativamente aos valores de  $\log_{10}(R_f)$ .

## 5.2 Análise da adequação das distribuições adoptadas

### 5.2.1 Procedimento adoptado – Análise exploratória de dados

O estudo dos valores da resistência de defeito e conseqüente proposta de um modelo probabilístico, que descreva o comportamento dos mesmos, é baseado numa análise exploratória dos dados, EDA (*Exploratory Data Analysis*). [20]. A EDA refere-se a um conjunto de técnicas, originalmente desenvolvida por John Tukey, onde se expõem os valores de um conjunto de dados de forma a que certas características interessantes no comportamento destes se tornem evidentes. É uma abordagem de análise que se concentra na identificação de padrões gerais nos dados e na identificação de valores atípicos que apresentam desvios em relação aos restantes. Contrariamente aos métodos clássicos que usualmente começam por assumir um modelo para os dados, o EDA, através da análise dos dados, sugere modelos que possam ser apropriados.

A grande parte das técnicas de análise exploratória dos dados é de natureza gráfica, com apenas algumas técnicas quantitativas. Desta forma possibilita-se um estudo mais qualitativo, que vai de encontro aos objectivos principais do EDA. Nesta dissertação são utilizadas técnicas gráficas, iniciadas com a apresentação dos histogramas em 5.1, onde através da análise dos dados e identificação de padrões nos mesmos se sugeriram dois modelos probabilísticos possivelmente apropriados. São ainda apresentadas outras técnicas gráficas que a complementam e que são características da análise exploratória dos dados.

É de salientar que, uma vez que a distribuição de Weibull utiliza valores de resistência de defeito lineares e a distribuição normal utiliza valores de resistência de defeito em escala logarítmica, é feita uma distinção, e por isso os dois casos são tratados separadamente.

O gráfico quantil-quantil teórico é uma ferramenta gráfica que permite avaliar se um determinado conjunto de dados segue uma distribuição teórica, uma vez que fornece uma correspondência entre os quantis empíricos, provenientes do conjunto de dados e os respectivos quantis da distribuição teórica assumida. Assim, o gráfico quantil-quantil teórico não é mais do que uma representação gráfica dos quantis dos dados versus os respectivos quantis da distribuição teórica assumida.

Para a construção do gráfico [21] assume-se  $y_i$ , para  $i = 1 \dots n$ , o conjunto dos valores de resistência de defeito, com  $n$  sendo o número de valores de resistência de defeito obtidos para o nível de tensão em questão.  $y_{(i)}$  representa o conjunto dos mesmos valores mas ordenados por ordem crescente para  $i = 1 \dots n$ . Sendo  $p$  qualquer fracção entre 0 e 1 define-se o quantil empírico  $Q_e(p)$  correspondente a  $p$  como sendo  $y_{(i)}$  sempre que  $p$  seja uma das  $p_i = (i - .5) / n$ , para  $i = 1 \dots n$ . Assim, os quantis empíricos  $Q_e(p_i)$  do conjunto de dados são apenas os valores dos dados ordenados,  $y_{(i)}$ .

Assume-se também  $F(y)$  como sendo a função de distribuição cumulativa da distribuição em questão. O quantil teórico  $p$  de  $F$ ,  $Q_t(p)$ , satisfaz

$$F(Q_t(p)) = p \leftrightarrow Q_t(p) = F^{-1}(p) \quad (5.6)$$

Assim no gráfico quantil-quantil teórico, os quantis empíricos,  $Q_e(p_i)$  são traçados versus os quantis teóricos,  $Q_t(p_i)$  para  $i = 1 \dots n$ , onde  $p_i = (i - .5) / n$ .

Tendo em conta a distribuição teórica em questão, os eixos do gráfico quantil-quantil teórico sofrem pequenas alterações.

Segundo Chambers [21], para uma distribuição normal, os quantis empíricos, representados no eixo das ordenadas, são dados por  $y_{(i)}$ . Os quantis teóricos, representados no eixo das abcissas, correspondentes ao inverso da função de distribuição cumulativa, são dados por  $\Phi^{-1}(p_i)$ , onde  $\Phi$  representa a função de distribuição padrão da distribuição normal, para  $p_i = (i - .5) / n$ .

De outro modo, para uma distribuição de Weibull, os quantis empíricos, representados no eixo das ordenadas, são dados pelo logaritmo natural dos dados,  $\log_e(y_{(i)})$ . Os quantis teóricos, representados no eixo das abcissas, correspondentes ao inverso da função de distribuição cumulativa, são dados por  $\log_e\{-\log_e(1 - p_i)\}$ , para  $p_i = (i - .5) / n$ .

O gráfico quantil-quantil teórico é uma ferramenta apenas de carácter visual, o que a torna, de certo modo, algo subjectiva. No entanto permite avaliar se uma distribuição teórica se adequa ao conjunto de dados, uma vez que, caso se adequa, os pontos do gráfico seguem um comportamento bem definido, isto é, aproximadamente sobre uma recta.

Numa situação para a qual a distribuição teórica é uma boa aproximação da distribuição empírica, os quantis dos dados irão corresponder, aproximadamente, aos quantis teóricos e dessa forma, os pontos do gráfico estarão perto da recta  $y = x$ .

Por vezes o comportamento dos pontos do gráfico pode não corresponder exactamente à recta  $y = x$ , mas pertencer a uma recta da mesma família, com diferente declive e/ou diferente ordenada na origem.

Se a configuração observada seguir uma recta paralela à recta  $y = x$ , então, uma constante apropriada (positiva ou negativa) foi adicionada a todos os pontos correspondentes ao conjunto de dados, deslocando assim a recta. Pode então concluir-se que a distribuição empírica é compatível com a distribuição teórica, mas apresentam diferentes localizações.

De outro modo, se a configuração observada passar, tal como a recta  $y = x$ , na origem, mas não for paralela a esta, significa que foi multiplicada, a todos os pontos correspondentes ao conjunto de dados, uma constante positiva apropriada que expandiu ou comprimiu verticalmente a configuração. Pode então concluir-se que a distribuição empírica é compatível com a distribuição teórica, mas apresentam diferente escalas.

Por vezes, para além das distribuições apresentarem diferentes escalas e localizações, surgem pontos individuais, ou conjuntos de pontos, apresentados de seguida, desviados do comportamento normal dos restantes pontos. Estes podem comprometer a correspondência entre as duas distribuições, sendo por isso necessário tê-los em consideração e perceber se a sua influência é significativa ao ponto de a distribuição teórica assumida deixar de ser válida.

Assim, se existirem grandes ou sistemáticos afastamentos de pontos do gráfico quantil-quantil teórico em relação à recta que define o comportamento da maioria dos mesmos, pode assumir-se que as formas da distribuição dos dados e da distribuição teórica não correspondem, independentemente de apresentarem diferentes escalas ou localizações. Nesse caso, o gráfico quantil-quantil teórico não só fornece a informação de que a correspondência entre as distribuições é pobre, como também, tendo em conta o aspecto visual da incompatibilidade, sugere a natureza dessa incompatibilidade.

Os *outliers* são uma das possíveis causas para a existência de incompatibilidades. Um *outlier* é uma observação que apresenta uma distância anormal em relação aos restantes valores observados numa população de dados, sendo portanto inconsistente com eles.

É comum encontrar *outliers* num conjunto de dados, e quando acontece, é adequado verificar os valores novamente a partir da fonte que produziu os dados, uma vez que, por serem apenas valores esporádicos e que representam apenas uma pequena fracção dos dados, o erro pode ser proveniente de erros de medição.

O estudo dos *outliers* de um conjunto de dados inicia-se com a identificação de possíveis *outliers*, através da análise visual dos gráficos quantil-quantil teóricos. Sinaliza-se assim todos os pontos que apresentem uma distância anormal em relação à recta estimada através dos parâmetros da distribuição teórica.

A questão que surge é se esses possíveis pontos têm um afastamento realmente maior do que seria expectável. Dessa forma, e de maneira a eliminar essa subjectividade é necessária a confirmação através de métodos já existentes na literatura, nomeadamente o método de Tukey. [22]

Tukey sugere um procedimento que, utilizando informações sobre um determinado conjunto de dados, nomeadamente a mediana, a 1º e o 3º quartil, permite identificar todos os *outliers* desse conjunto de dados.

São de seguida apresentados todos os passos desse procedimento:

- 1) Calcular o IQR (*interquartile range*), que não é mais do que a diferença entre o terceiro quartil (3ºQ), correspondente ao quantil 0.75, e o primeiro quartil (1ºQ), correspondente ao quantil 0.25.
- 2) Calcular as barreiras internas (*Inner fences*), localizadas à distância de  $1.5 \times IQR$  abaixo do primeiro quartil e à distância de  $1.5 \times IQR$  acima do terceiro quartil.  $[1^\circ Q - 1.5 \times IQR, 3^\circ Q + 1.5 \times IQR]$ .
- 3) Calcular as barreiras externas (*Outer fences*), localizadas à distância de  $3 \times IQR$  abaixo do primeiro quartil e à distância de  $3 \times IQR$  acima do terceiro quartil  $[1^\circ Q - 3 \times IQR, 3^\circ Q + 3 \times IQR]$ .
- 4) Todos os valores pertencentes ao intervalo  $[1^\circ Q - 3 \times IQR, 1^\circ Q - 1.5 \times IQR] \cup [3^\circ Q + 1.5 \times IQR, 3^\circ Q + 3 \times IQR]$  são portanto os outliers do conjunto de dados.

Deste modo, o valor máximo para qualquer valor não ser *outlier* corresponde a  $1.5 \times IQR$  acima do terceiro quartil. O valor mínimo para qualquer valor não ser *outlier* corresponde a  $1.5 \times IQR$  abaixo do primeiro quartil.

Assim, depois de se identificar os *outliers*, procede-se à remoção destes, por serem pouco coerentes com os restantes valores do conjunto de dados. Assim obtém-se uma representação mais adequada do gráfico quantil-quantil teórico de forma a que a distribuição teórica se ajuste à distribuição dos dados.

Uma segunda causa, também ela comum, para a existência de irregularidades do gráfico quantil-quantil teórico (correspondentes a afastamentos em relação à recta estimada) é a existência de caudas em ambas as extremidades do gráfico. Este caso é frequentemente observado em gráficos quantil-quantil teóricos correspondentes a distribuições normais. Para esta distribuição é possível observar que a recta está ajustada aos pontos centrais e que, relativamente ao valor médio dos pontos do gráfico, os pontos nas caudas estão bastante dispersos e afastados da recta.

A adequação da distribuição teórica à distribuição dos dados é avaliada pela proximidade dos pontos do gráfico quantil-quantil teórico em relação à recta que define o comportamento da maioria dos mesmos, sendo essa recta a recta de regressão linear.

Para a definição da recta de regressão linear simples, são calculados, utilizando os pontos do gráfico quantil-quantil teórico, dois estimadores  $\hat{\beta}_0$  e  $\hat{\beta}_1$ , através do método dos mínimos quadrados [23]. Estes estimadores correspondem, respectivamente, à ordenada na origem e à inclinação, dessa mesma recta.

Os estimadores  $\hat{\beta}_0$  e  $\hat{\beta}_1$  são calculados através de:

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (5.7)$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n}} \quad (5.8)$$

onde,

$$\bar{y} = (1/n) \sum_{i=1}^n y_i \quad (5.9)$$

e

$$\bar{x} = (1/n) \sum_{i=1}^n x_i, \quad (5.10)$$

sendo  $n$  a quantidade de valores de resistência de defeito obtidos para o nível de tensão em questão,  $x_i$  os quantis teóricos da distribuição em questão e  $y_i$  os quantis empíricos da distribuição em questão.

Assim, a recta de regressão linear estimada é dada por:

$$y = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x \quad (5.11)$$

Tendo a equação da recta de regressão linear determinada, é possível obter os parâmetros da distribuição teórica em questão, a partir do seu declive e ordenada na origem, dados pelos estimadores  $\hat{\beta}_0$  e  $\hat{\beta}_1$ .

Tendo em conta a distribuição considerada, os estimadores calculados relacionam-se de diferente forma com os parâmetros da distribuição.

De acordo com Chambers, para uma distribuição normal, o declive e a ordenada na origem da recta de regressão linear estimada, correspondem exactamente aos parâmetros  $\sigma$  e  $\mu$  dessa distribuição, respectivamente [21].

Em relação à distribuição de Weibull, a relação não é exactamente directa, uma vez que o declive da recta de regressão linear corresponde ao inverso do parâmetro  $\beta$ . Por outro lado, a ordenada na origem corresponde ao logaritmo natural do parâmetro  $\delta$ . Desta forma calculam-se os parâmetros desta distribuição através de:

$$\beta = \left( \hat{\beta}_1 \right)^{-1} \quad (5.12)$$

e

$$\delta = e^{\hat{\beta}_0} \quad (5.13)$$

Conhecendo então os parâmetros da distribuição em questão, é possível caracterizar e definir a função de densidade de probabilidade. Através dela, pode posteriormente concluir-se, como complemento ao estudo do gráfico quantil-quantil teórico obtido, acerca da adequação do modelo probabilístico proposto aos valores de resistência de defeito obtidos.

### 5.2.2 Pré-análise dos dados

Para todos os níveis de tensão, em conjunto e separadamente (excepto para o nível de tensão de 220 kV), é feita uma pré-análise dos dados, que contempla uma *boxplot* dos dados, onde são representados os quartis (1º; 2º, correspondente à mediana e 3º), os valores máximo e mínimo e ainda os *outliers*, de acordo com a figura 5.9. São ainda apresentados os valores dos quartis e os valores máximo, mínimo e médio. O tratamento dos dados é feito em duas fases, numa primeira considerando os *outliers* e na segunda excluindo os *outliers*.

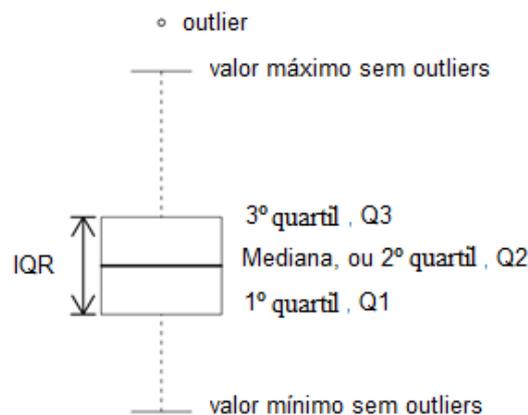


Figura 5.9 - *Boxplot* anotada.

Na figura 5.10 são apresentadas, respectivamente, para todos níveis de tensão em conjunto (com a contribuição do nível de tensão de 220 kV) e separadamente (400 kV e 150 kV), as *boxplot* dos dados e a respectiva identificação dos *outliers* (cruzes a vermelho) referentes à distribuição de Weibull, e portanto aos valores de resistência de defeito em escala linear.

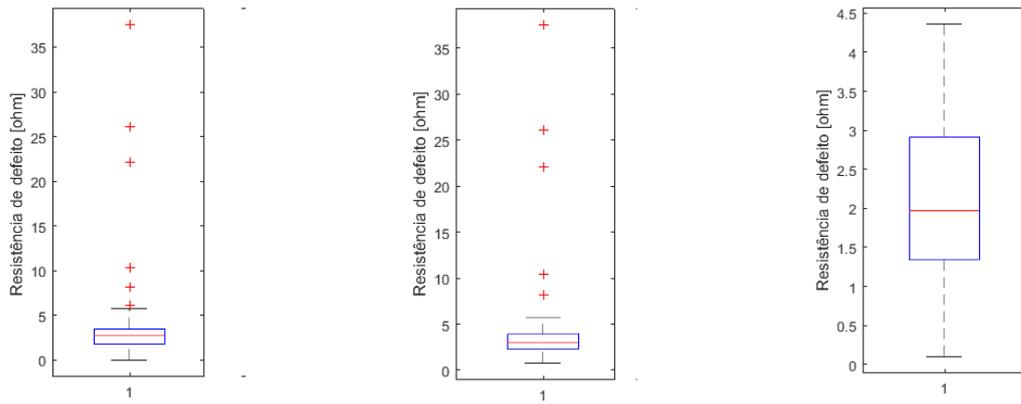


Figura 5.10 - *Boxplot* dos valores de resistência de defeito para todos os níveis de tensão em conjunto (à esquerda), para o nível de tensão de 400 kV (ao centro) e para o nível de tensão de 150 kV (à direita).

Em relação ao conjunto de todos os níveis de tensão verifica-se a existência de 6 *outliers*, todos para valores superiores ao máximo definido de acordo com o método de Tukey, ou seja para valores superiores a  $1.5 \times IQR$ . Para o nível de tensão de 400 kV verifica-se a existência de 5 *outliers*, todos eles, tal como para o conjunto de todos os níveis de tensão, superiores ao máximo definido por Tukey. Para o nível de tensão de 150 kV todos os valores do conjunto de dados estão dentro das barreiras definidas por Tukey e por isso não se verifica a presença de *outliers*.

A simetria da *boxplot* em relação à mediana está directamente relacionada com o factor de forma da distribuição de Weibull. Para que haja alguma simetria, a função de densidade de probabilidade apresenta a forma de sino, e esta característica só se começa a verificar para valores de  $\beta$  superiores a 1. Para valores inferiores a 1 a função decresce monotonicamente, como mostra a figura 5.11. Desta forma, tendo em conta a simetria da *boxplot* em relação à mediana, é possível prever a forma da distribuição de Weibull, com  $\beta > 1$ .

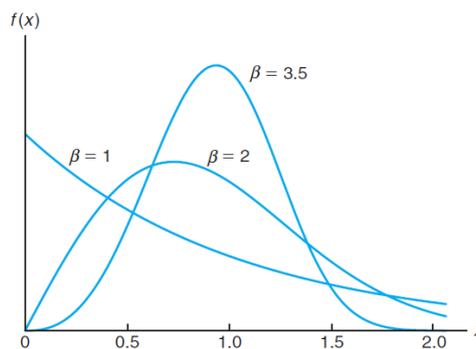


Figura 5.11 - Função de densidade de probabilidade de Weibull para diferentes valores de  $\beta$  (extraída de [23]).

Na tabela 5.10 são apresentados, respectivamente, para todos níveis de tensão em conjunto (com a contribuição do nível de tensão de 220 kV) e separadamente (400 kV e 150 kV), os valores máximo e mínimos do conjunto de dados, os valores do 1º, 2º e 3º quartis e o valor médio dos dados, em escala linear, considerando a presença dos *outliers*.

Tabela 5.10 - Pré-análise dos valores da resistência de defeito, incluindo os *outliers* [ $\Omega$ ].

Nível de Tensão [kV]	Número de observações	Máximo [ $\Omega$ ]	Mínimo [ $\Omega$ ]	1º Quartil [ $\Omega$ ]	2º Quartil [ $\Omega$ ]	3º Quartil [ $\Omega$ ]	Valor médio [ $\Omega$ ]
Todos	100	37,5100	0,0100	1,8150	2,7250	3,4900	3,5357
400	62	37,5100	0,7700	2,3200	2,9550	3,9000	4,3253
150	29	4,3600	0,1000	1,3450	1,9700	2,9125	2,1431

Verifica-se que qualquer valor para o nível de tensão de 400 kV é sempre superior ao correspondente valor para o nível de tensão de 150 kV, embora a distância entre quartis permaneça a mesma para os dois níveis de tensão.

Na tabela 5.11 são apresentados, respectivamente, para todos níveis de tensão em conjunto (com a contribuição do nível de tensão de 220 kV) e separadamente (400 kV e 150 kV), os valores máximo, mínimo e médio do conjunto de dados em escala linear após a remoção dos *outliers*.

Tabela 5.11 - Pré-análise dos valores da resistência de defeito após a remoção dos *outliers* [ $\Omega$ ].

Nível de Tensão [kV]	Número de observações	Máximo [ $\Omega$ ]	Mínimo [ $\Omega$ ]	Valor médio [ $\Omega$ ]
Todos	100	5,7600	0,0100	2,5864
400	62	5,7600	0,7700	2,8740
150	29	4,3600	0,1000	2,1431

Verifica-se novamente que qualquer valor para o nível de tensão de 400 kV é sempre superior ao correspondente valor para o nível de tensão de 150 kV.

Na figura 5.12 são apresentadas, respectivamente, para todos níveis de tensão em conjunto (com a contribuição do nível de tensão de 220 kV) e separadamente (400 kV e 150 kV), as *boxplot* dos dados e a respectiva identificação dos *outliers* (cruzes a vermelho) referentes à distribuição normal em escala logarítmica. Os valores de resistência de defeito aparecem em escala logarítmica de base 10.

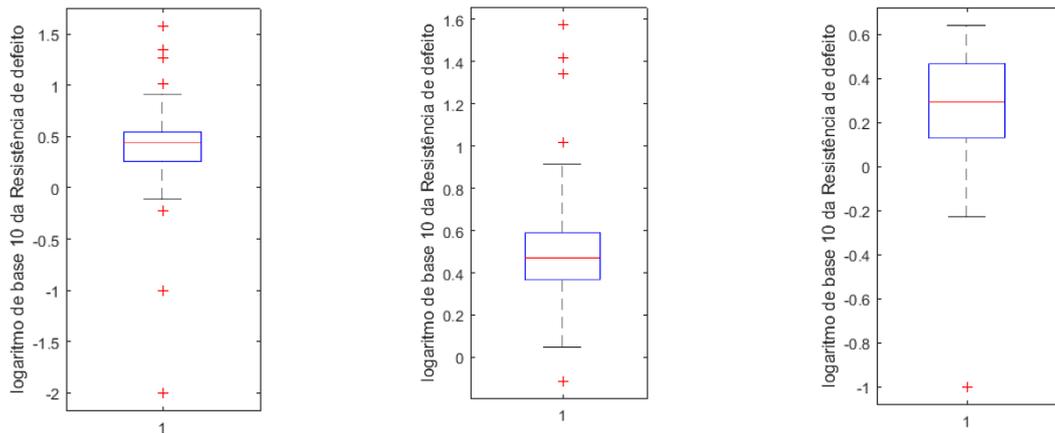


Figura 5.12 - *Boxplot* dos valores do logaritmo da resistência de defeito, para todos os níveis de tensão em conjunto (à direita), para o nível de tensão de 400 kV (ao centro), e para o nível de tensão de 150 kV (à esquerda).

Em relação ao conjunto de todos os níveis de tensão verifica-se a existência de 7 *outliers*, onde 4 estão acima do máximo e 3 abaixo do mínimo definido por Tukey. Para o nível de tensão de 400 kV verifica-se a existência de 5 *outliers*, 4 deles acima do valor máximo e 1 abaixo do valor mínimo definidos por Tukey. Para o nível de tensão de 150 kV verifica-se agora a presença de 1 *outlier*, contrariamente ao que acontecia para este nível de tensão na análise em escala linear onde não existiam *outliers*.

Em comparação com a análise em escala linear, é possível observar que os *outliers* aproximam-se bastante mais da mediana para as *boxplot* correspondentes à escala logarítmica dos valores de resistência de defeito. É de notar ainda que, nas *boxplot* referentes à análise dos valores em escala logarítmica, utilizados no modelo de distribuição normal proposto, é possível observar uma simetria dos diagramas em relação à mediana, excepto na *boxplot* que considera todos os níveis de tensão em conjunto. Quando a mediana se encontra exactamente no centro da *boxplot* significa que a distribuição dos dados é perfeitamente simétrica e que a mediana corresponde exactamente ao valor médio, indo ao encontro das características de uma distribuição normal. Assim sendo, esta observação é um bom indicativo de que o modelo probabilístico proposto se adequa à distribuição dos dados.

Na tabela 5.12 são apresentados, respectivamente, para todos níveis de tensão em conjunto (com a contribuição do nível de tensão de 220 kV) e separadamente (400 kV e 150 kV), os valores máximo, mínimo e médio do conjunto de dados em escala logarítmica, considerando a presença de *outliers*.

Tabela 5.12 - Pré-análise dos valores do logaritmo da resistência de defeito, incluindo os *outliers* [ $\Omega$ ].

Nível de Tensão [kV]	Número de observações	Máximo [ $\Omega$ ]	Mínimo [ $\Omega$ ]	1º Quartil [ $\Omega$ ]	2º Quartil [ $\Omega$ ]	3º Quartil [ $\Omega$ ]	Valor médio [ $\Omega$ ]
Todos	100	1,5741	-2,0000	0,2588	0,4354	0,5428	0,3925
400	62	1.5714	-0,1135	0,3655	0,4705	0,5911	0,4924
150	29	0,6395	-1,0000	0,1283	0,2945	0,4643	0,2501

Verifica-se novamente que qualquer valor para o nível de tensão de 400 kV é sempre superior ao correspondente valor para o nível de tensão de 150 kV.

Verifica-se ainda que a distância entre o 1º e o 2º quartil, e a distância entre o 2º e o 3º quartil são iguais entre si para cada nível de tensão, mostrando uma simetria em relação ao 2º quartil.

Na tabela 5.13 são apresentados, respectivamente, para todos níveis de tensão em conjunto (com a contribuição do nível de tensão de 220 kV) e separadamente (400 kV e 150 kV), os valores máximo, mínimo e médio do conjunto de dados, em escala logarítmica, após a remoção dos *outliers*.

Tabela 5.13 - Pré-análise dos valores do logaritmo da resistência de defeito, após a remoção dos *outliers* [ $\Omega$ ].

Nível de Tensão [kV]	Número de observações	Máximo [ $\Omega$ ]	Mínimo [ $\Omega$ ]	Valor médio [ $\Omega$ ]
Todos	100	0,9154	-0,1135	0,3993
400	62	0,9154	0,0492	0,4437
150	29	0,6395	-0,2291	0,2947

Verifica-se novamente que qualquer valor para o nível de tensão de 400 kV é sempre superior ao correspondente valor para o nível de tensão de 150 kV.

### 5.2.3 Ajuste às distribuições teóricas

Para todos níveis de tensão em conjunto (com a contribuição do nível de tensão de 220 kV) e separadamente (400 kV e 150 kV), são apresentados de seguida para as distribuições de Weibull e normal em escala logarítmica, respectivamente: um gráfico quantil-quantil com a recta de regressão linear ajustada aos pontos do gráfico (figuras 5.13, 5.16, 5.19, 5.22, 5.25, e 5.28); um histograma da distribuição dos dados, com a respectiva função de densidade de probabilidade ajustada aos dados e obtida através dos parâmetros calculados (figuras 5.14, 5.17, 5.20, 5.23, 5.26 e 5.29); e por fim um histograma cumulativo da distribuição dos dados com a respectiva função de distribuição cumulativa obtida também através dos parâmetros calculados (Fig. 5.15, 5.18, 5.21, 5.24, 5.27 e 5.30). Através da observação dos gráficos obtidos pode fazer-se uma análise comparativa entre os resultados obtidos para as duas distribuições.

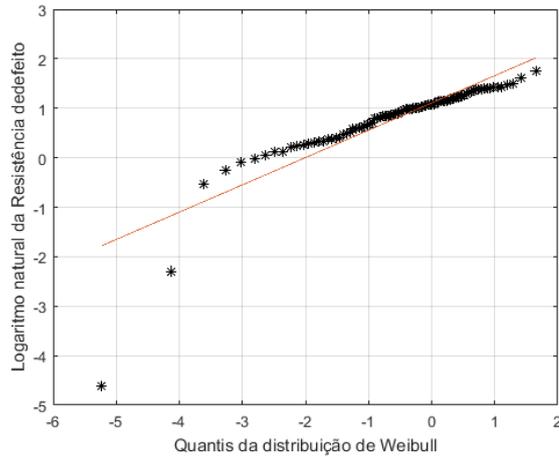


Figura 5.13 - Gráfico quantil-quantil teórico para a distribuição de Weibull, para o conjunto de todos os níveis de tensão (400 kV, 220 kV, 150 kV).

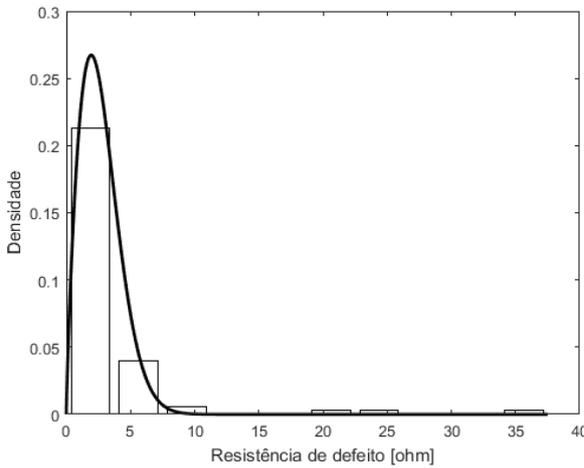


Figura 5.14 - Ajuste da função de densidade de probabilidade de Weibull, à distribuição dos valores de resistência de defeito, para o conjunto de todos os níveis de tensão (400 kV, 220 kV, 150 kV).

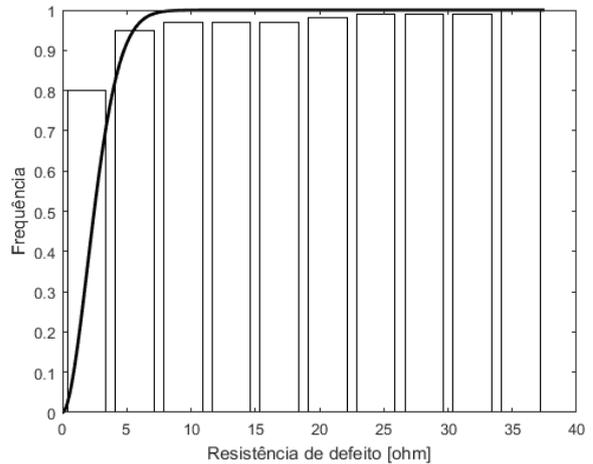


Figura 5.15 - Ajuste da função de distribuição cumulativa de Weibull, à distribuição dos valores de resistência de defeito, para o conjunto de todos os níveis de tensão (400 kV, 220 kV, 150 kV).

Para o conjunto de todos os níveis de tensão verifica-se que, em relação ao gráfico quantil-quantil teórico, a recta se encontra bem ajustada aos pontos do gráfico. Salientam-se o extremo esquerdo do gráfico que apresenta uma ligeira cauda (valores distantes do valor médio dos dados), com 2 pontos a aparecerem bastante longe da recta de regressão linear. No entanto os restantes pontos apresentam-se bastante bem definidos sobre a recta de regressão linear. Verifica-se ainda que a função de densidade de probabilidade se adequa correctamente à distribuição dos dados, ajustando-se às classes definidas. No entanto, a função de distribuição cumulativa não parece tão adequada à distribuição cumulativa dos dados.

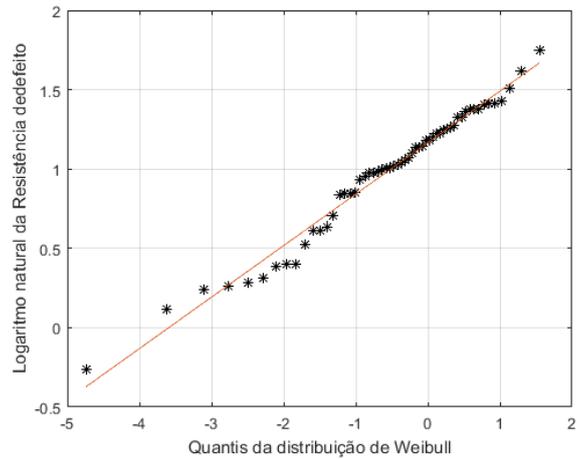


Figura 5.16 - Gráfico quantil-quantil teórico para a distribuição de Weibull, para 400 kV.

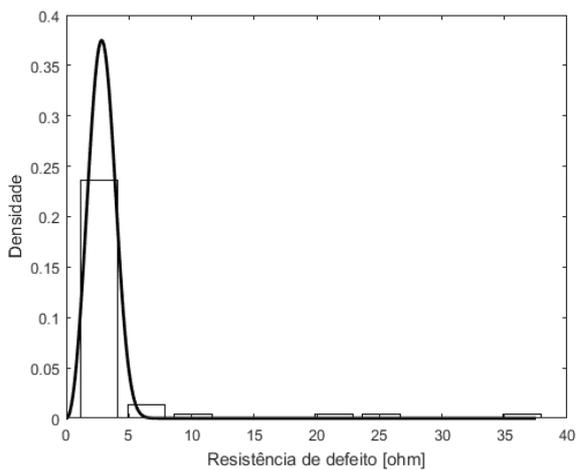


Figura 5.17 - Ajuste da função de densidade de probabilidade de Weibull à distribuição dos valores de resistência de defeito, para 400 kV.

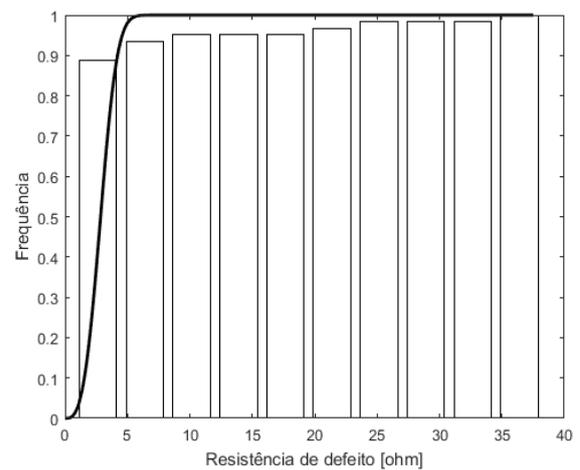


Figura 5.18 - Ajuste da função de distribuição cumulativa de Weibull à distribuição dos valores de resistência de defeito, para 400 kV.

Em relação ao nível de tensão de 400 kV, verifica-se para o gráfico quantil-quantil teórico, que a recta de regressão linear se encontra bem ajustada aos pontos do gráfico. Encontra-se uma zona com uma grande densidade de pontos sobre a recta. No entanto, nas zonas extremas, observam-se ligeiras caudas com maior incidência na zona esquerda, com alguns pontos mais deslocados dos restantes. Isto indica uma assimetria em relação ao valor médio. No entanto estes pontos aparecem ainda suficientemente perto da recta. Pode observar-se ainda uma boa adequação da função de densidade de probabilidade desta distribuição à distribuição dos dados, uma vez que se encontra relativamente bem ajustada às classes definidas. Já a função de distribuição cumulativa não parece tão adequada à distribuição cumulativa dos dados.

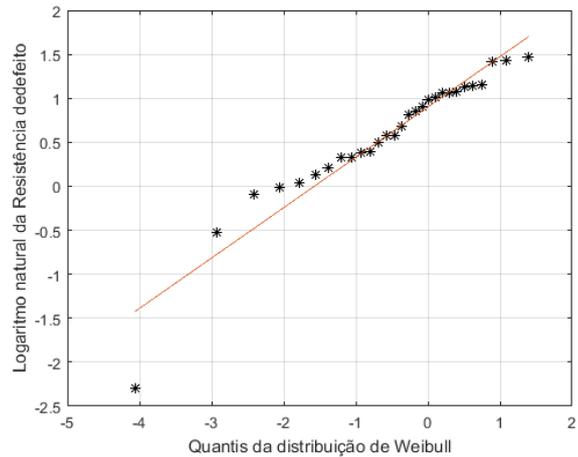


Figura 5.19 - Gráfico quantil-quantil teórico para a distribuição de Weibull, para 150 kV.

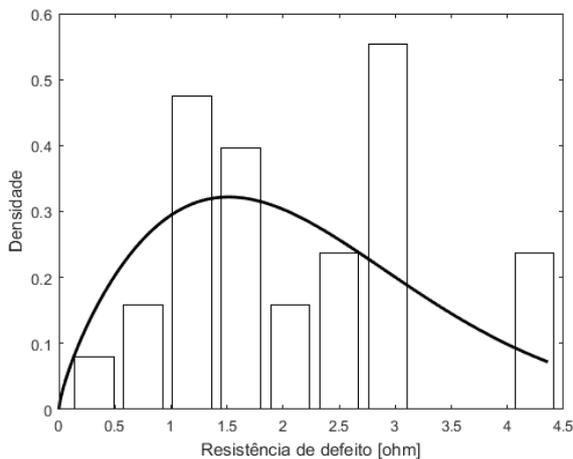


Figura 5.20 - Ajuste da função de densidade de probabilidade de Weibull à distribuição dos valores de resistência de defeito, para 150 kV.

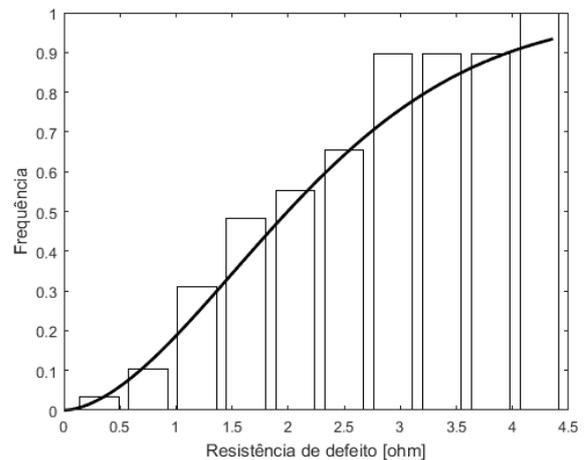


Figura 5.21 - Ajuste da função de distribuição cumulativa de Weibull à distribuição dos valores de resistência de defeito, para 150 kV.

Em relação ao nível de tensão de 150 kV, observa-se uma clara discrepância entre as funções de densidade de probabilidade da distribuição de Weibull e a distribuição dos dados, uma vez que a função de densidade de probabilidade não se ajusta à densidade de cada barra. Também a função de distribuição cumulativa não se ajusta à distribuição cumulativa dos dados. Em relação ao gráfico quantil-quantil teórico pode observar-se que a recta se encontra relativamente ajustada à maioria dos pontos. No entanto à medida que os pontos se vão aproximando dos extremos nota-se uma maior dispersão e afastamento em relação à recta de regressão linear. Por estes dois motivos pode concluir-se que, para este nível de tensão e de acordo com os valores de resistência obtidos, o modelo probabilístico baseado na distribuição de Weibull não se adequa à distribuição dos dados.

Uma vez que este modelo não se adequa ao nível de tensão de 150 kV, considera-se desapropriado para a caracterização probabilística da resistência de defeito.

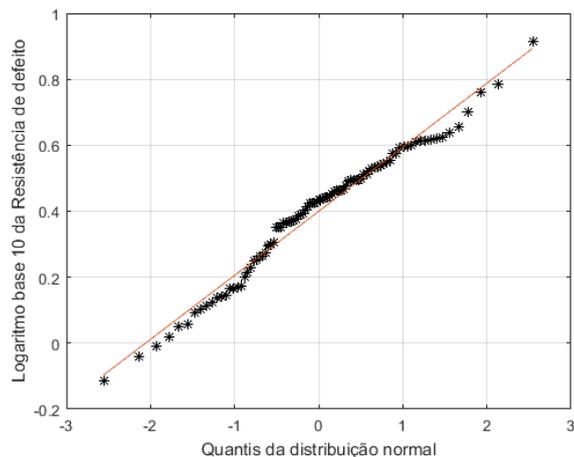


Figura 5.22- Gráfico quantil-quantil teórico para a distribuição normal em escala logarítmica, para o conjunto de todos os níveis de tensão (400 kV, 220 kV, 150 kV).

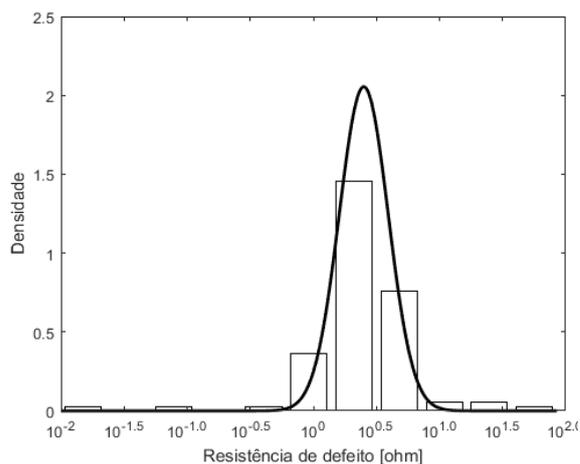


Figura 5.23 - Ajuste da função de densidade de probabilidade normal em escala logarítmica, à distribuição dos valores de resistência de defeito, para o conjunto de todos os níveis de tensão (400 kV, 220 kV, 150 kV).

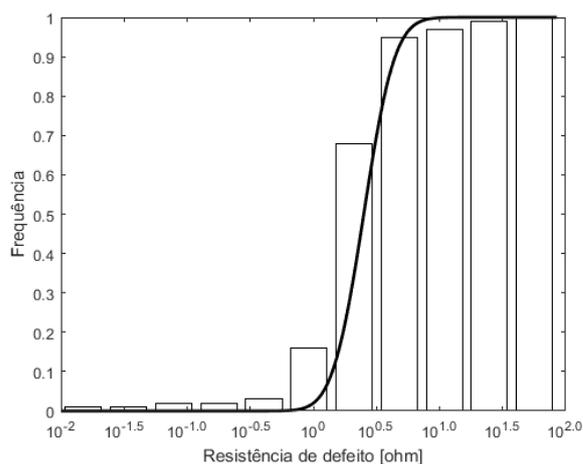


Figura 5.24 - Ajuste da função de distribuição cumulativa normal em escala logarítmica, à distribuição dos valores de resistência de defeito, para o conjunto de todos os níveis de tensão (400 kV, 220 kV, 150 kV).

Para a distribuição normal em escala logarítmica, em relação ao conjunto de todos os níveis de tensão observa-se que no gráfico quantil-quantil teórico, a recta de regressão linear está bem ajustada aos pontos do gráfico. Verifica-se uma grande densidade de valores sobre a recta. No entanto observam-se ligeiras caudas, características desta distribuição. Ainda assim, os pontos da cauda permanecem muito perto da recta. Observa-se ainda que as funções de densidade de probabilidade e de distribuição cumulativa se encontram bem ajustadas aos dados, com estas funções a acompanharem a densidade das classes de dados.

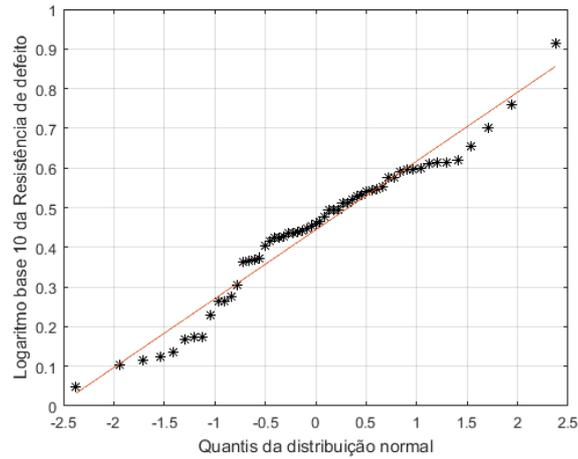


Figura 5.25 - Gráfico quantil-quantil teórico para a distribuição normal em escala logarítmica, para 400 kV.

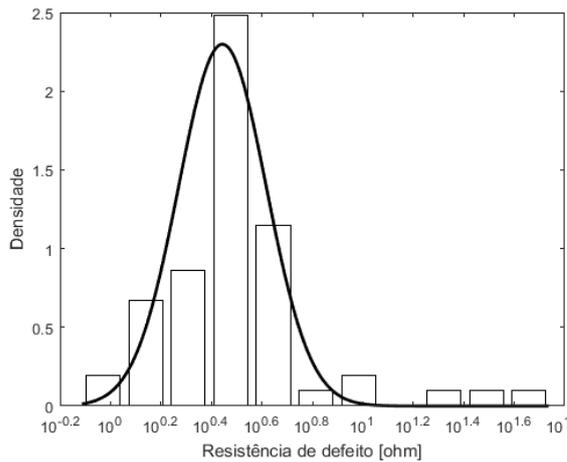


Figura 5.26 - Ajuste da função de densidade de probabilidade normal em escala logarítmica, à distribuição dos valores de resistência de defeito, para 400 kV.

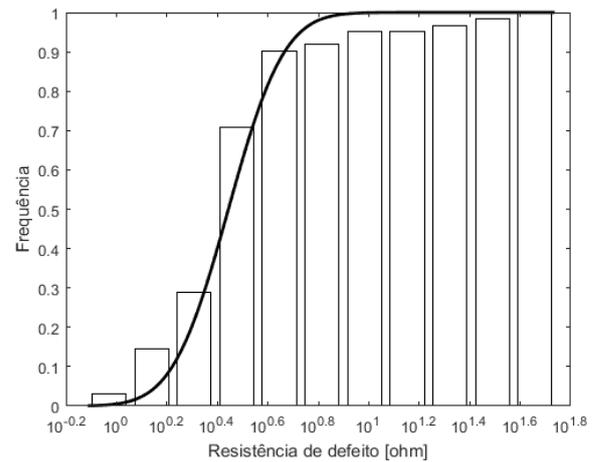


Figura 5.27 - Ajuste da função de distribuição cumulativa normal em escala logarítmica, à distribuição dos valores de resistência de defeito, para 400 kV.

Para o nível de tensão de 400 kV verifica-se, quanto ao gráfico quantil-quantil teórico, que em relação ao valor central dos dados, os valores observados nas caudas estão mais dispersos. Isto significa que estão mais longe da mediana do que deveriam estar para uma distribuição normal. Como dito anteriormente esta característica é bastante comum para os gráficos quantil-quantil teórico respeitantes à distribuição normal. No entanto verifica-se que, ainda assim, os valores das caudas estão próximos da recta de regressão linear. Observa-se ainda um bom ajuste da função de densidade de probabilidade e de distribuição cumulativa desta distribuição à distribuição dos dados.

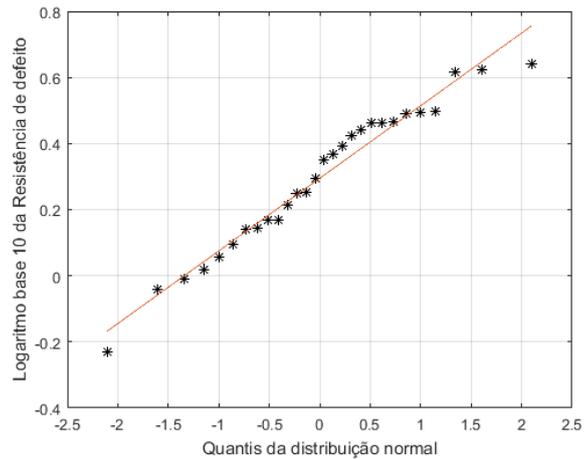


Figura 5.28 - Gráfico quantil-quantil teórico para a distribuição normal em escala logarítmica, para 150 kV.

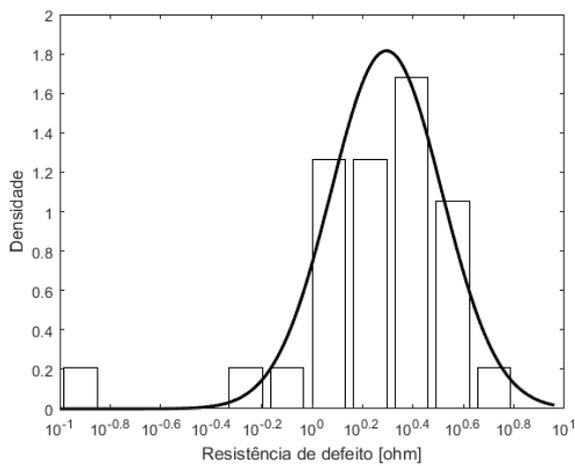


Figura 5.29 - Ajuste da função de densidade de probabilidade normal em escala logarítmica, à distribuição dos valores de resistência de defeito, para 150 kV.

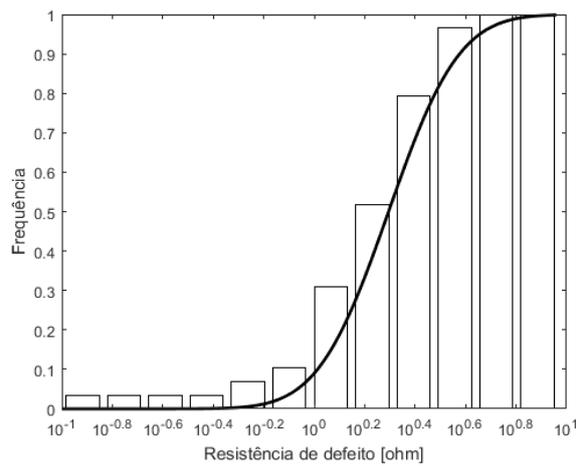


Figura 5.30 - Ajuste da função de distribuição cumulativa normal em escala logarítmica, à distribuição dos valores de resistência de defeito, para 150 kV.

Para os 150 kV, em relação ao gráfico quantil-quantil teórico, apesar da população dos dados não ser elevada, verifica-se um bom ajuste da recta de regressão linear aos pontos do gráfico. Não se verifica uma zona onde a densidade dos valores é maior mas também não se verifica a presença de caudas significativas nos extremos. Aparece apenas um valor no extremo direito um pouco mais afastado da recta. Observa-se agora uma boa adequação das funções de densidade e de distribuição cumulativa à distribuição dos dados, com um ligeiro desvio do valor máximo da função de densidade de probabilidade em relação à densidade máxima dos dados.

Desta forma pode concluir-se que o modelo probabilístico baseado na distribuição normal em escala logarítmica é adequado para caracterizar os valores de resistência de defeito, para todos os níveis de tensão.

As tabelas 5.14 e 5.15 apresentam os valores dos parâmetros obtidos para ambas as distribuições, para todos níveis de tensão em conjunto (com a contribuição do nível de tensão de 220 kV) e separadamente (400 kV e 150 kV), de acordo com o procedimento referido anteriormente.

Tabela 5.14 - Parâmetros da distribuição de Weibull.

Nível de tensão [kV]	Parâmetros	
	$\delta$	$\beta$
Todos	3,0215	1,8111
400	3,2086	3,0811
150	2,4610	1,7474

Através da análise da tabela 5.14 verifica-se que o factor de forma é sempre superior a 1 para qualquer um dos níveis de tensão. Para o nível de tensão de 400 kV existe mais simetria, uma vez que este parâmetro apresenta um maior valor para este nível de tensão do que para o nível de tensão de 150 kV.

Tabela 5.15 - Parâmetros da distribuição normal em escala logarítmica.

Nível de tensão [kV]	Parâmetros	
	$\mu$	$\sigma$
Todos	0,3993	0,1944
400	0,4437	0,1736
150	0,2947	0,2197

Através da análise da tabela 5.15, verifica-se que o valor médio aumenta à medida que aumenta o nível de tensão. Isto significa que a função de densidade de probabilidade para o nível de tensão de 400 kV se localiza mais à direita do que para o nível de tensão de 150 kV. Verifica-se o contrário em relação ao desvio padrão, uma vez que o desvio padrão diminui à medida que o nível de tensão aumenta. Isto significa que para o nível de tensão de 400 kV os valores encontram-se mais próximo do valor médio do que para o nível de tensão de 150 kV.

Nas tabelas 5.16 e 5.17 é também apresentada uma comparação entre o valor médio dos dados observados, após a remoção dos *outliers*, e o valor médio da distribuição em questão, de acordo com os parâmetros obtidos, para todos níveis de tensão em conjunto (com a contribuição do nível de tensão de 220 kV) e separadamente (400 kV e 150 kV).

Tabela 5.16 - Comparação entre o valor médio dos valores de resistência de defeito após a remoção dos *outliers* e o valor médio da distribuição de Weibull [ $\Omega$ ].

Nível de tensão [kV]	Valor médio	
	Dos valores de resistência de defeito [ $\Omega$ ]	Da distribuição de Weibull [ $\Omega$ ]
Todos	2,5864	2,6862
400	2,8740	2,8687
150	2,1431	2,1920

Tabela 5.17 - Comparação entre o valor médio dos valores do logaritmo da resistência de defeito após a remoção dos *outliers* e o valor médio da distribuição normal em escala logarítmica.

Nível de tensão [kV]	Valor médio	
	Dos valores do logaritmo da resistência de defeito	Da distribuição normal em escala logarítmica
Todos	0,3993	0,3993
400	0,4437	0,4437
150	0,2947	0,2947

Verifica-se que o valor médio dos dados e o valor médio da distribuição normal são iguais, sendo ainda iguais ao parâmetro  $\mu$ . Este facto é expectável, uma vez que, para uma distribuição normal, o parâmetro de localização  $\mu$  corresponde exactamente ao valor médio desta distribuição e ainda ao valor médio dos dados observados.

#### 5.2.4 Análise dos resultados

Confrontando os resultados obtidos na literatura com os resultados obtidos em 5.2.3, para esta dissertação, verificam-se incompatibilidades no modelo probabilístico proposto. É de salientar que nesta dissertação os níveis de tensão estudados foram os níveis de tensão de 400 kV, 220 kV e 150 kV, enquanto que, em [13] apenas se estudou a média tensão e em [12] se estudaram valores de resistência obtidos para os níveis de 220 kV, 132 kV e 60 kV.

Enquanto que nos estudos apresentados em 2.3, [12] e [13], se propôs um modelo probabilístico de resistência de defeito baseado numa distribuição de Weibull, verificou-se nesta dissertação que esse modelo probabilístico, apesar de se adequar ao nível de tensão de 400 kV e a todos os níveis de tensão em conjunto (400 kV, 220 kV e 150 kV), não se adequa ao nível de tensão de 150 kV. Para os 400 kV e para o conjunto de todos os níveis de tensão, a recta de regressão linear aparece bem ajustada aos pontos do gráfico quantil-quantil teórico. As funções de densidade de probabilidade também se ajustam à distribuição dos dados. Já em relação à função de distribuição cumulativa, verificou-se, um ligeiro desajuste da função em relação à distribuição cumulativa dos dados. No entanto, para os 150 kV, verificou-se que a recta de regressão linear não se ajusta aos pontos do gráfico quantil-quantil teórico. Também as funções de densidade de probabilidade e de

distribuição cumulativa não se ajustam, de todo, à distribuição dos valores de resistência de defeito, pelo que se conclui que a aplicação deste modelo aos valores da resistência de defeito não é viável.

Verificou-se então, que o modelo probabilístico proposto, baseado na distribuição normal em escala logarítmica, se adequa a todos os níveis de tensão que foram estudados nesta dissertação e por isso é este o modelo proposto para descrever o comportamento dos valores de resistência de defeito em redes de transporte.



## 6 Conclusões

Esta dissertação iniciou-se com a caracterização da resistência de defeito, nomeadamente com a descrição das componentes que a constituem e respectiva influência no valor da resistência, apoiada em estudos anteriores publicados na literatura. Foi feita ainda uma pesquisa bibliográfica, de forma a poder ter conhecimento de valores de resistência de defeito já obtidos e de distribuições probabilísticas adoptadas para os descrever.

Foram aplicados dois algoritmos de localização de defeitos, já existentes, que utilizam medições de tensão e corrente, efectuadas em apenas uma ou nas duas extremidades da linha onde ocorreu o defeito. Através do *software* EMTP-RV foram simulados, para os dois algoritmos, vários defeitos em duas diferentes localizações da rede de teste, correspondente à “RNT Sul”, assumindo vários valores de resistência de defeito. Posteriormente fez-se uma análise aos erros de cada algoritmo, e verificaram-se erros extremamente elevados na localização e no cálculo da resistência de defeito com o algoritmo que utiliza medições em apenas uma extremidade da linha. Desta forma conclui-se que o algoritmo mais adequado para o cálculo da resistência de defeito é o algoritmo que utiliza medições de ambas as extremidades da linha. Assim, a partir desse algoritmo, foram calculados os valores da resistência de defeito correspondentes a 100 defeitos fase-terra registados na RNT. Os defeitos ocorreram em linhas de transmissão de 400 kV, 220 kV e 150 kV.

Os resultados obtidos apresentam algumas diferenças em relação aos valores publicados e anteriormente referidos. Em relação ao nível de tensão de 400 kV, para [9] a grande maioria dos valores obtidos, cerca de 92%, estão entre 3 e 10 $\Omega$ , não se verificando qualquer valor inferior a 3 $\Omega$ . Já neste dissertação, para este nível de tensão, 50% dos valores são inferiores a 3 $\Omega$  e cerca de 40% estão entre 3 e 10 $\Omega$ . O nível de tensão de 220 kV é o que apresenta maior discrepância em relação aos valores publicados, uma vez que a grande maioria dos valores observados para cada fonte de resultados ocorre para diferentes intervalos de resistência considerados. Nesta dissertação, cerca de 67% dos valores estão entre 1 e 3 $\Omega$ . Em [9], para o nível de tensão de 230 kV, 70% dos valores estão entre 3 e 10 $\Omega$  e em [8], para o nível de tensão de 240 kV, 75% dos casos ocorre para valores inferiores a 1 $\Omega$ . Esta discrepância pode dever-se ao facto da dimensão da população para estes níveis de tensão ser reduzida. Nesta dissertação apenas foram estudados 9 defeitos, em [9] foram estudados 13 defeitos e em [8] foram estudados 24 defeitos. O nível de tensão de 150 kV é o que apresenta uma maior concordância entre os valores obtidos e os publicados na literatura uma vez que a maior percentagem de casos observados ocorre para o mesmo intervalo de valores de resistência, nomeadamente 1 e 3 $\Omega$ . Nesta dissertação, cerca de 65% dos valores estão neste intervalo e em [8], para o nível de tensão de 138 kV, cerca de 46% dos valores estão também neste intervalo.

Para a caracterização probabilística dos valores de resistência de defeito foram feitos histogramas com a distribuição dos mesmos, considerando todos os níveis de tensão em conjunto e separadamente. Verificou-se uma maior densidade de observações para valores de resistência mais

baixos com acentuado decréscimo à medida que os valores aumentavam, principalmente para o nível de tensão de 400 kV. Para o nível de tensão de 150 kV esta característica não foi tão evidente e para o nível de tensão de 220 kV foram analisados poucos defeitos e por isso este nível de tensão não foi analisado separadamente. Consideraram-se então dois modelos probabilísticos: um deles baseado numa distribuição de Weibull e o outro baseado numa distribuição normal em escala logarítmica. A escolha dos modelos baseou-se em bibliografia relevante. Para a análise da adequação das distribuições probabilísticas consideradas, adoptou-se um procedimento baseado na análise exploratória de dados (*exploratory data analysis*). Através de ferramentas gráficas fez-se uma abordagem aos valores obtidos de forma a identificar padrões nos dados e valores atípicos. Esses valores foram analisados com base no método de Tukey. Foi então elaborado, para todos os níveis de tensão em conjunto (400 kV, 220 kV e 150 kV) e separadamente (400 kV e 150 kV) um gráfico quantil-quantil teórico com a recta de regressão linear, calculada através dos parâmetros das duas distribuições. Foram ainda aplicadas as funções de densidade de probabilidade e de distribuição cumulativa à distribuição dos valores de resistência de defeito obtidos.

Observou-se que, em relação à distribuição de Weibull, para os níveis de tensão de 400 kV e para todos os níveis de tensão em conjunto esta distribuição se ajusta aos valores obtidos. Para o nível de tensão 150 kV, as funções de densidade de probabilidade e de distribuição cumulativa aparecem completamente desajustadas da distribuição dos dados, e os pontos do gráfico quantil-quantil teórico aparecem relativamente afastados da recta de regressão linear. Desta forma, concluiu-se que a distribuição de Weibull não é adequada para caracterizar os valores de resistência de defeito. O parâmetro de escala desta distribuição situa-se entre 2,46 e 3,21 e o parâmetro de forma entre 1,75 e 3,08.

Em relação à distribuição normal em escala logarítmica verificou-se que, tanto para os níveis de tensão de 400 kV e 150 kV separadamente, como para todos os níveis de tensão em conjunto, esta distribuição se adequa à distribuição dos valores de resistência de defeito. O parâmetro de localização situa-se entre 0,29 e 0,44 e o parâmetro de escala entre 0,17 e 0,22.

Assim concluiu-se que a distribuição normal em escala logarítmica é apropriada e descreve correctamente o comportamento dos valores de resistência de defeito obtidos para os 100 defeitos estudados nesta dissertação.

## Bibliografia

- [1] A. R. van C.Warrington, "Protective Relays – Their Theory and Practice", Vol.1, Chapman and Hall, Londres, 1962.
- [2] REN, " PDIRT - Plano de Desenvolvimento e Investimento da Rede de Transporte de Electricidade 2016-2025".
- [3] LABELLEC, "Revisão do Guia de Coordenação de Isolamento da RNT", 2013.
- [4] V.d. Andrade, E. Sorrentino, " Typical expected values of the fault resistance in power systems" em *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA) IEEE/PES*, São Paulo, 2010.
- [5] ABB oy, "Distribution Automation Handbook", Section 8.6 MV Feeder Earth-fault Protection, 2011.
- [6] G.D. Rockefeller, "Zone-Packaged Ground Distance Relay: I-Principles of Operation", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-85, nº 10, Outubro de 1996.
- [7] C.L. Gilkeson, P.A.Jeanne, J. C. Davenport, Jr., "Power Systems Faults to Ground – Part I: Characteristics", *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, Vol.56, pp. 428-474, Abril de 1937.
- [8] B. Xia, Y. Wang, E. Vázquez, W. Su, D. Wong, M. Tong, "Estimation of Fault Resistance Using Fault Record Data", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 30, pp. 153-160, Fevereiro de 2015.
- [9] E. Sorrentino, C. Ayala, "Measurements of fault resistance in transmission lines by using recorded signals at both line ends", *Electric Power Systems Research*, Vol. 140, pp. 116-120, Novembro de 2016.
- [10] J.-L. Gregoire, D. Klaja, "Neutre MT et Exploitation a Electricite de France", EDF Internal Publ., Novembro de 1995.
- [11] S. Hanninen, "Single phase earth faults in high impedance grounded networks. Characteristics, indication and location", Dissertação de Doutoramento, Helsinki University of Technology, Dezembro de 2001.
- [12] A.d. Santos, M. T. C. d. Barros, "Stochastic modeling of power system faults", *Electric Power Systems Research*, Vol. 126, pp. 29-37, Setembro de 2015.
- [13] J. Barnard, A. Pahwa, "Determination of the impacts of high impedance faults on protection of power systems using a probabilistic model", *Electric Power Systems Research*, Vol. 28, pp.11-18, Outubro de 1993.
- [14] S. H. Horowitz, A. G. Padhke, "Power System Relaying", 4th edition, Wiley, pp. 311-316.

- [15] T. Takagi, Y. Yamakoshi, M. Yamaura, R. Kondow, T. Matsushima, "Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, pp. 2892 – 2898, Agosto, 1982.
- [16] J. Izykowski, "Fault location on power transmission lines", Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Breslávia, 2008.
- [17] C.F. Wagner, R.D. Evens, "Constants of Short Transmission Lines Without Ground Wires", Symmetrical Components, McGraw-Hill Book Company, Nova Iorque e Londres, 1933.
- [18] A. d. Santos, M. T. C. d. Barros, "Probabilistic model of the distance protection error due to the earth resistivity uncertainty", em *CIGRE, XVI ERIAC – Encuentro Regional Iberoamericano*, CIGRE Puerto Iguazú, Argentina, Maio de 2015.
- [19] J. D. McNeill, "Electrical Conductivity of Soils and Rocks", Technical NT5, Geonics Ltd, 1980.
- [20] Engineering Statistics Handbook, "Exploratory data analysis, [Online]. Available: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section1/eda11.htm> [Acedido em Junho de 2017].
- [21] J. M. Chambers, W. S. Cleveland, B. Kleiner, P. A. Tukey, "Graphical Methods for Data Analysis", Wadsworth International Group, California, 1983.
- [22] S. Seo, "A Review and Comparison os Methods for Detecting Outliers in Univariate Data Sets", Dissertação de Mestrado, University of Pittsburgh, 2006.
- [23] R. E. Walpole, R. H. Myers, K. Ye, "Probability & Statistics for Engineers & Scientists, 9th edition, Prentice Hall, pp. 407-408, 2012.