

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



A coordenação de isolamento nas linhas aéreas de
distribuição e a melhoria da qualidade de serviço

André Filipe Aleixo Moreira

Versão Final

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Major Energia

Orientador: Prof. Dr. Hélder Filipe Duarte Leite

Junho de 2010

Resumo

Ao longo dos anos os fenómenos relacionados com as descargas atmosféricas têm sido alvo de diversos estudos devido aos efeitos destas nas linhas de distribuição, estudos estes que visam melhorar a qualidade de serviço e diminuir o número de avarias. As descargas atmosféricas são uma fonte muito importante de sobretensões nas linhas de MT.

As sobretensões de origem atmosférica têm trazido várias preocupações no âmbito do projecto e exploração das linhas aéreas e dos sistemas eléctricos, devido às consequências destas para os diversos componentes. Estas sobretensões são factores a ter em conta aquando da realização da coordenação de isolamentos.

Este trabalho tem como proposta a utilização de Sistemas de Protecção contra Descargas Atmosféricas em que são estudados e analisados os seus efeitos nas linhas de distribuição de energia eléctrica. Através do programa PSCAD/EMTDC® procura-se analisar o comportamento de linhas aéreas de distribuição face a descargas atmosféricas incidentes, directamente nas fases, e verificar o comportamento de diferentes descarregadores de sobretensão implementados na rede.

Abstract

Over the years the phenomena related to lightning have been the target of several studies due to the effects of the distribution lines, these studies aimed at improving service quality and reduce the number of failures. The lightning is a very important source of overvoltages in MV lines.

Overvoltages of atmospheric origin have brought several concerns in the design and operation of airlines and electrical systems, due to the consequences of these for the various components. These surges are factors to take into account when carrying out the coordination of insulation.

This work has proposed the use of Systems Lightning Protection in which they are studied and analyzed the effects of the distribution lines of electricity. Through the program PSCAD/EMTDC® seeks to analyze the behavior of airline distribution deal with lightning incidents, directly in phases, and verify the behavior of different surge arresters implemented in the network.

Agradecimentos

A realização deste trabalho só foi possível com a contribuição de um conjunto de pessoas a quem devo os meus mais sinceros agradecimentos e aos quais não poderia deixar de fazer referência.

Ao Professor Doutor Helder Leite, na qualidade de orientador, que foi indispensável para a realização deste trabalho, pela valiosa orientação científica dada, pelo incentivo e apoio constantes.

Não posso deixar de agradecer aos meus pais por me terem apoiado e incentivado nos momentos mais difíceis e pelo trabalho e sacrifício dispendido no investimento da minha formação, a eles o meu eterno agradecimento.

Índice

Resumo.....	i
Abstract.....	iii
Índice.....	vii
Índice de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xiv
Abreviaturas e Símbolos.....	xvi
Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
1.1 - Enquadramento da dissertação.....	1
1.2 - Estrutura da Dissertação.....	2
Capítulo 2.....	3
Coordenação de Isolamentos: Revisão da literatura	3
2.1 - Introdução.....	3
2.2 - Filosofia de Coordenação de Isolamentos.....	3
2.2.1 - Protecção contra Descargas atmosféricas.....	4
2.2.2 - Factores de coordenação e segurança.....	6
2.2.3 - Sistemas de Protecção contra sobretensões.....	6
i. Hastes de Guarda.....	6
ii. Descarregadores de Sobretensão.....	7
iii. Cabos de Guarda.....	11
iv. Protecções Exteriores.....	11
v. Eléctrodos de Terra.....	12
vi. Isoladores.....	12
2.2.4 - Coordenação de Isolamento à frequência Industrial.....	15

2.2.5 - Problemas de poluição em redes de distribuição	16
2.2.6 - Coordenação de isolamento em linhas aéreas de distribuição	16
2.2.7 - Coordenação de Isolamento em Postos de Transformação MT/BT	18
Capítulo 3.....	27
Solicitações em caso de Sobretensões	27
3.1 - Introdução	27
3.2 - Problemas de Isolamento em Redes de Distribuição	28
3.3 - Métodos de Coordenação de Isolamento em Redes de Distribuição	29
Capítulo 4.....	35
Descargas Atmosféricas - Caracterização	35
4.1 - Introdução	35
4.2 - Caracterização das descargas atmosféricas.....	35
4.2.1 - Frequência de Ocorrência.....	36
4.2.2 - Polaridade e Sentido da Descarga	38
4.2.3 - Amplitude e Forma de Onda	38
4.2.4 - Corrente de Descarga (forma de onda)	41
4.3 - Descargas Atmosféricas em Linhas Aéreas de Distribuição de Energia Eléctrica	42
4.3.1 - Geradores de Choque	42
4.3.2 - Propagação de sobretensões.....	44
Capítulo 5.....	49
Simulações.....	49
5.1 - Introdução	49
5.2 - Método de Monte Carlo (Descargas Atmosféricas)	49
5.3 - Software utilizado (PSCAD/EMTDC®)	51
5.4 - Descargas atmosféricas incidentes na linha.....	51
5.5 - Descarregadores de sobretensão.....	54
5.5.1 - Descarga atmosférica com $I_p=100kA$	55
5.5.2 - Descarga atmosférica com $I_p=55kA$	58
5.5.3 - Descarga atmosférica com $I_p=31kA$	60
5.5.4 - Análise do comportamento dos Descarregadores de Sobretensão	62

Capítulo 6	65
Conclusões e Trabalhos Futuros	65
6.1 - Conclusões	65
6.2 - Trabalhos Futuros.....	66
Anexos	68
Anexo 1 - Modelização da rede a montante	68
Anexo 2 - Cálculos dos parâmetros da função bi-exponencial.....	70
Anexo 3 - Implementação de uma linha aérea de distribuição em PSCAD/EMTDC®	71
Referências Bibliográficas	81

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Mapa Isocerámico de Portugal Continental [2]	5
Figura 2.2 - Cadeia de isoladores com haste de guarda regulável [2]	7
Figura 2.3 - Transição aéreo - subterrâneo com seccionador e descarregadores de sobretensão [3].....	8
Figura 2.4 - Estrutura de um descarregador de sobretensão de SiC [2].....	9
Figura 2.5 - Gráfico de funcionamento de um descarregador de sobretensão de SiC [2].....	9
Figura 2.6 - Estrutura de um descarregador de sobretensão de ZnO [2].....	10
Figura 2.7- Gráfico de funcionamento de um descarregador de sobretensão de ZnO [2]	10
Figura 2.8 - Relação entre tensão e corrente num descarregador de sobretensão de ZnO [2]	11
Figura 2.9 - Estrutura de isoladores de classe A e classe B [2]	13
Figura 2.10 - Visão geral dos tipos de isoladores utilizados em Linhas Aéreas de Distribuição [2].....	13
Figura 2.11-Sobretensões induzidas em linhas aéreas de distribuição com e sem cabos de Guarda [2].....	17
Figura 2.12 - Estimativa do número de contornamentos por descarga directa e indirecta em função do nível de isolamento da linha [2].....	17
Figura 2.13- Posto de transformação aéreo.....	19
Figura 2.14 -Diagrama de um posto de transformação aéreo com terras de protecção e de serviço separadas [2].....	20
Figura 2.15 - Recomendações para protecção de postos de transformação [2]	20
Figura 2.16 - Posto de transformação de cabina baixa	22

Figura 2.17 - Configuração do posto de transformação de cabina baixa [2]	22
Figura 2.18 - Posto de transformação de cabina alta	24
Figura 2.19- Posto de transformação de cabina alta [2].....	25
Figura 2.20- Configuração para protecção contra sobretensões [2]	26
Figura 3.1 - Variação da rigidez de isolamento quando ocorre uma sobretensão temporária [14].....	29
Figura 3.2 - Curva da densidade de Probabilidade P_0 [7]	30
Figura 3.3 - Curva da probabilidade Acumulada $P_T(U)$ [7].....	31
Figura 3.4 - Curvas do risco de cedência do isolamento R , da função densidade de probabilidade $P_0(U)$ e da função probabilidade $P_T(U)$ [8].....	32
Figura 4.1- Mapa ceráunico [34]	36
Figura 4.2 - Gráfico de frequência acumulada relativo às amplitudes de corrente [5]	39
Figura 4.3 - Onda de descarga com amplitude -139kA e tempo de frente igual a 10,5 μ s	39
Figura 4.4 - Onda de descarga com amplitude -122,6kA e tempo de frente igual a 6,5 μ s	40
Figura 4.5 - Onda côncava obtida por normalização dum conjunto de ondas de descarga de polaridade negativa	40
Figura 4.6 - Forma de onda côncava sugerida pela CIGRE.....	41
Figura 4.7 - Onda de choque.....	43
Figura 4.8 - Ondas de tensão e de corrente	45
Figura 4.9 - Onda de corrente e tensão quando atinge um ponto de descontinuidade	46
Figura 4.10 - Descarga atmosférica no ponto intermédio de uma linha	47
Figura 5.1 - Sobretensão provocada por uma descarga atmosférica com $I_p=200$ kA	51
Figura 5.2 - Sobretensão provocada por uma descarga atmosférica com $I_p=100$ kA	52
Figura 5.3 - Sobretensão provocada por uma descarga atmosférica com $I_p=55$ kA	52
Figura 5.4 - Sobretensão provocada por uma descarga atmosférica com $I_p=31$ kA	52
Figura 5.5 - Sobretensão provocada por uma descarga atmosférica com $I_p=10$ kA	53
Figura 5.6 - Sobretensão provocada por uma descarga atmosférica com $I_p=10$ kA, a 10km do ponto onde a descarga atmosférica incidiu	54
Figura 5.7 - Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=100$ kA (descarregador de sobretensão 1).....	56
Figura 5.8 - Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=100$ kA (descarregador de sobretensão 2).....	56

Figura 5.9 - Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=100\text{kA}$ (descarregador de sobretensão 3).....	56
Figura 5.10 - Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=100\text{kA}$ (descarregador de sobretensão 4).....	57
Figura 5.11 - Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=55\text{kA}$ (descarregador de sobretensão 1).....	58
Figura 5.12 - Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=55\text{kA}$ (descarregador de sobretensão 2).....	58
Figura 5.13 - Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=55\text{kA}$ (descarregador de sobretensão 3).....	59
Figura 5.14 - Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=55\text{kA}$ (descarregador de sobretensão 4).....	59
Figura 5.15 - Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=31\text{kA}$ (descarregador de sobretensão 1).....	60
Figura 5.16 - Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=31\text{kA}$ (descarregador de sobretensão 2).....	61
Figura 5.17 - Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=31\text{kA}$ (descarregador de sobretensão 3).....	61
Figura 5.18- Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=31\text{kA}$ (descarregador de sobretensão 4).....	61

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens dos diferentes materiais isolantes [2]	15
Tabela 2.2 - Níveis de isolamento da BT [2]	21
Tabela 2.3 - Soluções normalizadas para postos de transformação de cabina baixa [2].....	23
Tabela 4.1 - Índices a e b (propostas de alguns autores) [19,22]	37
Tabela 5.1 - Probabilidades de ocorrência dos diferentes valores de I_p	50
Tabela 5.2 - Resultados da implementação do Método de Monte Carlo	50
Tabela 5.3 - Valores de pico associados às ondas das sobretensões provocadas pelas descargas atmosféricas directas	53
Tabela 5.4 - Atenuação de onda de tensão ao longo de 10km de linha.....	54
Tabela 5.5 - Parâmetros dos descarregadores de sobretensão usados nas simulações.....	55
Tabela 5.6 - Picos de tensão na fase S com uma descarga atmosférica com $I_p=100kA$	57
Tabela 5.7- Picos de tensão na fase S com uma descarga atmosférica de 55kA	60
Tabela 5.8 - Picos de tensão na fase S com uma descarga atmosférica de 31kA.....	62
Tabela 5.9 - Variação da tensão alterando descarregadores de sobretensão e descargas atmosféricas	62

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

AT - Alta Tensão
BT - Baixa Tensão
CIGRE - *Conseil International des Grands Réseaux Electriques*
DST - Descarregadores de Sobretensão
EDP - Energias de Portugal
EMTDC - *Electromagnetic Transients including DC*
ENF - Energia não Fornecida
IAR - Interruptor Auto-Religador
IAT - Interruptor aéreo telecomandado
IEC - *International Electrotechnical Commission*
MT - Média Tensão
OCR - Órgão de Corte de Rede
PSCAD - *Power Systems Computer Aided Design*
PT - Posto de Transformação
QGBT - Quadro Geral de Baixa Tensão
SiC- Carboneto do Silício
SO₂ - Dióxido de Enxofre
ZnO - Óxido de Zinco

Lista de símbolos

R - risco de cedência do isolamento
 $p_0(U')$ - função densidade de probabilidade de cedência do isolamento
PT(U)- função probabilidade de cedência do isolamento
U - Valor da sobretensão
 N_G - densidade de descargas para o solo
 N_C - número médio de dias por ano em que, numa região mesma região, se ouve trovejar
a - parâmetro variável com a localização geográfica
b - parâmetro variável com a localização geográfica
 N_D - número médio de descargas por cada 100 km de linha e por ano

h - altura média efectiva da linha
 I_p - corrente de pico da descarga atmosférica verificada
I - amplitude de corrente da descarga atmosférica
x - parâmetro em análise
M - valor médio do parâmetro em análise
 β - desvio padrão logarítmico (base e)
 μ - valor esperado do parâmetro x
 U_{CR} - Tensão de crista (valor máximo)
 T_{CR} - Duração de frente (duração ate atingir)
 T_2 - Duração ate meia amplitude
 T_1 - Duração convencional de frente
 τ_1 - duração da cauda da onda
 τ_2 - duração da frente de onda
k - constante de compensação da diferença entre duas exponenciais
Z - impedância de curto-circuito do sistema
 A_0 - valor de tensão a introduzir no PSCAD/EMTDC® para parametrizar o explosor 0
 A_1 - valor de tensão a introduzir no PSCAD/EMTDC® para parametrizar o explosor 1
 U_0 - valor da tensão que resulta da intercepção do valor da corrente de pico usada na descarga atmosférica com a curva de A_0

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Enquadramento da dissertação

O uso generalizado da energia eléctrica no quotidiano acarreta grandes responsabilidades, com crescentes exigências no que respeita à qualidade de serviço. Para responder a essas exigências, ou seja, para que uma rede possua a capacidade de assegurar de forma eficiente um contínuo fornecimento de energia eléctrica, com uma adequada qualidade das suas características, nomeadamente constância de frequência, pureza de tensão e praticamente sem harmónicos, surge a necessidade de realizar um conjunto de estudos a nível de concepção e de projecto, e posteriormente durante a exploração, por forma a alcançar estes objectivos, com o mínimo de investimentos possível.

A coordenação de isolamento de uma linha de distribuição consiste na selecção de distâncias de isolamento adequadas às sobretensões esperadas para o sistema, considerando as características de possíveis equipamentos de protecção. No entanto, seria muito dispendioso economicamente construir uma linha que suportasse todas as sobretensões possíveis. Deste modo, a escolha dos isolamentos deve ser realizada de forma a minimizar os custos e se obtenha uma determinada probabilidade de saída de serviço da linha para cada evento transitório, expressa como um risco de falha aceitável.

Dois tipos de sobretensões podem ser verificados nos sistemas eléctricos de energia. Sobretensões internas causadas por correntes e por tensões transitórias após acções de manobra, ou após a eliminação de defeitos ou sobretensões de origem externa, as quais têm origem no exterior do sistema em que estas se verificam. Estas sobretensões podem ser causadas por descargas atmosféricas.

A simulação de descargas atmosféricas sobre redes de transporte e distribuição de energia eléctrica é portanto uma acção relevante para ajudar a compreender as consequências que podem advir de tal facto, ajudando a dimensionar as redes por forma a evitar consequências nefastas. As descargas atmosféricas são uma das principais causas para as interrupções nas

redes de transporte e distribuição, originando sobretensões nas linhas, o que pode levar a saídas de serviço devido a falhas de blindagem e a contornamento inverso.

Sendo assim, para abordar tal vertente do presente trabalho (visualização e resolução de fenómenos envolvendo partes de uma rede eléctrica) utilizamos o EMTDC, que é um simulador de redes eléctricas com a capacidade de modelizar os diferentes componentes eléctricos (electrónica de potência, blocos de controlo e redes não lineares) pertencentes a uma rede eléctrica do sistema eléctrico de energia; o referido simulador, corre por debaixo de uma interface gráfica chamada PSCAD®.

1.2 - Estrutura da Dissertação

A estrutura desta dissertação está relacionada com o estudo da coordenação de isolamentos efectuada nas redes de distribuição de energia eléctrica, em que é preciso satisfazer o compromisso entre custo/fiabilidade; e os efeitos das sobretensões, nas redes de distribuição, mais concretamente das descargas atmosféricas. Esta monografia encontra-se dividida em 6 capítulos, apresentando no início um resumo que sintetiza o alcance do trabalho realizado.

No capítulo 1 é feita uma introdução ao tema e um enquadramento do mesmo na actualidade. Também é apresentada as motivações adjacentes ao tema, tal como os desafios da abordagem e estudo do tema proposto.

No capítulo 2 é efectuada uma revisão da literatura da coordenação de isolamentos, tendo por base as normas em uso.

No capítulo 3 são abordadas as solicitações em caso de sobretensões, e as duas metodologias usadas para o estudo da coordenação de isolamentos.

No capítulo 4 é feita uma descrição do fenómeno das descargas atmosféricas ao nível da frequência, polaridade e amplitude de onda.

No capítulo 5 é modelizada uma rede de distribuição de energia eléctrica em PSCAD/EMTD®, e é verificado o seu comportamento quando atingidas por descargas atmosféricas.

No Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões deste trabalho de investigação, bem como propostas relevantes para futuros desenvolvimentos.

As expressões, tabelas e figuras encontram-se numeradas sequencialmente sendo o seu número de ordem precedido pelo número do capítulo a que dizem respeito.

As referências bibliográficas e os anexos surgem no final da Dissertação.

Capítulo 2

Coordenação de Isolamentos: Revisão da literatura

2.1 - Introdução

A grande maioria das interrupções de serviço está directamente relacionada com sobretensões nas redes de distribuição provocadas tanto por descargas atmosféricas como por sobretensões de manobra na rede, levando a uma indisponibilidade momentânea ou permanente devido a avarias de equipamentos [10]. Torna-se imperativo, devido à sua importância, encontrar o ponto óptimo da coordenação de isolamentos de cada rede de distribuição contribuindo assim para a diminuição do valor da potência não fornecida.

Neste capítulo irão ser descritas as filosofias e práticas correntes aplicadas para a coordenação de isolamento adoptadas pela Operadora da Rede de Distribuição Nacional (EDP Distribuição, S.A.) e Normas IEEE em vigor (Std 1313.2-1999 IEEE).

2.2 - Filosofia de Coordenação de Isolamentos

Coordenação de isolamentos, define-se como o método de selecção da rigidez dieléctrica dos equipamentos de protecção de um Sistema Eléctrico de Energia, de modo a que este, responda, convenientemente e conforme o esperado, em caso de solicitações expectáveis durante o seu tempo de vida útil [2]. A coordenação de isolamentos pode ser feita com base nos seguintes passos:

- Definir um desempenho aceitável dos isolamentos;
- Caracterizar sobretensões e solicitações ambientais;
- Seleccionar níveis de isolamentos e avaliar o desempenho dos sistemas de protecção da rede de distribuição de energia eléctrica;
- Aplicar medidas e procedimentos para protecção de sobretensões;
- Verificar características de isolamento.

Nas redes de distribuição o isolamento dos equipamentos é sujeito a solicitações dieléctricas e ambientais variadíssimas. Essas solicitações podem ser:

- Tensões em regime permanente à frequência industrial, em que a tensão da rede varia no máxima 10% em relação à tensão nominal, este valor de tensão é referente ao valor máximo da variação, ou seja, ao seu valor de pico;
- Sobretensões temporárias são aquelas que são ocasionadas por manobras na rede, ou seja por abertura e fecho de contactos de Órgãos de Corte de Rede (OCR). São sobretensões que têm uma duração entre 20ms e 1hora;
- Sobretensões transitórias de frente lenta estão associadas a manobras apenas de ligação. Tem um valor de pico que se dá entre os 20 μ s e 5000 μ s após a ocorrência do defeito. Um fenómeno comum que pode originar uma sobretensão deste género é quando ocorre uma descarga atmosférica na vizinhança da linha, e os efeitos desta passam para a rede. A aplicação de descarregadores de sobretensão, é uma prática usual para combater este fenómeno;
- Sobretensões transitórias de frente rápida são ocasionadas por descargas atmosféricas. A frente de onda de tensão destas sobretensões varia entre 0,1 μ s e 20 μ s. A blindagem, os descarregadores de sobretensão e as ligações à terra bem dimensionadas são práticas frequentes para anular os efeitos deste tipo de sobretensões.

O isolamento de uma linha aérea de distribuição e todos os componentes que lhe estão associados como apoios, cabos, e principalmente transformadores (devido ao seu elevado custo) são geralmente sobredimensionados. Assim consegue-se obter uma resposta mais eficaz aquando a ocorrência de uma sobretensão. Um factor muito importante a ter em conta são elevadas concentrações de poluição salina proveniente do mar nas zonas costeiras, pois, quando depositada sobre os isoladores, traduz-se numa redução significativa da rigidez dieléctrica à frequência industrial. Os efeitos deste tipo de poluição ainda se tornam mais severos quando é exposta a níveis de humidade mais elevados, pois a reacção provocada pela poluição salina e humidade tem efeitos muito degradantes nos isoladores. Actualmente a Operadora da Rede Eléctrica de Distribuição Nacional (EDP Distribuição, S.A.) tem diversas premissas relativas ao meio ambiente em Portugal e a sua influência nos níveis de isolamento e na sua coordenação [2].

2.2.1 - Protecção contra Descargas atmosféricas

Em sistemas de distribuição de energia eléctrica, o desempenho esperado aquando da ocorrência de uma descarga atmosférica é o principal factor que determina a selecção dos níveis de isolamento. As descargas atmosféricas podem ser:

- i. Directa à linha aérea ou aos equipamentos da linha;
- ii. Sobretensão induzida associada a uma descarga atmosférica na vizinhança da linha.

Há então que recolher o maior número de informações acerca deste fenómeno natural das descargas atmosféricas. Alguns dos factores que são alvo de maior estudo e investigação neste campo são:

- Densidade das descargas atmosféricas, que em Portugal é muito semelhante a outros países da costa atlântica em que maior número de descargas atmosféricas ocorrem no norte litoral do país, como indicado na Figura 2.1.

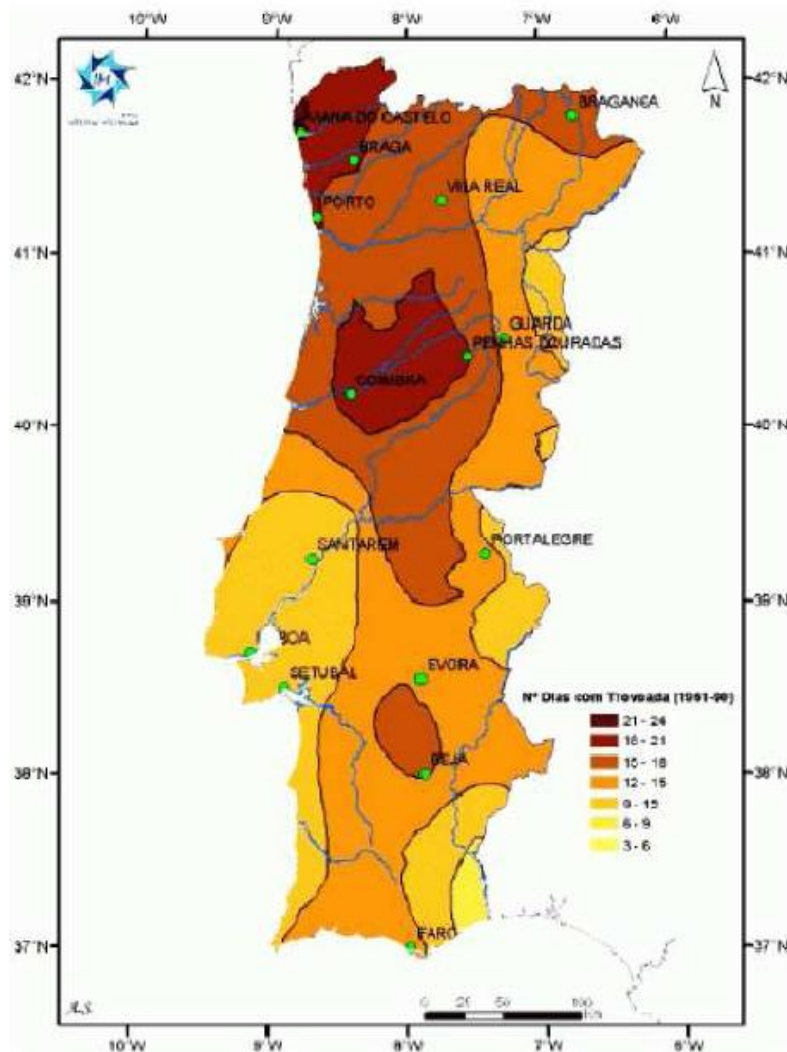


Figura 2.1 - Mapa Isoceráunico de Portugal Continental [2]

- Taxas de avaria provocadas pelas descargas atmosféricas em postos de transformação aéreos de cabina baixa e de cabina alta;
- Segundo DRE-C10-001/E(2007) da EDP Distribuição, S.A. valores aceitáveis para avarias de postos de transformação são de 1 em 1000 por ano para postos de transformação aéreos e de cabina baixa e de 2 em 1000 por ano para postos de transformação da cabina alta [2];
- A blindagem das redes de distribuição de energia eléctrica, pode ser feita por edifícios e árvores que se encontram na periferia, ou até pela topografia do terreno. Assim nem todas as descargas atmosféricas que afectam uma linha, ocorrem directamente na linha, podem ocorrer em pontos adjacentes à mesma;
- Três níveis de blindagem são considerados: sem factor de blindagem, factor de blindagem de 1/3 e factor de blindagem de 2/3. Em Portugal, grande parte das linhas aéreas de MT estão estabelecidas nas proximidades de árvores e edifícios, pelo que o factor de blindagem de 2/3 é apropriado [2].

As características das descargas atmosféricas e as implicações que estas podem ter nas redes de distribuição serão abordadas mais à frente no Capítulo 4 desta Dissertação.

2.2.2 - Factores de coordenação e segurança

A EDP Distribuição S.A. definiu parâmetros relativos às solicitações dieléctricas, ao nível de isolamento e aos níveis de protecção dos dispositivos de controlo de sobretensão, de modo a manter a uniformidade de dados usados internamente [2]:

- Simulação das sobretensões previstas;
- Nível de isolamento definido em termos de tensões suportáveis (frequência industrial e choque atmosférico);
- Nível de protecção dos descarregadores de sobretensão, obtido através da máxima tensão de descarga para a onda de corrente 8/20 μ s com 10kA de amplitude (valor de pico da onda de corrente ocorre aos 8 μ s e após 20 μ s está com um valor de pico de cerca de 50% da inicial).

2.2.3 - Sistemas de Protecção contra sobretensões

Em termos gerais, a coordenação de isolamentos é composta por três níveis de isolamento. O nível de isolamento mais baixo corresponde aos aparelhos de protecção (explosores e descarregadores de sobretensões), o nível de isolamento intermédio corresponde aos isoladores e distâncias livres no ar entre pólos e terra, enquanto que o nível de isolamento mais elevado diz respeito aos componentes com isolamentos sólidos ou líquidos tais como transformadores, cabos e condensadores, bem como às distâncias entre contactos abertos e entre diferentes fases dos aparelhos de corte [7]. Existem então, três níveis de isolamento que se designam por nível de protecção, nível de segurança e nível elevado.

Actualmente, os aparelhos para protecção activa contra sobretensões na rede de distribuição são:

- i. Hastes de Guarda (reguláveis ou fixas);
- ii. Descarregadores de sobretensões:
 - a. Carboneto de Silício (SiC);
 - b. Óxido de Zinco (ZnO).

Existem também outros equipamentos que têm um papel importante na protecção passiva contra sobretensões:

- iii. Cabos de Guarda;
- iv. Protecções exteriores;
- v. Eléctrodos de terra;
- vi. Isoladores.

Protecções Activas

i. Hastes de Guarda

Também conhecidas como explosores. O seu princípio de funcionamento consiste em estabelecer um arco provocado pela sobretensão transitória, escoando assim a corrente para a terra. Este arco é criado a partir de um certo valor de tensão para o qual foi dimensionada a haste de guarda, o qual se designa tensão de interrupção. O funcionamento das hastes de

guarda implicam um curto-circuito e o conseqüente disparo da linha, o que pode causar transtornos, sendo uma desvantagem desta aplicação [3,6].

Em redes eléctricas, de BT em que o neutro não se encontra directamente ligado à terra, a corrente de defeito à frequência industrial poderá extinguir-se automaticamente, e em redes eléctricas com neutro ligado directamente à terra, correntes de defeito são mais elevadas, o arco eléctrico só se irá extinguir se o circuito de alimentação do defeito for aberto [3].

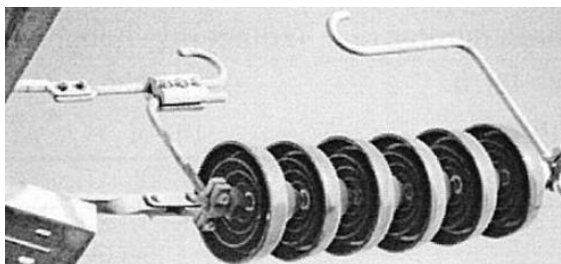


Figura 2.2 - Cadeia de isoladores com haste de guarda regulável [2]

As hastes de guarda são instaladas, normalmente, em locais onde se pretende enfraquecer o nível de isolamento da rede e a sua utilização é muito frequente nas redes eléctricas devido ao seu baixo custo, simplicidade e robustez. Actualmente, as hastes de descarga são utilizadas nas seguintes situações [2]:

- À entrada de subestações, para proteger painéis da linha e transformadores;
- Protecção de isoladores (Figura 2.2);
- Postos de transformação;
- Cruzamento com estradas ou outras vias de comunicação;
- Outros locais em que a falha de equipamento não é permitida.

ii. Descarregadores de Sobretensão

Os descarregadores de sobretensão são dispositivos utilizados nas redes de energia eléctrica para proteger as aparelhagens eléctricas das sobretensões transitórias, limitando a amplitude e duração da tensão em excesso que circula nas linhas. Há a necessidade de se utilizar este tipo de protecção, quer devido ao avultado prejuízo que as sobretensões podem causar, quer pelo desgaste ou mesmo a destruição de equipamentos eléctricos. Foram criados para evitar os inconvenientes apontados às hastes de descarga. Têm como vantagens uma maior segurança para pessoas e equipamentos, um menor número de avarias e diminuição da Energia Não Fornecida (ENF) e por consequência, a melhoria da qualidade de serviço [2].

Contrariamente às hastes de guarda, os descarregadores de sobretensão não implicam necessariamente o disparo das protecções, ou seja, incidentes de rede. Em média, comparadas duas saídas de subestação, uma só com hastes de descarga e outra só com descarregadores de sobretensão em condições idênticas, a rede que se serve dos descarregadores de sobretensão tem 6 vezes menos disparos da linha [3,6,7].

Normalmente, nas redes de distribuição de energia eléctrica os descarregadores de sobretensão são instalados:

- Nos transformadores de potência AT/MT e MT/BT;
- Na aparelhagem da linha (Órgão de Corte de Rede (OCR), Interruptor Auto-Religador (IAR) e Interruptor Aéreo com Telecomando (IAT));
- Em transições aéreo - subterrâneo (Figura 2.3);
- Na blindagem dos cabos isolados, quando uma das extremidades da blindagem se encontra ligada à terra.



Figura 2.3 - Transição aéreo - subterrâneo com seccionador e descarregadores de sobretensão [3]

Os principais parâmetros de ajuste e dimensionamento que levam, à escolha dos descarregadores de sobretensão são a tensão estipulada (valor eficaz máximo da tensão que os descarregadores de sobretensão podem atingir garantindo o seu funcionamento), a tensão em regime permanente (valor eficaz máximo da tensão permitido para o funcionamento em regime permanente e à frequência industrial), a corrente nominal de descarga (valor de pico do impulso da corrente de descarga) e a classe de descarga da linha (capacidade de dissipação de energia do descarregador).

a. Descarregadores de Sobretensão de Carboneto de Silício (SiC)

Os descarregadores de sobretensão de SiC são um dos tipos de descarregadores mais presentes na actual rede, embora a sua utilização esteja em declínio. Conforme se pode verificar na Figura 2.4, a estrutura destes descarregadores de sobretensão é essencialmente uma pilha de blocos de SiC em série com os explosores. Quando ocorre uma sobretensão, há uma disrupção nos explosores colocando a sobretensão em contacto com os blocos de SiC. Estes estabelecem um circuito à terra de baixa impedância que rapidamente vai provocar uma diminuição da corrente produzida pela sobretensão. A tensão volta aos seus valores normais antes da passagem por zero da onda de tensão como se pode verificar na Figura 2.5 [2,3,7]. Este tipo de descarregadores de sobretensão já não é correntemente utilizado para

novas instalações devido ao envelhecimento acelerado dos explosores e à sua sensibilidade à poluição depositada no invólucro.

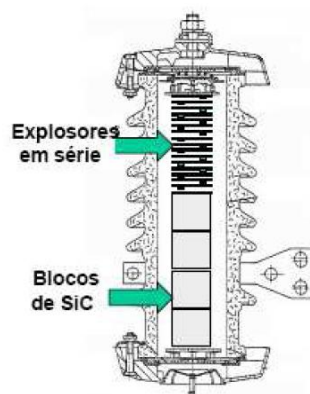


Figura 2.4 - Estrutura de um descarregador de sobretensão de SiC [2]

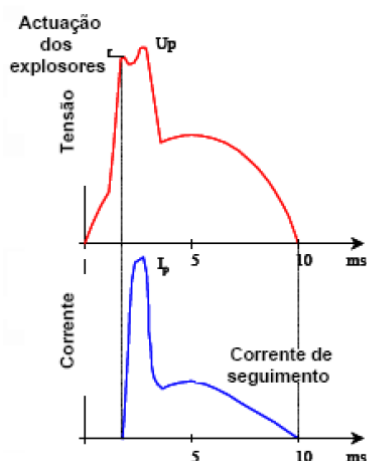


Figura 2.5 - Gráfico de funcionamento de um descarregador de sobretensão de SiC [2]

Como referido, a tecnologia dos descarregadores de sobretensão de SiC já não é usada nas novas instalações ou renovações, pois os de ZnO trazem mais vantagens, como se vai perceber a seguir [2,3,7].

b. Descarregadores de Sobretensão de Óxido de Zinco (ZnO)

Os descarregadores de sobretensões de ZnO são a tecnologia de descarregadores de sobretensão correntemente mais utilizada pela Operadora da Rede Nacional de Distribuição. Como se pode verificar na Figura 2.6, estes são compostos por um invólucro que contém no seu interior uma pilha de blocos de ZnO. O comportamento destas pastilhas é muito pouco linear devido ao ZnO se comportar como um semiconductor [2,3,7].

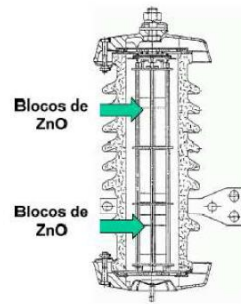


Figura 2.6 - Estrutura de um descarregador de sobretensão de ZnO [2]

Como se pode verificar no Figura 2.7, este tipo de descarregadores de sobretensão é mais rápido na eliminação do defeito não se notando corrente de seguimento contrariamente aos descarregadores de sobretensão de SiC. Também têm como vantagem o facto da sua actuação ser mais suave pela diminuição progressiva da resistência do material semiconductor, fortalecendo a sua longevidade [2].

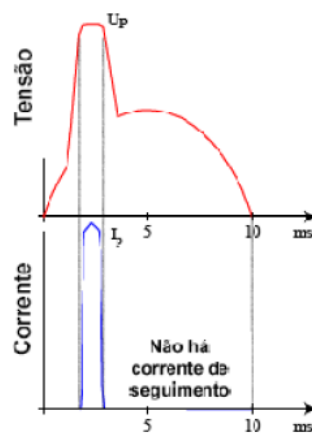


Figura 2.7- Gráfico de funcionamento de um descarregador de sobretensão de ZnO [2]

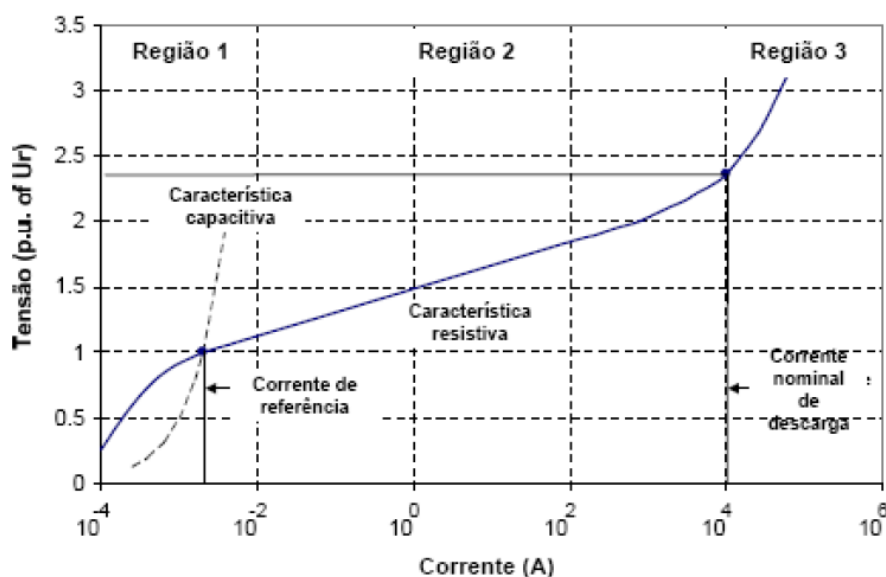


Figura 2.8 - Relação entre tensão e corrente num descarregador de sobretensão de ZnO [2]

O comportamento do descarregador de sobretensão de ZnO pode ser analisado através da Figura 2.8 para tensões da rede até à tensão nominal (aproximadamente 1p.u.) que se comporta como uma impedância elevada quase exclusivamente capacitiva, de 1 p.u. até 2 p.u. comporta-se como uma resistência em que o seu valor é tanto menor quanto maior a tensão a que esta sujeito e a partir de 2 p.u. comporta-se de modo não linear.

Protecções Passivas

iii. Cabos de Guarda

Os cabos de guarda são utilizados com o objectivo de proteger os condutores de fase das descargas atmosféricas, interceptando-as. O único senão é que as resistências de terra dos apoios, na maioria das vezes, não são suficientemente baixas podendo originar um contornamento inverso e, como tal, um incidente na rede. Mesmo assim, o uso de cabos de guarda tem levado a resultados positivos. Na actual rede de Distribuição os cabos de guarda são utilizados exclusivamente nos níveis de AT, 60kV e 132kV. Não havendo cabo de guarda nas restantes linhas, pode-se assumir que as descargas atmosféricas eventualmente vão provocar descargas à terra [3].

iv. Protecções Exteriores

Com um isolamento elevado, as linhas aéreas suportam quase todas as descargas atmosféricas mas no entanto as solicitações aos descarregadores de sobretensão aumentam bastante e, como tal, as avarias também. Com um isolamento baixo, irão ocorrer inúmeros contornamentos ao longo das linhas, havendo uma clara limitação da sobretensão a que a

rede está sujeita. É importante que o nível de isolamento da rede seja constante de modo a evitar que o desempenho da linha em locais de menor isolamento seja prejudicado. Por vezes, principalmente as linhas de MT, devido à altura dos apoios, estas estão protegidas - ou blindadas - das descargas atmosféricas devido à existência de estruturas como edifícios, árvores ou mesmo a topografia do terreno, que irão diminuir as descargas atmosféricas teoricamente previstas nas linhas aéreas [3].

v. Eléctrodos de Terra

Um eléctrodo de terra é o conjunto de materiais condutores enterrados, em contacto directo com o solo, ou embebidos em betão em contacto com o solo, destinados a assegurar boa ligação eléctrica com a terra [12]. Em regime transitório e com correntes de elevada amplitude, a resposta de um eléctrodo de terra depende, para além das suas próprias características, da resistividade do solo no qual está implantado devido à possibilidade de ionização deste. Uma correcta modelização dos eléctrodos de terra exige um conhecimento aprofundado dos diversos fenómenos físicos (processo de ionização do solo), bem como das características geométricas e eléctricas dos próprios eléctrodos e das características do solo. Assim, pode-se normalmente encontrar eléctrodos curtos, para os quais o tempo de propagação é considerado nulo, bem como eléctrodos longos nos quais o tempo de propagação é relevante. No primeiro caso, os eléctrodos são modelizados por resistências concentradas (lineares ou não-lineares), enquanto na segunda situação, deve ser adoptada uma modelização com parâmetros distribuídos. Em zonas com solos de elevada resistividade, conduzindo a valores de resistência muito elevados, os eléctrodos de terra são implementados com recurso a condutores relativamente longos (contrapesos) que se desenvolvem a pequena profundidade paralelamente à superfície [5].

vi. Isoladores

Os isoladores usados nas redes eléctricas têm como função principal isolar electricamente corpos condutores, como é o caso das linhas, de outros elementos da rede, os apoios por exemplo. No caso de linhas aéreas de transporte de energia, esta função é realizada através da ligação de múltiplos isoladores em cadeia, designando-se o conjunto por cadeia de isoladores, permitindo o isolamento eléctrico entre os condutores de fase e os apoios metálicos que suportam a linha [5]. Podem também ser usados para servir de barramento ou apenas para sustentação mecânica dos condutores.

No seu dimensionamento são tidos em conta os valores mínimos de diferença de potencial a suportar por estas (normalmente o valor instantâneo máximo entre uma fase e a terra) bem como as máximas sobretensões esperadas, em resultado de regimes transitórios associados, entre outros, a manobras de disjuntores e a descargas atmosféricas. Nestas situações, as cadeias de isoladores podem ser submetidas a diferenças de potencial muito superiores às registadas em regime normal de funcionamento. Em condições normais, e admitindo um isolamento perfeito, a cadeia de isoladores equivale a um circuito de impedância infinita. No entanto, quando a diferença de potencial entre dois pontos (extremidades ou não) ultrapassa a rigidez dieléctrica do meio isolante, podem ocorrer arcos eléctricos entre esses dois pontos com riscos de danificação da cadeia de isoladores, sobretudo se se estabelecer ao longo da

superfície desta. Para evitar esta situação, são normalmente utilizados eléctrodos com configurações adequadas, criando condições para que o arco eléctrico, não podendo ser evitado, ocorra através do ar sem danificar a cadeia de isoladores [5].

Os isoladores são constituídos por um corpo isolante e acessórios de fixação. O seu invólucro é desenhado de modo a proteger o núcleo de agressões exteriores e também fornecer uma linha de fuga extensa no caso de haver contornamento. Os isoladores são classificados do seguinte modo, segundo [2], como se observa na Figura 2.9:

a) Classes A - caracterizam-se pelo facto de a distância mais curta de perfuração do isolador ser maior ou igual a metade do comprimento mínimo do arco eléctrico que pode ser estabelecido no exterior;

b) Classe B - a distância mais curta de perfuração do isolador é menor que metade do comprimento mínimo do arco eléctrico que pode ser estabelecido no exterior; este isolador é considerado perfurável.

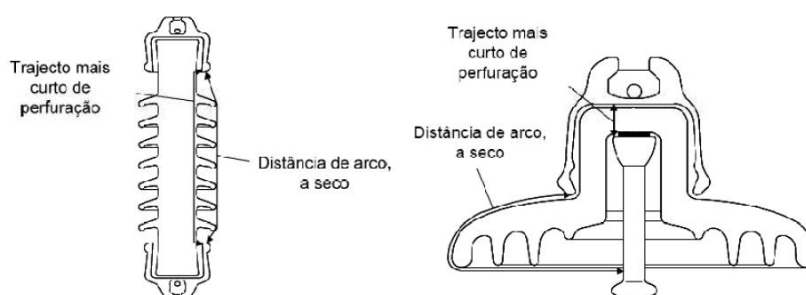


Figura 2.9 - Estrutura de isoladores de classe A e classe B [2]

Os isoladores são especificados de acordo com o material com o qual o corpo isolante é fabricado. A Figura 2.10 apresenta os materiais isolantes usados actualmente e a designação do tipo de isoladores:

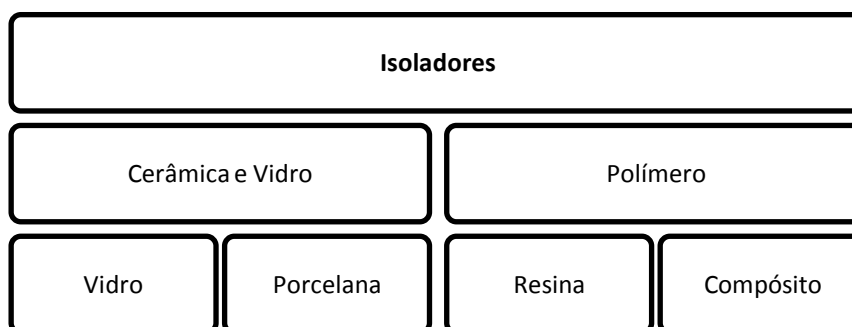


Figura 2.10 - Visão geral dos tipos de isoladores utilizados em Linhas Aéreas de Distribuição [2]

De todos os tipos de isoladores existentes, actualmente, em Portugal, a Operadora da Rede Nacional de Distribuição, usa maioritariamente isoladores de porcelana. Porém, analisando o comportamento destes isoladores, verifica-se que o seu uso não trás grandes vantagens, pois as taxas de avarias são algo elevadas quando comparadas com as registadas em outros países. Constatou-se que isoladores rígidos e de cadeia são muitas vezes afectados

por defeitos invisíveis que provocam falhas intermitentes da linha. Para suavizar este problema:

- Substituir isoladores rígidos por isoladores de Classe A, ou seja caracterizam-se pelo facto da distância mais curta de perfuração do isolador ser maior ou igual a metade do comprimento mínimo do arco eléctrico que pode ser estabelecido no exterior [2];
- Adquirir equipamentos com maior qualidade;
- Usar técnicas de detecção de isoladores perfurados (ex: câmara de ultra violetas para detecção do efeito Coroa¹);
- Aplicar outros materiais isolantes.

A escolha dos isoladores e mais concretamente dos seus materiais isolantes pode ser condicionada pelos fabricantes, pois cada fabricante utiliza materiais, técnicas de construção e processos de fabrico diferentes; e muitas empresas de transporte e distribuição de energia eléctrica não têm a certeza das unidades que têm em serviço numa dada estrutura. A Tabela 2.1 faz a comparação dos diferentes tipos de materiais isolantes usados, expondo as vantagens e desvantagens de cada material.

Os isoladores mais frequentemente instalados na rede de distribuição de energia eléctrica são os de porcelana e vidro temperado embora exista uma grande variedade de materiais a partir dos quais são feitos. Neste momento, os isoladores de materiais poliméricos, aparentam ter um bom compromisso entre o seu custo e desempenho, sendo expectável que venham a ser mais utilizados no futuro.

¹ Efeito coroa: a corrente de fuga nas linhas aéreas é geralmente muito pequena e vai subindo proporcionalmente com a tensão até um determinado limite. A partir desse ponto o crescimento torna-se muito rápido deixando de ser desprezável. Assim para valores muito elevados de tensão a corrente de fuga pelo ar passa a ter um valor significativo e o ar, que quando seco é um isolante perfeito deixa de o ser. O campo eléctrico passa a ter valores elevados e começam a aparecer eflúvios luminosos, produzindo um leve crepitar, nos pontos onde há arestas ou saliências, em resultado do conhecido poder das pontas; esses eflúvios constituem o começo da perfuração do dieléctrico. A partir de determinado valor de tensão, e quando observado na escuridão, todo o condutor aparece envolto por uma auréola luminosa azulada, que produz um ruído semelhante a um apito. Este fenómeno é o Efeito de Coroa [9]

Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens dos diferentes materiais isolantes [2]

Material	Vantagens	Desvantagens
Vidro	<ul style="list-style-type: none"> - Fiabilidade a longo prazo; - Indicação visual dos defeitos internos; - Boa resistência à perfuração; - Bom desempenho, em geral. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alvo de vandalismo; - Disrupção por bandas secas durante longos períodos de tempo poderá danificar vidro; - Material pesado; - Não disponível em algumas regiões.
Porcelana	<ul style="list-style-type: none"> - Fiabilidade a longo prazo; - Superfície resistente à disrupção por bandas secas; - Não estilhaçam quando quebrados; - Bom desempenho, em geral. 	<ul style="list-style-type: none"> - Defeitos internos, por vezes, não são visíveis; - Zonas com muita poluição, pode ser necessário ter mais isoladores para equipar a cadeia; - Material pesado; - Não disponível em algumas regiões.
Compósito (polimérico, resina epóxida, EPDM, SiR)	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo peso; - Baixo custo; - Mais resistente à poluição. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vida útil incerta; - Anos de experiência insuficientes; - Diferentes projectos e diferentes materiais no seu fabrico; - Sensíveis ao manuseamento; - Defeitos internos por vezes não são visíveis.
Resina	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo peso; - Baixo custo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mau desempenho face à poluição; - Em climas húmidos há erosão da superfície; - Vida útil incerta.

2.2.4 - Coordenação de Isolamento à frequência Industrial

A eficiência de uma linha de distribuição à frequência industrial (50Hz) é, na grande maioria, influenciada pelo desempenho, em caso de contingência, dos seus isolamentos sob condições, severas ou não de poluição. Assim torna-se indispensável conhecer ao pormenor as condições de poluição do local onde se vão implementar os isoladores, para assim se poder fazer um melhor dimensionamento dos mesmos [2].

As sobretensões temporárias que actuam na linha irão causar uma redução significativa no isolamento de equipamentos, devido a condições ambientais severas ou aceleram o envelhecimento do isolamento. A chuva, por exemplo, reduz a robustez externa do dieléctrico dos isoladores, mas não força o aparecimento de lacunas de ar. Chuva em conjunto com a poluição pode reduzir drasticamente a resistência de isolamento. Nevoeiro ou formação de orvalho, chuva ou luz juntamente com a poluição ou contaminação são geralmente as piores condições a que o isolador está sujeito [4].

2.2.5 - Problemas de poluição em redes de distribuição

É do conhecimento das entidades responsáveis para a implementação de isolamentos quais são os locais onde a poluição é maior e menor. Para identificar um nível de poluição suficientemente elevado para provocar contornamentos numa cadeia de isoladores, são utilizados os seguintes aspectos [2]:

- Identificação da fonte de poluição (ex: Salina, industrial, etc);
- Danos e desgaste visíveis na estrutura dos isoladores;
- Ruído devido ao efeito coroa, provocado pelos índices elevados de humidade no ar (visível durante a noite);
- Poeiras revestindo os isoladores, não constituem problemas de maior; no entanto se na superfície do isolador se formar uma camada de Dióxido de Enxofre (SO_2), quando esta estiver em contacto com a humidade, poderá resultar num contornamento, apesar de não existir uma evidência visual de poluição neste caso;
- Vestígios de uma possível acção de manutenção do isolador;
- Caso ocorra algum contornamento à superfície do isolador:
 - Pode dever-se a índices de humidade elevados;
 - Ocorre no início do dia devido à condensação, porém, em zonas costeiras, a manha é quando as aves regressam à actividade e podem contaminar os isoladores com excrementos;
 - Não há justificações para a ocorrência de contornamento, exceptuando os casos em que há incêndios ou quando ocorre uma descarga atmosférica
 - Dá-se quando, após um grande período de seca, se dá um dilúvio;
- De acordo com a CIE 60815, as linhas aéreas da rede nacional de distribuição, são classificadas com o nível de poluição médio, ou seja, 20mm/kV;
- A grande parte das subestações, são classificadas com o nível de poluição forte (25mm/km), devido aos requisitos de desempenho que lhe são atribuídos e à sua importância. Nas proximidades costeiras o nível de poluição passa a ser muito forte.

2.2.6 - Coordenação de isolamento em linhas aéreas de distribuição

É de extrema importância a ocorrência de descargas atmosféricas nas linhas aéreas de distribuição de energia eléctrica, por isso, é um motivo a ter em conta aquando do dimensionamento dos isolamentos das linhas. Há a ter em conta, principalmente o desempenho da linha em termos de interrupção devido a descargas atmosféricas directas e indirectas e a amplitude das sobretensões atmosféricas que se propagam ao longo da linha e que poderão solicitar o isolamento do equipamento instalado na linha. No entanto existem

outros factores que podem influenciar o desempenho das linhas face a descargas atmosféricas, como a instalação de cabos de guarda, eléctrodos de terra na base dos apoios eficientes, selecção do nível de isolamento da linha e aplicação de descarregadores de sobretensão. A função dos cabos de guarda passa por interceptar as descargas atmosféricas directas à linha, de modo a proteger os condutores de fase. Todas as descargas directas ao cabo de guarda irão originar um contornamento inverso e disparo da linha, devido às resistências dos apoios serem altas [7].

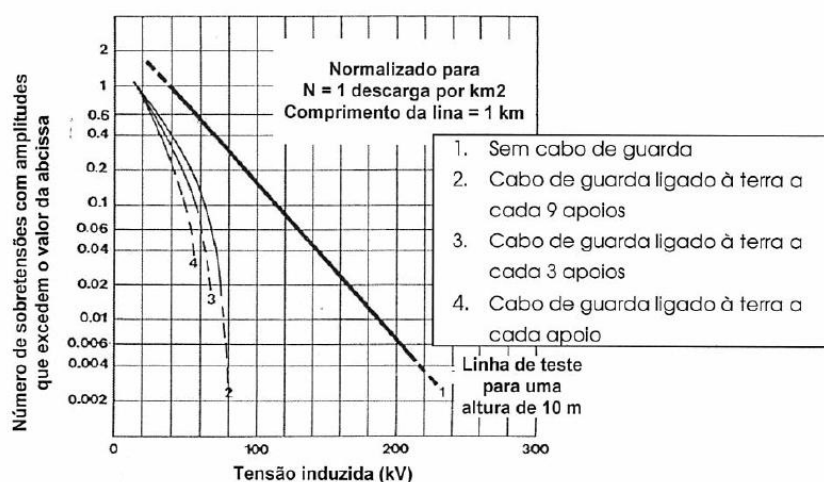


Figura 2.11-Sobretensões induzidas em linhas aéreas de distribuição com e sem cabos de Guarda [2]

Em linhas aéreas MT, sem cabos de guarda, parte-se sempre do pressuposto que as descargas atmosféricas directas à linha irão causar contornamento da cadeia de isoladores. Por análise da Figura 2.11, podemos observar que o desempenho de uma linha em que há cabos de guarda, após sobretensões originadas por descargas atmosféricas indirectas é superior a uma linha aérea sem cabo de guarda.

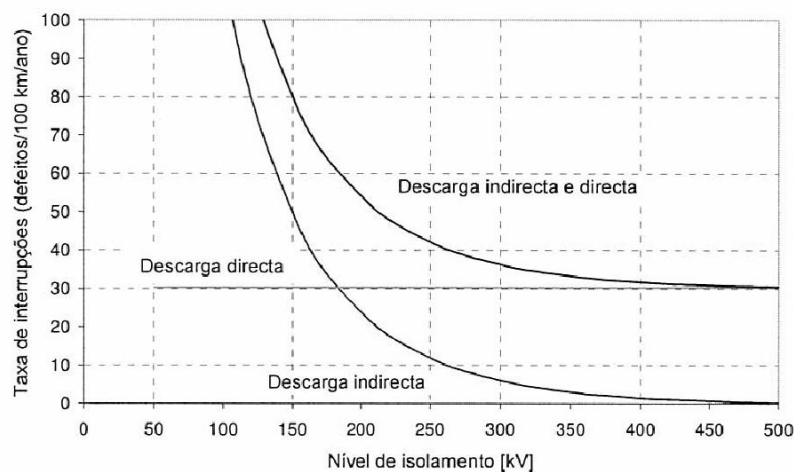


Figura 2.12 - Estimativa do número de contornamentos por descarga directa e indirecta em função do nível de isolamento da linha [2]

A selecção do nível de isolamento irá afectar somente o desempenho da linha em termos de sobretensões induzidas de origem atmosférica. Pela análise da Figura 2.12 conclui-se que há uma melhoria de cerca de 50% no desempenho se o nível de isolamento aumentar de 170kV para 250kV. Acima de 250kV a linha aérea de distribuição irá suportar quase todas as sobretensões induzidas por descarga atmosférica indirecta. Note-se que as solicitações dieléctricas do equipamento ligado a uma linha aumentam à medida que o nível de isolamento deste também aumenta. Por sua vez, quando o nível de isolamento é baixo irão ocorrer múltiplos contornamentos limitando a sobretensão que se propaga ao longo da linha.

2.2.7 - Coordenação de Isolamento em Postos de Transformação MT/BT

Existem três tipos de postos de transformação MT/BT, instalados nas redes aéreas MT da Operadora da Rede Nacional de Distribuição: (i) postos de transformação aéreos; (ii) postos de transformação de cabina baixa e (iii) postos de transformação de cabina alta. Com o passar do tempo, e com as inúmeras avarias ocorridas nestes locais da rede, mais concretamente nos transformadores, chegou-se à conclusão que estes equipamentos são bastante vulneráveis a sobretensões. Dados da EDP Distribuição S.A. apontam para 317 transformadores avariados no espaço temporal de dois anos [2], o que é demasiado e acarreta custos elevados. Do total de transformadores avariados:

- a. 23% são devido a descargas atmosféricas
- b. 21% devido a defeito de isolamento interno.

i. Postos de Transformação Aéreos

Na Figura 2.13 podemos identificar um posto de transformação aéreo, muito comum em Portugal, principalmente no interior do país, ou em zonas de pouca densidade populacional em que é necessária energia.



Figura 2.13- Posto de transformação aéreo

Os diversos componentes que um posto de transformação aéreo tem são:

- Terra de protecção, com ligação do posto de transformação à terra deverá assegurar tensões de contacto seguras;
- Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT): as ligações aos clientes BT são feitas através do QGBT;
- Condutores de fase e neutro: Ligação aos clientes BT;
- Terra de Serviço: primeira ligação do neutro à terra nas primeiras dezenas de metros a partir do posto de transformação aéreo para garantir terras distintas (terra de protecção e terra de serviço);
- Terra de neutro: o condutor de neutro é ligado a cada 200-300 metros na rede de BT;
- Terra global de neutro: corresponde à resistência global das ligações do neutro à terra.

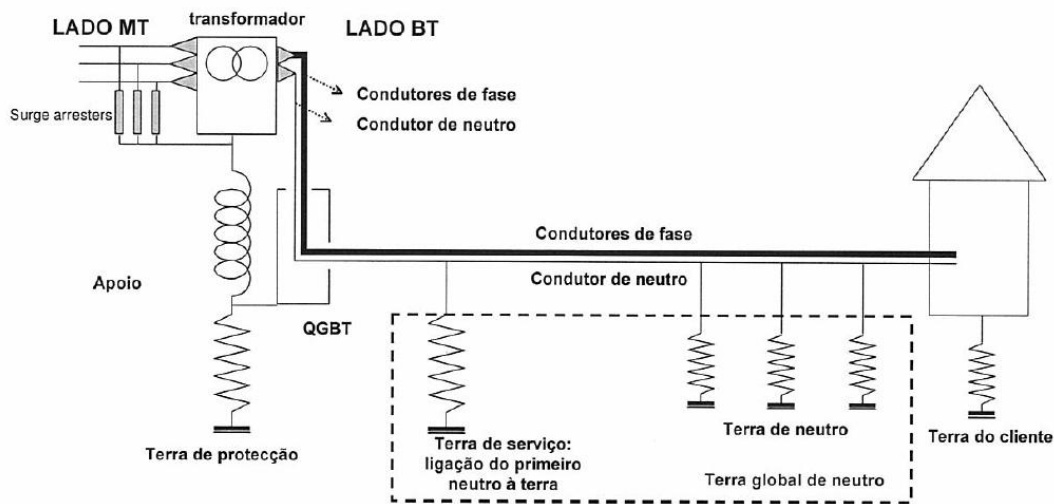


Figura 2.14 -Diagrama de um posto de transformação aéreo com terras de protecção e de serviço separadas [2]

Os descarregadores de sobretensão são instalados no lado MT dos transformadores MT/BT para protecção contra sobretensões oriundas da linha MT. No lado BT do transformador não são instalados descarregadores. O QGBT é instalado junto à base do apoio de betão e ligado directamente à terra de protecção, para garantir um baixo valor de tensão de contacto na proximidade do QGBT, assim como para garantir a equipotencialidade de todas as massas da instalação. Nos postos de transformação aéreos da EDP Distribuição as terras de protecção e de serviço encontram-se separadas como mostra a Figura 2.15:

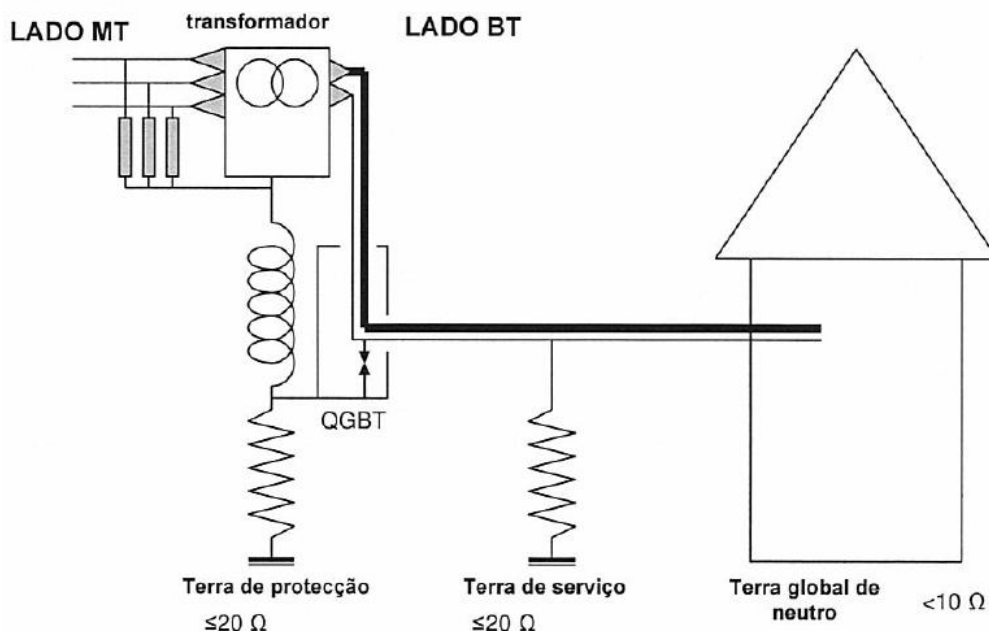


Figura 2.15 - Recomendações para protecção de postos de transformação [2]

A configuração deste tipo de postos de transformação tem as particularidades da tensão no QGBT ser baixa, não existe diferença de potencial entre o poste e o QGBT e o equipamento do QGBT passará a estar protegido por um explosor. O risco de passagem a terra única devido à avaria de equipamento é baixo e o explosor permite estabelecer um ponto preferencial de escorvamento durante condições transitórias excepcionais. A principal desvantagem da passagem a terra única é a transferência da elevação de potencial de terra para os clientes. Para prevenir esta condição, a terra de protecção deverá ter um valor inferior a 20Ω , de acordo com a regulamentação aplicável [2].

Nas novas instalações de postos de transformação aéreos são necessárias ter considerações especiais relativamente aos níveis de isolamento. O QGBT deverá ser equipado com um explosor entre o neutro BT e a terra de protecção local, em que o explosor terá como função proteger o equipamento BT, assim como proteger o isolamento BT do transformador; nos transformadores MT/BT o contornamento deverá ocorrer nas travessias BT e não internamente pelo óleo; e os descarregadores de sobretensão deverão ser instalados do lado MT dos transformadores MT/BT. Os condutores de ligação dos descarregadores de sobretensão deverão ser os mais curtos possíveis. A Tabela 2.2 refere algumas considerações quanto ao nível de tensão de isolamento [2]:

Tabela 2.2 - Níveis de isolamento da BT [2]

	Nível de isolamento BT		Nível de protecção BT	
	AC (50Hz)	U	AC (50Hz)	U
Transformador	10 kV	30 kV	-	-
QGBT	10 kV	20 kV	-	-
Explosor no QGBT	-	-	8 kV	18 kV

Para instalações já existentes, a EDP Distribuição S.A. definiu um conjunto de alterações nos sistemas de protecção dos postos de transformação aéreos. Os descarregadores de sobretensão de SiC deverão ser substituídos por descarregadores de sobretensão de ZnO; os descarregadores de sobretensão de ZnO deverão ser instalados sem outros equipamentos de protecção, como hastes de guarda; retirar hastes de guarda dos transformadores MT/BT sempre que estejam instalados descarregadores de sobretensão de ZnO e quando ocorre uma avaria no transformador MT/BT ou no QGBT apenas o elemento avariado tem de ser substituído.

A ligação à terra de protecção do posto de transformação deverá ser igual ou inferior a 20Ω . A terra global de neutro deverá ser igual ou inferior a 10Ω . A resistência de terra da primeira ligação do neutro à terra (no mínimo a 20 metros do posto de transformação) deverá ser inferior a 20Ω de modo a melhorar a protecção dos clientes em situações de transferência do potencial de terra da rede MT [2].

ii. Postos de transformação de cabina baixa

Na Figura 2.16 pode-se observar um possível tipo de posto de transformação de cabina baixa, já muito comum em Portugal.



Figura 2.16 - Posto de transformação de cabina baixa

Neste tipo de instalação, a ligação ao posto de transformação é realizada através de um cabo subterrâneo, como representado na Figura 2.17. A presença do cabo subterrâneo oferece uma protecção contra sobretensões, visto que apenas uma parte da sobretensão incidente se propaga pelo cabo subterrâneo devido à sua menor impedância de onda. Para comprimentos de cabo curtos, é suficiente ter apenas descarregadores instalados na transição aéreo-subterrâneo. Para cabos de comprimentos longos, devido às reflexões das sobretensões no transformador, recomenda-se a instalação de descarregadores aos terminais do transformador.

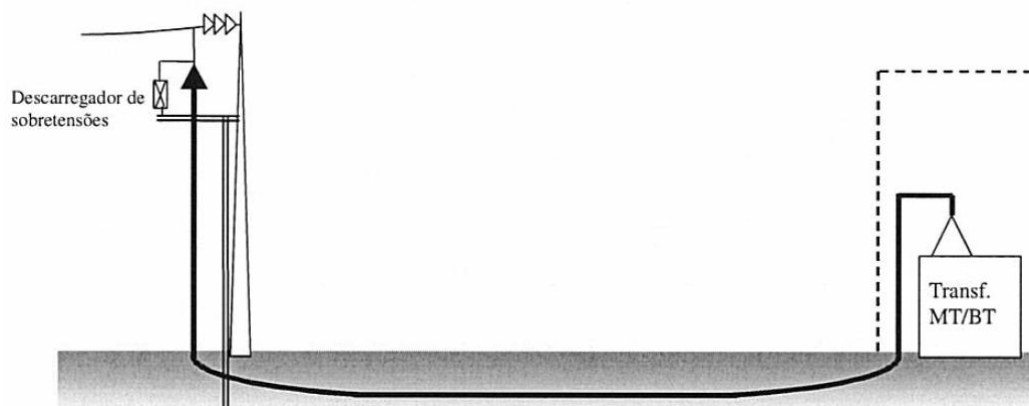


Figura 2.17 - Configuração do posto de transformação de cabina baixa [2]

Segundo a EDP Distribuição S.A., refere-se que 80% dos cabos subterrâneos têm um comprimento inferior a 200m. Para as novas instalações é necessário considerar diversos factores como: o QGBT devesse estar munido de um explosor entre o neutro BT e a terra de protecção local em que a função do explosor vai ser proteger contra sobretensões os equipamentos BT, tal como o isolamento BT do transformador; os contornamentos nos transformadores BT deverão ocorrer nas travessias e não internamente pelo óleo; é desnecessário aplicar descarregadores de sobretensão no lado BT dos transformadores e os descarregadores são necessários em transições aéreo-subterrâneas e em transformadores de potência com um factor de blindagem das linhas de 2/3, para os comprimentos de cabo.

Tabela 2.3 - Soluções normalizadas para postos de transformação de cabina baixa [2]

Tensão nominal, Un (kV)	Comprimento do cabo, Lc (m)	Descarregadores na transição aéreo-subterrânea	Descarregadores no(s) transformador(es)
10 kV e 15 kV	Lc < 50 m	Obrigatório	Não Obrigatório
	Lc ≥ 50m	Obrigatório	Obrigatório
30 kV	Lc < 70 m	Obrigatório	Não Obrigatório
	Lc ≥ 70 m	Obrigatório	Obrigatório

As instalações deverão ser projectadas de modo a que o comprimento do cabo seja o mínimo possível; a blindagem do cabo deverá ser ligada à terra nas duas extremidades. Só apenas em casos pontuais em que há risco de ocorrer uma sobrecarga térmica devido à circulação de corrente nas blindagens é que é aconselhável ligar apenas a extremidade do lado do transformador à terra. Nesta situação o descarregador de sobretensões de blindagem deverá ser ligado na extremidade que se encontra ligada à terra e os comprimentos dos condutores de ligação dos descarregadores deverão ser os mais curtos possíveis.

Para as instalações já existentes de postos de transformação de cabina baixa deverão ser feitas actualizações das configurações da rede. Todos os descarregadores de sobretensão de Carboneto de Silício deverão ser substituídos por descarregadores de Óxido de Zinco, com condutores de ligação curtos; os descarregadores de sobretensão de óxido de zinco deverão ser instalados em transições aéreo-subterrâneas, quando não existem dispositivos de protecção ou equipados com hastes de guarda; as hastes de guarda deverão ser retiradas das travessias dos transformadores sempre que existirem descarregadores de sobretensão de Óxido de Zinco instalados; os QGBT existentes não deverão ser retirados de serviço (quando for instalado um novo QGBT, com níveis de isolamento mais elevados, não é necessário substituir o transformador); e aquando da avaria de um transformador MT/BT ou de um QGBT, apenas o elemento avariado tem de ser substituído [2].

iii. Postos de transformação de cabina alta

Através da análise da Figura 2.18 e Figura 2.19 observa-se o aspecto e o esquema de um posto de transformação de cabina alta. Em particular pode-se observar os diferentes componentes que fazem parte desta instalação.



Figura 2.18 - Posto de transformação de cabina alta

Os transformadores MT/BT são muitas vezes protegidos por hastes de guarda montadas nas travessias MT dos transformadores, assim como através de descarregadores (por vezes com descarregadores de sobretensão de SiC) instalados no exterior ou interior do edifício. Os descarregadores de sobretensão quando são instalados no interior do edifício encontram-se localizados a jusante do seccionador.

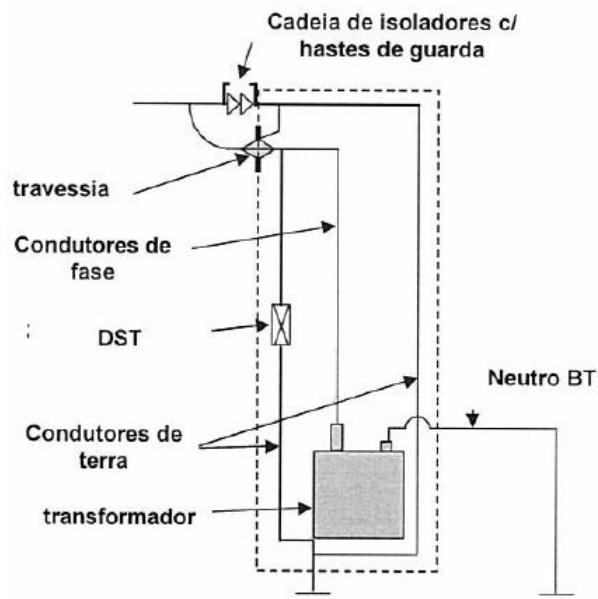


Figura 2.19- Posto de transformação de cabina alta [2]

Este tipo de instalações tem alguns problemas ao nível da coordenação de isolamento:

- As hastes de guarda nas travessias dos transformadores não são aplicadas convenientemente;
- A localização do descarregador não é ideal para proteger o transformador e o passa-muros;
- Os passa-muros feitos de resina epóxida apresentam um elevado nível de disrupção por bandas secas (descargas parciais) levando à deterioração do isolamento e a um número elevado de contornamentos;
- Muitos destes edifícios apresentam muitos outros problemas que afectam o desempenho do equipamento eléctrico, tais como humidade e inundações.

Nos dias de hoje, este tipo de instalações já não é construído, apesar de ainda existirem em grande número, pois no passado eram prática corrente de instalações deste tipo. A intervenção neste tipo de instalações deve ter em conta factores como a normalização existente de postos de transformação MT/BT, tipo de isolador de travessia (passa-muros), estado e idade do equipamento (interruptor, transformador), estado de conservação do edifício e a localização (rural ou urbana). Foram adoptadas soluções para combater eventuais problemas em postos de transformação de cabina alta:

- Abandonar a construção do edifício de cabina alta e substituir por uma nova instalação de posto de transformação. A escolha do tipo de instalação depende da carga expectável do transformador e das condições ambientais. Tipicamente, os postos de transformação aéreos são instalados nas áreas rurais ou semi-rurais, sendo que os postos de transformação de cabina baixa são usualmente instalados em zonas urbanas;
- Instalar no exterior do edifício um conjunto de descarregadores de sobretensão adicionais, próximo dos passa-muros, sendo que os descarregadores instalados no

interior do edifício deverão ser colocadas mais próximas das travessias do transformador. Esta opção é apresentada na

- Figura 2.20. Note-se que os descarregadores instalados nos passa-muros são ligados aos terminais de terra da armação e fixação.

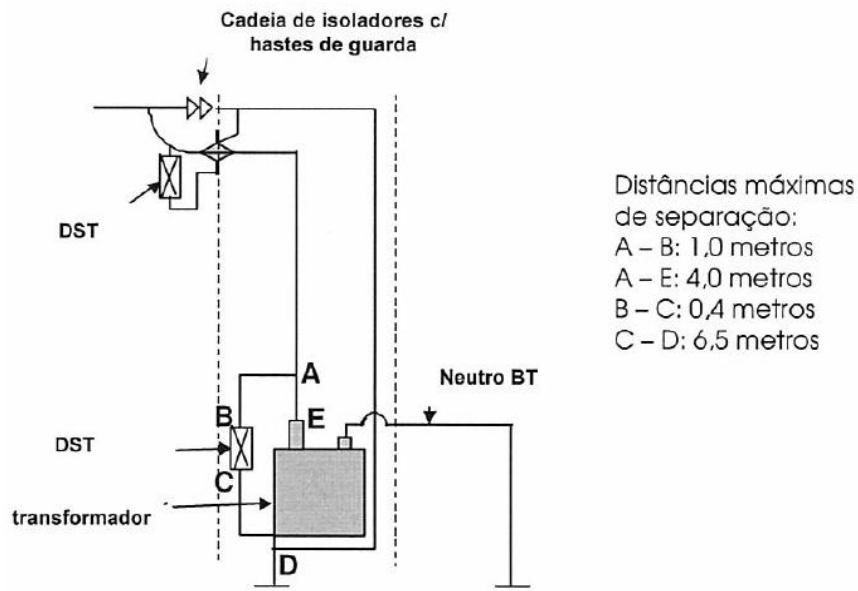


Figura 2.20- Configuração para protecção contra sobretensões [2]

- A instalação é modificada para ficar semelhante aos postos de transformação de cabina baixa. Neste caso as travessias e os condutores de ligação são substituídos por cabos isolados, desde a transição aérea até aos terminais da cela. Neste caso o posto de transformação é remodelado, com a instalação de um bloco de rede em anel de uma só função - combinado interruptor seccionador -fusíveis com ligação por terminações amovíveis (fichas);
- São consideradas três opções para melhorar o desempenho dos passa-muros em resina epóxida:
 - a. Aplicar no local, uma película de borracha de vulcane para melhorar o desempenho do isolador face a contornamentos;
 - b. O mesmo que em a. mas aplicada em estaleiro;
 - c. Substituição dos isoladores de resina epóxida por isoladores de porcelana.

Capítulo 3

Solicitações em caso de Sobretensões

3.1 - Introdução

Sobretensões com origem em descargas atmosféricas têm sido um assunto de interesse e pesquisa, mas o progresso tem sido lento devido à natureza aleatória das descargas e ao longo tempo necessário para obter dados sobre este fenómeno [36]. Para evitar que sejam causados danos nos equipamentos eléctricos das instalações devido às sobretensões a que estes são submetidos, bem como localizar as descargas, quando é economicamente impossível impedi-las, em pontos onde possam causar danos e de forma a não perturbar o serviço, foram tomadas um conjunto de disposições relativas aos isolamentos designados por coordenação de isolamentos. Esta visa a determinação para cada ponto de uma rede eléctrica, do isolamento óptimo tendo em conta as consequências das avarias e as interrupções de serviço. O estudo e determinação do ponto óptimo da coordenação de isolamentos de uma linha eléctrica, pode ser determinada por duas metodologias distintas, através de métodos determinísticos, ou através de métodos probabilísticos. Até muito recentemente, e ainda é numa grande maioria dos casos, os métodos determinísticos são os mais usados, ou seja, ao escolher a maior solicitação do dieléctrico do equipamento usado de um lado e a menor rigidez dieléctrica esperada do equipamento do outro lado, proporcionando assim uma diferença adequada entre os dois, a fim de cobrir erros, factores desconhecidos, e envelhecimento dos equipamentos [35]. Procura-se, com a aplicação destas duas metodologias, encontrar a coordenação de isolamentos mais vantajosa de modo a que as solicitações dieléctricas impostas aos componentes de uma rede, que danificam os respectivos isolamentos ou afectem a continuidade de serviço, seja a mais aceitável dos pontos de vista da economia e da exploração [7].

O desafio é saber se existem isolamentos economicamente viáveis para solicitações como as sobretensões de origem atmosférica. É inevitável a existência de contornamentos e o

problema que se coloca é que eles se verifiquem em pontos onde se podem produzir sem causar danos (isolamentos auto-regeneráveis), protegendo-se outros pontos da rede através da instalação de dispositivos de protecção, tais como explosores e os descarregadores de sobretensão, com a função de limitar as sobretensões que atingem a rede, absorvendo a energia que lhes está associada.

3.2 - Problemas de Isolamento em Redes de Distribuição

O comportamento dos isolantes dos sistemas de protecção dos sistemas eléctricos de energia, quando submetidos a diferentes formas de onda de tensão, depende de numerosos factores relacionados com a sua natureza, bem como a forma sob a qual se apresentam, as condições do meio ambiente. Para diferentes materiais, existe uma relação natural entre os respectivos comportamentos às diversas formas de onda. Deste modo, frequentemente o dimensionamento de um isolante para uma determinada forma de onda garante igualmente o seu correcto comportamento dieléctrico para as outras formas de onda que se podem apresentar. Assim, o comportamento dos isoladores de ar é condicionado essencialmente pela resposta às ondas de manobra e descarga atmosférica, enquanto comportamento dos isoladores sujeitos à acção da chuva e da poluição é determinada pela resposta às ondas de frequência industrial. Nem sempre o comportamento relativo dos isolamentos às diferentes formas de onda é conhecido à partida, nomeadamente no caso de isolamentos compostos em que os defeitos à superfície (forma geométrica, linhas de fuga, estado da superfície, poluição) se combinam com efeitos de volume (espessura e disposição relativa dos materiais isolantes, técnicas de fabrico). Nestas situações, é essencial a realização de ensaios, tão representativos quanto possível, para ajuizar aquele comportamento relativo [7].

Para um determinado material, o comportamento dieléctrico apresenta uma certa desorganização que está relacionada não só com as condições de fabrico das peças isolantes, mas também com todas as solicitações, sofridas anteriormente, tais como tensão, temperatura e humidade. A determinação deste comportamento implica ainda uma determinada incerteza pela imperfeição da reprodutibilidade das condições de execução dos ensaios. Por último, o escorvamento do arco eléctrico é também um fenómeno em que intervêm no processo de selecção de isolamentos, tais como amplitude e forma de onda de solicitação, o estado da rede no instante em que surge a solicitação, a rigidez dieléctrica relativa dos componentes do isolamento e as condições do meio ambiente. Os escorvamentos que ocorrem nos sistemas eléctricos de energia não são fenómenos instantâneos. O atraso com que se verificam os escorvamentos depende do gradiente da frente de onda aplicada, da distância entre eléctrodos e da respectiva forma (campo mais ou menos uniforme) e das características dieléctricas do meio. Em igualdade com as restantes circunstâncias, este atraso aumenta com a distância entre eléctrodos e é mais elevado no ar à pressão atmosférica normal do que nos meios gasosos sob pressão (ar comprimido ou Hexafluoreto de Enxofre (SF₆)). Estes dados são elementos a ter em conta no dimensionamento dos isolamentos quer directamente, por exemplo, na regulação das distâncias de escorvamento no ar, quer indirectamente considerando este fenómeno do atraso do escorvamento na margem de segurança. A polaridade da onda aplicada tem influência no comportamento dieléctrico de um determinado isolante. Para os isolamentos de ar, a tensão de onda de manobra ou de

onda de choque atmosférico (raio atmosférico) suportável é menor para as ondas positivas do que para as ondas negativas [7].

Qualquer corpo que se comporta habitualmente como isolante, isto é, qualquer dielétrico, não é capaz de resistir à solitação que resulta da aplicação de uma tensão de amplitude sucessivamente crescente. A partir de um certo valor da solitação, produz-se uma ruptura no isolamento o que se traduz pelo estabelecimento de um caminho condutor entre os pontos separados por esse isolante. Os mecanismos de ruptura dielétrica são extremamente complexos, dependendo da forma de onda de tensão aplicada (especialmente da velocidade de crescimentos e da amplitude), bem como do estado físico (sólido, líquido, gasoso) do isolante. Essencialmente, consideram-se três tipos de ruptura:

- i. Escorvamento por arco eléctrico quando a ruptura se verifica no meio gasoso, que separa duas peças metálicas, por exemplo num explosor;
- ii. Contornamento quando a ruptura se produz na superfície de separação entre um isolante sólido e um gás, por exemplo ao longo da superfície de um isolador de linha aérea;
- iii. Perfuração, quando a ruptura ocorre no seio da massa de um isolante sólido, líquido ou composto.

Como referido em 2.1. em linhas aéreas de distribuição de energia eléctrica ocorrem diferentes tipos de sobretensões. A Figura 3.1 mostra como evolui a rigidez dos isolamentos, aquando da ocorrência de uma sobretensão temporária.

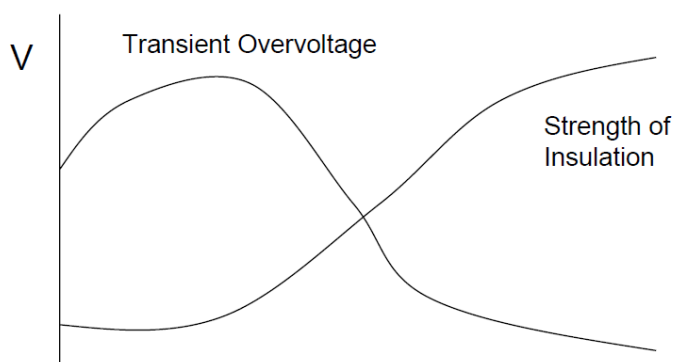


Figura 3.1 - Variação da rigidez de isolamento quando ocorre uma sobretensão temporária [14]

3.3 - Métodos de Coordenação de Isolamento em Redes de Distribuição

Os problemas de Coordenação de Isolamento em Redes de Distribuição, podem ser abordados, em casos de estudo de duas maneiras, pelos métodos convencionais ou determinísticos e por métodos estatísticos ou probabilísticos [13,14].

a) Modelos Determinísticos

Os métodos convencionais ou determinísticos, para o estudo da coordenação de isolamentos, baseiam-se nos conceitos convencionais de sobretensão máxima e de tensão de

ensaio ao choque de manobra ou ao choque atmosférico. Assim, o isolamento é dimensionado de maneira a assegurar uma margem considerada suficiente entre a sobretensão máxima e a tensão suportável por esse mesmo isolamento. Admite-se que esta margem cobre as incertezas da avaliação da sobretensão máxima e da tensão suportável, pelo que não se define qualquer risco de cedência do isolamento. Como base para aplicação dos métodos convencionais definem-se as seguintes características [7,13]:

- i. Sobretensão máxima convencional, é a sobretensão de manobra ou atmosférica cujo valor é considerado, por convenção, como a sobretensão máxima a considerar para o dimensionamento de um isolamento;
- ii. Tensão convencional de ensaio ao choque, é o valor de crista de um impulso de manobra ou atmosférico para o qual o isolamento não deve ser sede de nenhuma descarga disruptiva quando submetido a um número de aplicações deste impulso em condições especificadas;
- iii. Factor de segurança convencional, é a razão entre uma tensão convencional de ensaio ao choque e a sobretensão máxima convencional correspondente.

b) Modelos Probabilísticos

Nos métodos estatísticos ou probabilísticos, ao contrário do que sucede nos métodos convencionais, admite-se que se podem produzir cedências dos isolamentos e procura-se avaliar quantitativamente o risco de cedência para utilizar como índice de segurança no cálculo dos isolamentos. Quando são conhecidas as distribuições estatísticas das sobretensões e das tensões suportáveis por um isolamento pode deduzir-se o risco de cedência e exprimi-lo numericamente [7,14].

Qualquer variável aleatória, como o valor de crista de uma sobretensão ou a tensão para a qual se verifica a descarga num isolamento, pode ser expressa pela curva que indica a sua densidade de probabilidade p ou pela curva que indica a sua probabilidade acumulada P que é a curva integral da primeira. Supondo que a distribuição dos valores das sobretensões devidas ao fenómeno particular que se considera é definida pela densidade de probabilidade $p_0(U)$, então, a probabilidade de que surja uma sobretensão entre U' e $U'+dU$ é $p_0(U')dU$, como se pode ver no gráfico seguinte [7]:

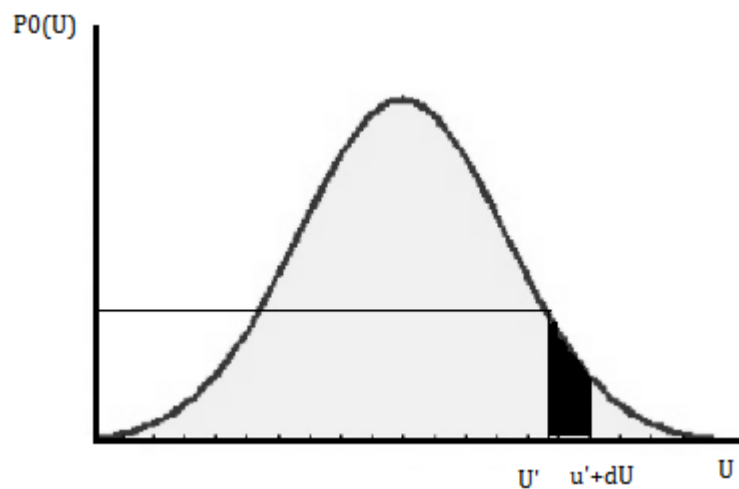


Figura 3.2 - Curva da densidade de Probabilidade P_0 [7]

O comportamento dielétrico de um dado isolamento é definido pela probabilidade acumulada $P_T(U)$, representada na Figura 3.3, de descarga desse isolamento quando sujeito a uma sobretensão de valor U [7].

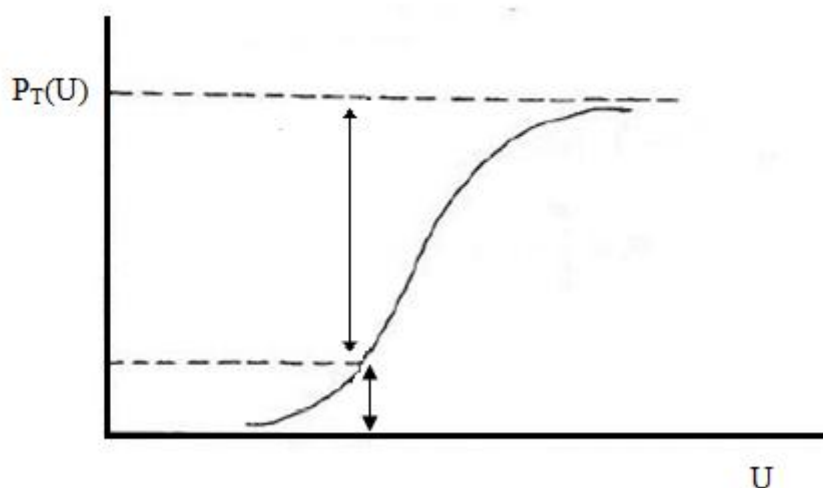


Figura 3.3 - Curva da probabilidade Acumulada $P_T(U)$ [7]

A densidade de probabilidade de cedência do isolamento pelo aparecimento de uma sobretensão de valor U' é, dada pelo produto da densidade de probabilidade de aparecimento da sobretensão de valor U' com a probabilidade de cedência do isolamento quando solicitado por essa sobretensão.

$$dR = p_0(U') \cdot P_T(U) dU \quad (3.1)$$

A probabilidade de se verificar a cedência do isolamento para um valor U tomado ao acaso, isto é, o risco de cedência nas condições consideradas, é dada pela Equação (3.2):

$$R = \int_0^{\infty} p_0(U') \cdot P_T(U) dU \quad (3.2)$$

Onde:

- R é o risco de cedência do isolamento;
- $p_0(U')$ é a função densidade de probabilidade de cedência do isolamento;
- $P_T(U)$ é a função probabilidade de cedência do isolamento;
- U - Valor da sobretensão.

O risco de cedência do isolamento pode ser representado graficamente, como na Figura 3.4:

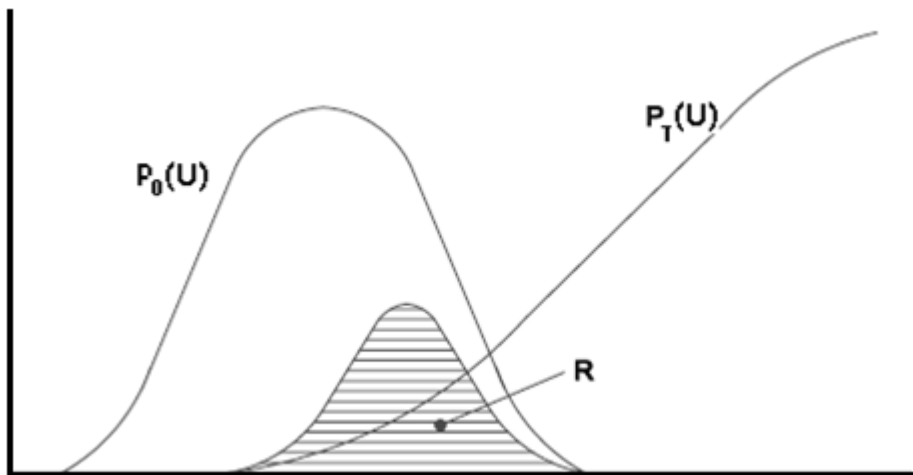


Figura 3.4 - Curvas do risco de cedência do isolamento R , da função densidade de probabilidade $P_0(U)$ e da função probabilidade $P_T(U)$ [8]

O risco de cedência possui um sentido físico preciso, ao contrário do que sucede com o factor de segurança, permitindo os métodos estatísticos coordenar os níveis de segurança de diversas partes da rede de acordo com as consequências de uma cedência. Por outro lado, é possível efectuar análises de sensibilidade, avaliando por exemplo a influência de uma mudança na severidade das sobretensões ou do comportamento do isolamento sobre a probabilidade de cedência. Os métodos estatísticos permitem, assim, tomar decisões em bases racionais.

Nos métodos estatísticos exige-se que as sobretensões e o comportamento dieléctrico dos isolamentos sejam descritos pelas suas respectivas distribuições estatísticas. O isolamento é dimensionado de tal forma que a probabilidade de cedência seja inferior ou igual a um valor fixado de antemão e que caracteriza o nível de segurança necessário.

Analisando a Figura 3.4, verifica-se que uma modificação do nível de isolamento implica uma translação da curva da probabilidade de descarga do isolamento $P_T(U)$ ao longo do eixo das tensões que tem como consequência uma modificação da área que representa o risco de cedência R quando a tensão tem um valor aleatório. Na aplicação dos métodos estatísticos podem ser necessárias várias tentativas sucessivas de cálculos e avaliações do risco de cedência até se encontrar uma solução que corresponda ao risco prefixado.

A Equação (3.2) apresentada para o cálculo do risco de cedência pode aplicar-se ao caso de um isolamento protegido por explosores ou por descarregadores de sobretensão, desde que $P_T(U)$ represente a probabilidade de cedência do isolamento em presença do aparelho de protecção. Se o atraso do escorvamento do aparelho de protecção puder ser considerado sempre inferior ao do isolamento a proteger, um método igualmente válido e mais simples consiste em utilizar ainda a mesma expressão mas tomando para $p_0(U)$ a densidade de probabilidade de sobretensões modificada pelo aparelho de protecção [8].

Modelos Estatísticos de Monte Carlo

Este termo foi empregado primeiramente pelos cientistas que desenvolveram a bomba atômica em 1942, já a denominação de “método” provém da cidade de Monte Carlo, no principado de Mônaco, famosa pelos seus casinos e jogos de roleta, que são dispositivos que produzem números aleatórios. O método de Monte Carlo tende a ser mais eficiente que outros métodos numéricos quando os processos envolvidos são estocásticos, pois o tempo usado pela simulação de Monte Carlo cresce de forma praticamente linear com o número de variáveis, enquanto que, noutros métodos o tempo tende a crescer exponencialmente em relação ao número de variáveis [17].

A abordagem probabilística do método de Monte Carlo aplicada para análise da frequência de descargas atmosféricas em linhas de distribuição tem permitido estudos teóricos para verificar como os parâmetros da aplicação do método são influenciados pelas variações do terreno, presença de árvores e estruturas urbanas em torno da rota da linha, topologia do sistema, equipamentos instalados, sistemas de dissipação de energia e blindagem, entre outros [37]. Para contornar todas estas dificuldades são necessárias algumas atitudes racionais para atingir um nível de simplificação no processo sem que os resultados sejam afastados dos resultados práticos, mantendo-se dentro de uma margem de erro definida como segura. Isto implica o desenvolvimento de modelos que atinjam um equilíbrio entre a complexidade da modelização e a aproximação dos resultados através do Método de Monte Carlo [38]. A simulação de Monte Carlo é uma ferramenta útil na avaliação de fenómenos que se podem caracterizar por um comportamento probabilístico. A ideia por detrás do modelo é conseguir formar uma amostra significativa do comportamento de um sistema pelo sorteio de situações e respectiva análise, a fim de se avaliar o valor médio dos resultados ou outros parâmetros e daí deduzir o comportamento global do sistema a partir do comportamento da amostra [16].

Para lidar com as incertezas inerentes à análise dos efeitos das descargas atmosféricas em sistemas de distribuição em média tensão é necessário que se utilize uma análise probabilística, através de uma técnica analítica ou uma simulação estocástica. Porém, uma técnica analítica torna-se muito complexa e de difícil emprego pela alta quantidade de incertezas envolvidas no processo de descarga. Os Métodos de Monte Carlo são uma classe de algoritmos computacionais baseados na repetição de amostragens aleatórias para análise computacional dos resultados e tendem a ser usados quando é impraticável ou impossível a implementação de um resultado exacto com um algoritmo determinístico [17].

Os Métodos de Monte Carlo são técnicas usadas para obter informações sobre o desempenho futuro de sistemas ou processos baseados na amostragem estatística (funções de distribuição) do seu desempenho no passado usando números aleatórios. São especialmente úteis para estudar sistemas com um grande número de graus de liberdade, e também para modelizar fenómenos com incerteza significativa nas entradas, tais como o cálculo do risco. Consistem em construir uma amostra de estados, ou cenários, do sistema para se obter estimativas de índices probabilísticos. Estas amostras dos estados do sistema são obtidas através da combinação de estados, ou cenários, individuais.

No presente trabalho, foram utilizados para definir as características e intensidade de corrente da descarga atmosférica. Através da repetição cíclica destas simulações são obtidos diversos cenários no que se referem a diferentes descargas.

c) Vantagens e Desvantagens de Cada um dos métodos

Nos métodos convencionais a coordenação de isolamentos é realizada com a pretensão de não ocorrer nunca qualquer cedência dieléctrica dos mesmos. Pelo contrário, nos métodos estatísticos admite-se à partida um determinado risco de cedência dos isolamentos, tendo-se em linha de conta a probabilidade de ocorrência das sobretensões, bem como a probabilidade de cedência (ou de resistência) dos isolamentos quando submetidos a determinadas sobretensões [8,13].

Os métodos probabilísticos oferecem resultados mais vantajosos a nível económico, apesar de apresentar resultados mais desfavoráveis do ponto de vista técnico, no entanto, podem obter-se soluções através dos métodos probabilísticos que apresentem um risco baixo para a rede eléctrica e para a qualidade de serviço, com custos muito mais baixos que as soluções apresentadas pelos métodos analíticos [35]. Na prática os métodos probabilísticos apresentam soluções com algum risco de falha de isolamentos, no entanto esse risco é controlado; enquanto que os métodos analíticos apresentam resultados mais fiáveis do ponto de vista de isolamento mas com custos mais elevados (sobredimensionamento), assim, regra geral, o risco dado pelos métodos probabilísticos é aceitável e a diferença de custos compensa os riscos [13]. No tema da abordagem probabilística para a concepção e coordenação de isolamento há muito mais trabalho teórico a fazer do que experimental [35].

Esta abordagem não é linear, pois há casos excepcionais em que pode ser necessário um isolamento rigoroso e sem falhas, pelo que nestes casos os resultados apresentados analiticamente podem ser de uso obrigatório.

Capítulo 4

Descargas Atmosféricas - Caracterização

4.1 - Introdução

Grande parte do dimensionamento de um sistema eléctrico de energia passa por considerações a ter em caso de sobretensões, nas quais as descargas atmosféricas estão inseridas. Torna-se por isso fundamental conhecer ao pormenor todas as características das descargas atmosféricas. Características que possam ter implicações destrutivas nas linhas aéreas de distribuição e sistemas de protecção (mais concretamente descarregadores de sobretensão, que vão ser abordados no presente trabalho).

Ao longo deste capítulo será feita uma abordagem e descrição das características das descargas atmosféricas. Serão estudadas as descargas atmosféricas mais a nível técnico e não tanto como fenómeno natural. Também será abordada a maneira de parametrizar e representar uma descarga atmosférica, para poder ser aplicada em estudos de simulação.

4.2 - Caracterização das descargas atmosféricas

O valor máximo instantâneo da intensidade da corrente é considerado o parâmetro mais importante na caracterização de descargas atmosféricas. No entanto, o estudo rigoroso e sistemático de descargas atmosféricas deverá ter por base, para além da amplitude, a probabilidade de ocorrência, o número de descargas secundárias e a forma de onda da corrente, nomeadamente a taxa de crescimento associada à frente de onda [19]. Por esta razão, é essencial determinar o número médio de descargas atmosféricas esperado num determinado local ou equipamento num determinado período de tempo (ou, de forma equivalente, a frequência de ocorrência), o valor máximo esperado para a corrente de descarga (amplitude), a polaridade e os tempos que lhes estão associados (designados por tempo de frente e tempo de cauda, normalmente). Após a apreciação e análise destas

características relativas a descargas atmosféricas, torna-se muito mais fácil a determinação da intensidade de corrente e da capacidade de dissipação de energia para um dispositivo de protecção contra este tipo de sobretensões que são obtidas através da análise do risco. Esta análise é baseada em três grupos de parâmetros [34]:

- i. Parâmetros ambientais: frequência das tempestades, representada pelo número de raios por ano e por quilómetro quadrado (N_G);
- ii. Parâmetros de instalação e equipamento: existência de hastes de descarga, distribuição de energia à instalação (linhas aéreas ou subterrâneas), posição do equipamento na instalação;
- iii. Parâmetros de segurança: custo de substituição e de indisponibilidade do equipamento a ser protegido, risco para o ambiente ou para a vida humana (fábricas petroquímicas, estádios, etc).

4.2.1 - Frequência de Ocorrência

Um dos indicadores para caracterizar o nível de exposição de uma região em relação a descargas atmosféricas é o número médio de dias por ano em que, numa região mesma região, se ouve trovejar. Este indicador, designado de nível ceráunico (N_C), embora pouco preciso, é um indicador relevante por estar disponível na maior parte dos organismos de registo de fenómenos meteorológicos, sob a forma de mapas de curvas isoceráunicas construídos e actualizados ao longo de décadas. Observando a Figura 4.1 pode-se analisar um mapa isoceráunico da superfície terrestre.

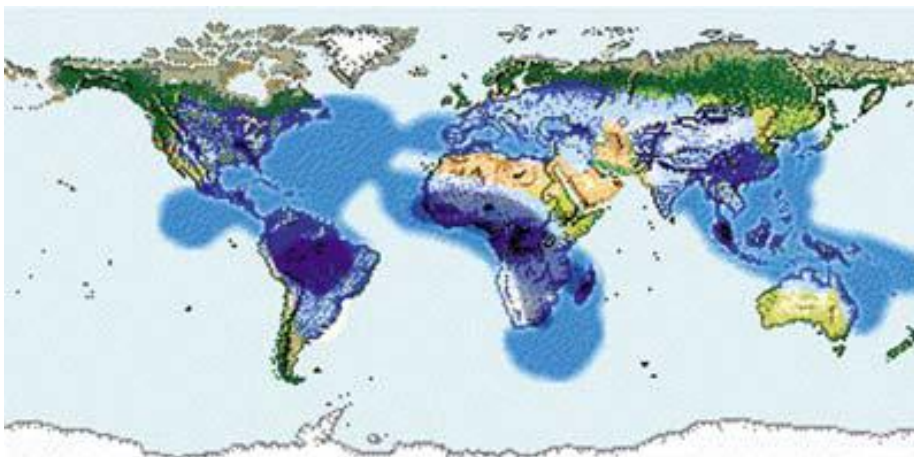


Figura 4.1- Mapa ceráunico [34]

As áreas a azul escuro cobrem regiões onde o nível ceráunico é de 80 a 180 dias/ano. As áreas a azul claro cobrem regiões com nível ceráunico de 20 a 80 dias/ano [34]. Segundo os dados do Instituto de Meteorologia, o valor máximo do índice ceráunico para Portugal continental é de 20 dias/ano, coincidindo com o valor médio registado para a Península Ibérica na sua globalidade [18]. Através dos registos efectuados pode determinar-se o número médio de descargas por km^2 e por ano numa determinada zona. Este índice, designado por densidade de descargas para o solo (N_G), é um indicador muito mais preciso do que o nível

ceráunico muito embora, face à não existência de dados em quantidade estatisticamente significativa em muitos pontos da superfície terrestre, este parâmetro continua a ser estimado com base no nível ceráunico, através de relações empíricas mais ou menos complexas. Grande parte das relações empíricas referidas são semelhantes à expressão (4.1), sendo a e b parâmetros variáveis com a localização geográfica e, para uma localização geográfica particular, variam de ano para ano e com as estações do ano; essas variações são mais evidentes quando feita a comparação entre Verão e Inverno [21].

$$N_G = a \cdot (N_C)^b \quad (4.1)$$

em que

N_G é a densidade de descargas para o solo (descargas/km²);
 N_C é o número médio de dias por ano em que, numa mesma região, se ouve trovejar;
 a e b são parâmetros variáveis com a localização geográfica (ano, estações, etc).

Na Tabela 4.1 encontram-se algumas propostas de alguns autores para os parâmetros variáveis a e b :

Tabela 4.1 - Índices a e b (propostas de alguns autores) [19,22]

	a	b
Marcherras	0,01	1,4
Anderson e Eriksson	0,023	1,3
Eriksson	0,04	1,25

Quando o objectivo é a análise do desempenho de linhas aéreas de distribuição de energia relativamente a descargas atmosféricas directas, nomeadamente para a determinação de índices de qualidade de serviço, é usual contabilizar o número médio de descargas por cada 100 km de linha e por ano (N_D), calculado pela expressão (4.2).

$$N_D = N_G(d + 2 * 16,3 h^{0,61}) \cdot 10^{-1} \quad (4.2)$$

em que

N_G é a densidade de descargas para o solo (descargas/km²);
 N_D é o número médio de descargas por cada 100 km de linha e por ano;
 h é a altura média efectiva da linha (m);
 d é a distância entre condutores extremos (m).

Esta estimativa não será válida se existirem estruturas de elevada altura na vizinhança da linha, uma vez que estas podem funcionar como protecção da referida linha, como referido

na Capítulo 2, e por esse motivo, transformar potenciais descargas directas em descargas indirectas, originando sobretensões induzidas [32].

4.2.2 - Polaridade e Sentido da Descarga

A classificação das descargas é feita em função do sentido da corrente principal, quando as cargas negativas da nuvem são descarregadas para o solo são descargas negativas, e quando são as cargas positivas a serem descarregadas dizem-se positivas [33]. Para Portugal, inserido numa região temperada, verifica-se que 90% das descargas atmosféricas são do tipo negativo descendente [7,32]. Observações de campo revelam ainda que cerca de 55% dos raios são constituídos por mais do que uma descarga, dos quais 90% não tem mais do que oito descargas. Embora para uma probabilidade acumulada de 50% se obtenha o valor de 2,3 descargas por raio, de facto em média ocorrem 3 descargas por raio [7,19,23].

4.2.3 - Amplitude e Forma de Onda

Nos últimos anos, a realização de estudos e registos de dados de localização e medição, associados a um maior investimento em estudos práticos sobre descargas atmosféricas, têm originado novas contribuições para a caracterização das ondas resultantes de descargas directas sobre os apoios e sobre as linhas [25,26]. Pela dificuldade associada ao registo de descargas atmosféricas sobre linhas de distribuição de energia, a caracterização estatística das ondas de descarga atmosférica continua a ser efectuada com auxílio de dados recolhidos essencialmente em estruturas isoladas e de elevada altura. As funções densidade de probabilidade assim obtidas poderão, contudo, não representar a real distribuição das grandezas para descargas para o solo ou sobre as linhas aéreas. Os valores de amplitude de corrente utilizados para a definição das funções de probabilidade acumuladas poderão não ser muito rigorosos, uma vez que o valor máximo registado é afectado pelas sucessivas reflexões da onda na base e no topo do objecto atingido (apoio) [27]. A distribuição estatística da amplitude das descargas atmosféricas pode representar-se sob a forma de um gráfico de probabilidade acumulada semelhante ao apresentado na Figura 4.2, proposto originalmente por Popolansky [29] e modificado posteriormente por análise de outros conjuntos de dados [30,31]. De forma aproximada, a probabilidade de a amplitude de corrente ser superior a um determinado valor I_p pode ser determinada a partir da equação (4.3).

$$p(I \geq I_p) = \left[1 + \left(\frac{I_p}{31} \right)^{2.6} \right]^{-1} \quad (4.3)$$

em que:

I_p é a corrente de pico da descarga atmosférica verificada (A);

I é a amplitude de corrente da descarga atmosférica (A).

Da análise da Figura 4.2, pode concluir-se que 95% das descargas têm um valor de pico superior a 10kA, 50% das descargas têm um valor de pico da corrente superior a 31kA, e que a percentagem de descargas com amplitude superior a 100kA é de apenas 4,54%.

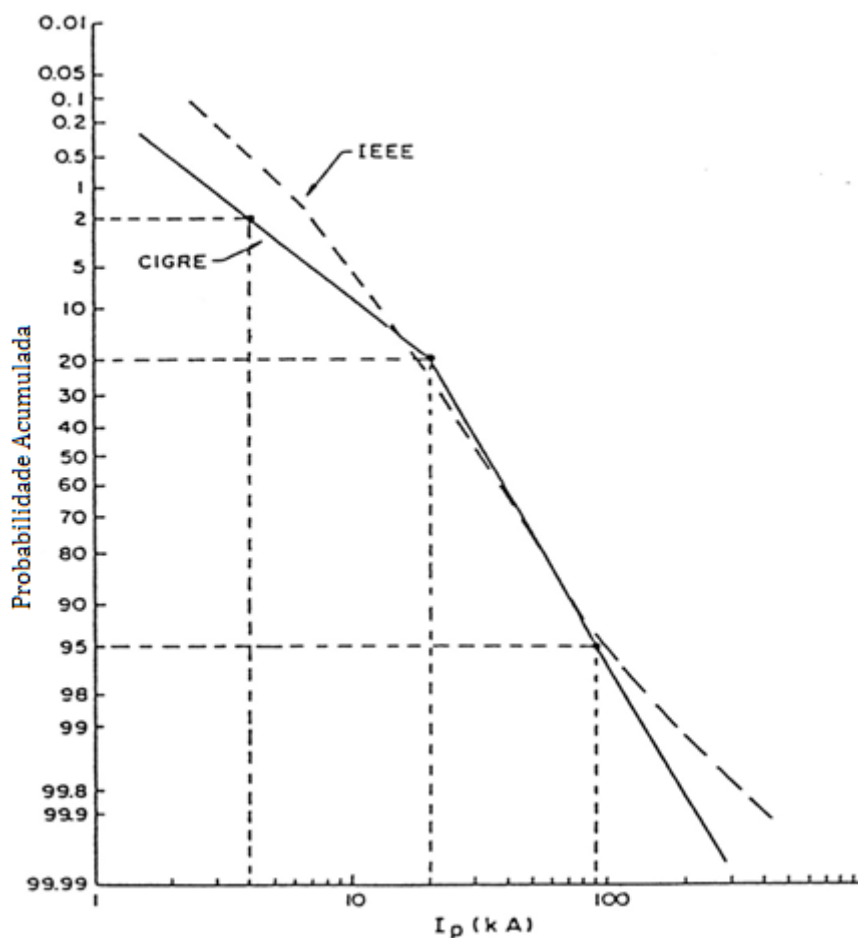


Figura 4.2 - Gráfico de frequência acumulada relativo às amplitudes de corrente [5]

Na Figura 4.3 e Figura 4.4 mostram-se duas formas de onda de descarga negativas com amplitudes (do anglo-saxónico “Peak”) de -139kA e -122.6kA , respectivamente, às quais correspondem tempos de frente (T_f) de $10,5\mu\text{s}$ e $6,5\mu\text{s}$, enquanto na Figura 4.5 se apresenta a forma de onda obtida por sobreposição de um conjunto alargado de curvas relativas a descargas negativas, após um processo normalização da amplitude [25].

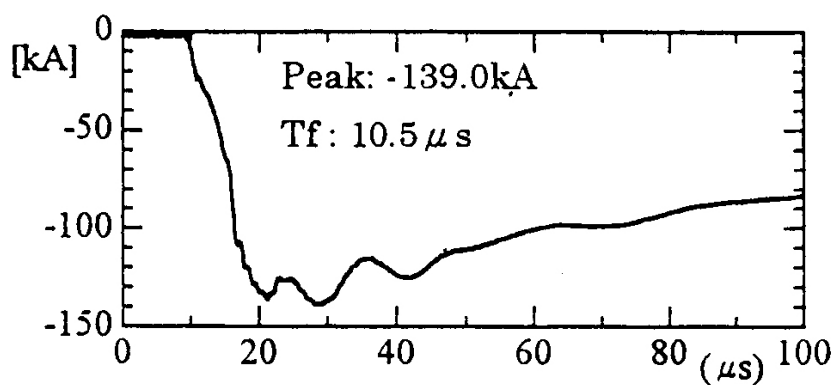


Figura 4.3 - Onda de descarga com amplitude -139kA e tempo de frente igual a $10,5\mu\text{s}$

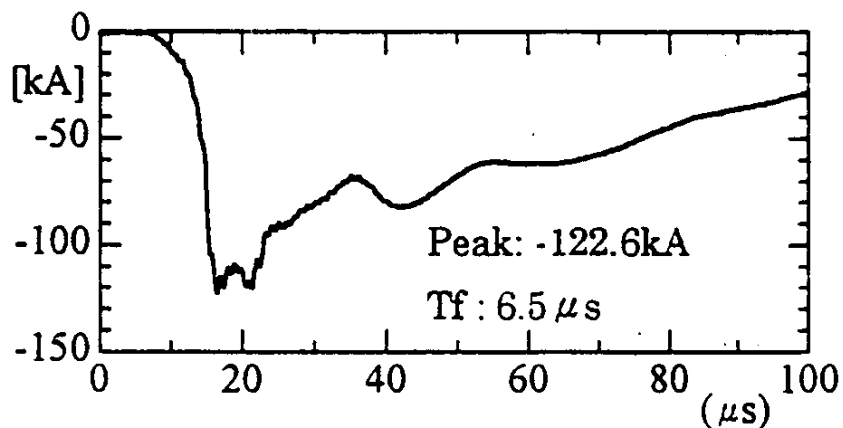


Figura 4.4 - Onda de descarga com amplitude -122,6kA e tempo de frente igual a 6,5μs

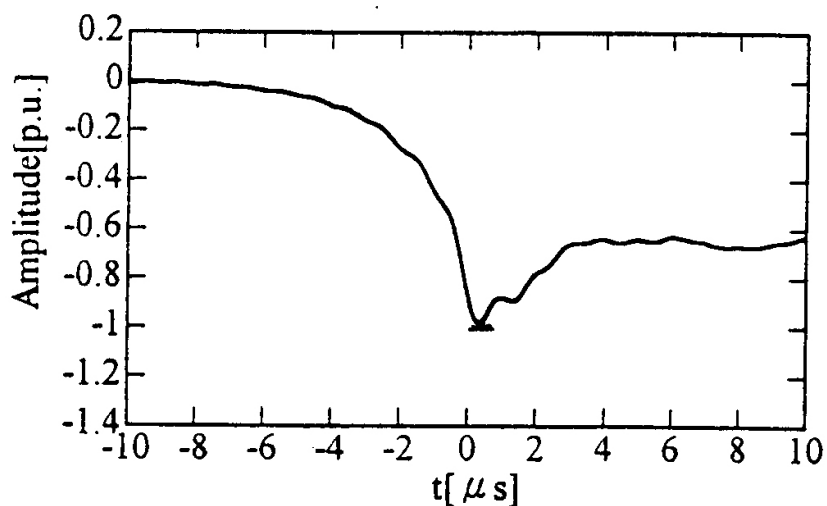


Figura 4.5 - Onda cônica obtida por normalização dum conjunto de ondas de descarga de polaridade negativa

A análise da Figura 4.5 permite identificar uma onda com frente cônica, com valor máximo do gradiente próximo do instante correspondente ao máximo de amplitude. Pode ainda identificar-se uma primeira fase, em que o crescimento da corrente é lento, à qual se segue uma zona de crescimento acentuado com a duração de apenas alguns micro-segundos (μs), conduzindo ao valor máximo de amplitude (designado por crista ou pico da onda). A este instante segue-se uma zona de diminuição de amplitude, designada por cauda da onda, com uma duração da ordem da centena de micro-segundos (μs). O tempo decorrido desde o instante inicial até ao valor máximo de amplitude é designado por tempo de frente ou de crista, sendo o instante em que, na fase de decrescimento da onda (cauda da onda), se atinge 50% do valor de pico, designado por tempo de cauda ou de meia-onda. Estes tempos, juntamente com a amplitude, são usados normalmente para caracterizar as diversas ondas de descarga. As descargas negativas oferecem uma enorme variedade de combinações decorrentes com amplitudes e durações diversas, apresentando frentes de onda bastante

irregulares com duração de 10 a 20 μ s. As descargas positivas são normalmente constituídas por uma única descarga, de duração compreendida entre 100 e 200 μ s, com uma frente de onda de 20 a 50 μ s e uma amplitude de corrente que pode atingir valores superiores a 100 kA [28]. As descargas secundárias originam formas de onda com frentes de menor duração, com menor amplitude e com caudas bastante mais regulares.

4.2.4 - Corrente de Descarga (forma de onda)

Normalmente, uma descarga atmosférica é modelizada por uma fonte de corrente com forma de onda, polaridade e amplitude adequadas considerando a colocação de uma resistência de algumas centenas de Ohms em paralelo com a fonte de corrente para simular a influência da impedância do canal de descarga. Quanto à forma de onda, deverá ser adoptada uma aproximação por uma curva que permita a representação das principais características da corrente de descarga, nomeadamente as características de concavidade da frente de onda e derivada nula na origem:

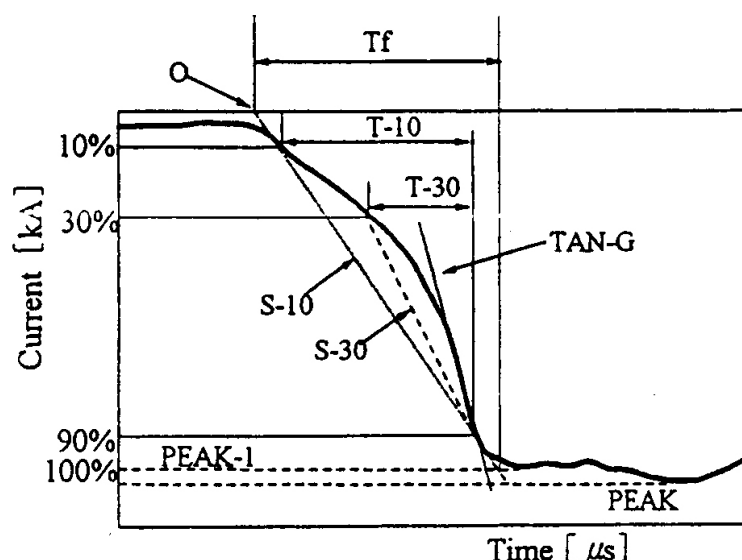


Figura 4.6 - Forma de onda cônica sugerida pela CIGRE

A caracterização da forma de onda da Figura 4.6 é feita pela definição de:

- Pico da forma de onda (*PEAK-1*) e do valor máximo registado (*PEAK*);
- Tempo decorrido entre 10% e 90% do valor máximo (*T-10*);
- Tempo decorrido entre 30% e 90% do valor máximo (*T-30*);
- Gradientes médios nesses mesmos intervalos de tempo (*S-10* e *S-30*, respectivamente);
- Gradiente máximo na frente de onda (*TAN-G*).

Por sua vez, o tempo de frente (T_f) é calculado com base em $T-30$ e igual a $(T-30)/0,6$. A cada um dos parâmetros identificados pode associar-se uma distribuição de frequência de tipo *log-normal*. Para distribuições estatísticas deste tipo, a função densidade de probabilidade para um parâmetro particular x é descrita pela Equação (4.4):

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \beta x} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln\left(\frac{x}{M}\right)}{\beta} \right)^2} \quad (4.4)$$

em que

x é o parâmetro em análise;

M é o valor médio do parâmetro em análise;

β é o desvio padrão logarítmico (base e).

Para uma função densidade de probabilidade deste tipo, o valor esperado (μ) do parâmetro x é calculado por (4.5).

$$\mu = M \cdot e^{\frac{\beta^2}{2}} \quad (4.5)$$

μ é o valor esperado do parâmetro x ;

M é o valor médio do parâmetro em análise;

β é o desvio padrão logarítmico (base e).

4.3 - Descargas Atmosféricas em Linhas Aéreas de Distribuição de Energia Eléctrica

As descargas atmosféricas, ao atingirem uma linha aérea de distribuição de energia eléctrica, originam ondas de tensão e corrente que se propagam ao longo dessa mesma linha. Estas ondas resultam de regimes transitórios que se sobrepõem ao regime permanente a 50Hz, pondo em perigo equipamentos e a qualidade de serviço do abastecimento público de energia eléctrica.

4.3.1 - Geradores de Choque

Uma descarga atmosférica gera uma onda de corrente precedida de uma onda de choque de tensão que, em simulações são difíceis de gerar devido à acção da descarga atmosférica, cuja forma depende das características da descarga. Representa-se esta sobretensão, nos ensaios laboratoriais, por ondas de choque ou ondas de impulso de tensão de forma bi-exponencial correspondendo a imagem da Figura 4.7 [20]:

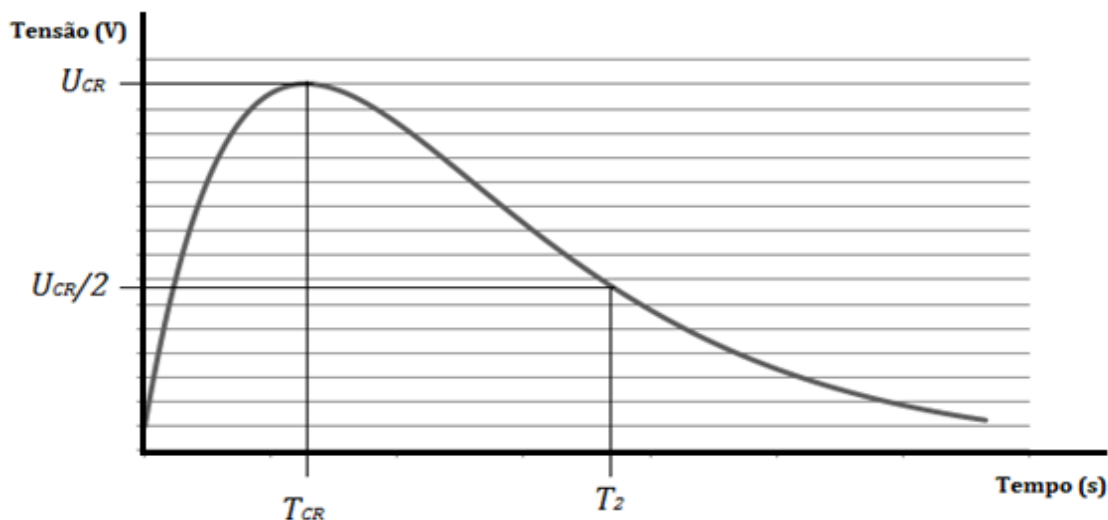


Figura 4.7 - Onda de choque

Os parâmetros característicos deste tipo de onda, como já foi referido anteriormente neste capítulo, são:

- (U_{CR}) Tensão de crista (valor máximo);
- (T_{CR}) Duração de frente (duração até atingir U_{CR});
- (T_2) Duração até meia amplitude;
- (T_1) Duração convencional de frente.

O tempo convencional da frente pode ser obtido da seguinte forma:

$$T_1 = 1,67(T_{90} - T_{30}) \quad (4.6)$$

Em que T_{90} e T_{30} são, respectivamente os tempos decorridos desde a origem até ao instante em que a onda atinge 90% e 30% do valor de crista. A expressão da onda bi-exponencial é caracterizada por:

$$u(t) = k \cdot U_{CR} \cdot \left(e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \quad (4.7)$$

em que:

- τ_1 é a duração da cauda da onda;
- τ_2 é a duração da frente de onda;
- k é a constante de compensação da diferença das duas exponenciais.

Uma vez que a modelização da descarga atmosférica no software PSCAD/EMTDC®, que irá ser abordada durante o trabalho, não necessita dos valores característicos do circuito, é apenas necessário calcular a expressão da onda bi-exponencial, visto que são conhecidas as

características da onda (tensão de crista e tempos convencionais de frente e de cauda disponíveis no Anexo 2) com o intuito de obter os parâmetros característicos do circuito.

4.3.2 - Propagação de sobretensões

As descargas directas, com maior probabilidade de ocorrer em zonas rurais ou urbanas de baixa densidade, onde a presença de estruturas elevadas é significativamente menor (torres, prédios, construções altas, árvores) provocam efeitos piores para os sistemas eléctricos de energia, pois, provocam a falha dieléctrica dos equipamentos e consequentes danos materiais. Isto deve-se ao facto das descargas directas provocarem sobretensões elevadas, na ordem das dezenas de mega Volt. Uma maneira rápida e prática para o cálculo da solicitação ao isolamento de um sistema, aquando da incidência de uma descarga directa, pode ser facilmente obtida a partir da intensidade de corrente da descarga e da impedância do sistema. Como a corrente se divide em duas, segundo o Método das Ondas Móveis, no ponto de impacto, gerando duas ondas móveis de sobretensão que se afastam do ponto de incidência, utilizamos a Equação (4.8) para este cálculo aproximado da sobretensão [38]:

$$V = \frac{I}{2} \cdot Z \quad (4.8)$$

em que

V é o valor da sobretensão gerada pela descarga atmosférica (V);

I é a intensidade da corrente da descarga directa (A);

Z é a impedância do sistema no ponto de incidência da descarga (Ω).

A título exemplificativo, no caso de uma descarga da ordem de 30kA atingindo directamente uma rede de distribuição e assumindo uma impedância do sistema na ordem de 600 Ω , teríamos uma sobretensão de 9MV, com uma frente de onda de alguns micro segundos, valores estes muito superiores à capacidade dos sistemas de distribuição de energia eléctrica nacionais. Contudo esta equação somente apresenta uma primeira aproximação da sobretensão desencadeada na rede, pois o fenómeno das ondas móveis, que será descrito em seguida, estabelecido vai provocar a atenuação e distorção da mesma, causado pela impedância da rede. Assim também como em qualquer ponto onde ocorra uma falha dieléctrica dos isoladores, a presença de equipamentos, os pontos de ligação do neutro à terra, entre outras descontinuidades na linha vão provocar uma maior atenuação, com refacção e reflexão destas ondas [38].

Método das Ondas Móveis

Se uma rede for atingida directamente em seus condutores por uma descarga atmosférica é originada uma corrente que irá circular ao longo da linha em ambos os sentidos, podendo provocar arcos, danos nos isoladores e até mesmo destruir postes, até que toda a sua energia seja gasta [17]. A tensão $u(x, t)$ e a intensidade $i(x, t)$ geradas pela incidência da descarga atmosférica ao longo de uma linha de distribuição de energia correspondente a um ponto de

abscissa x , contada a partir da extremidade de emissão, e um instante t , satisfazem ao seguinte esquema de equações:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} = -ri - l \frac{\partial i}{\partial t} \\ \frac{\partial i}{\partial x} = -gu - c \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases} \quad (4.9)$$

Analisando as equações, é possível concluir então que a tensão e a corrente se decompõem em dois sistemas de ondas com a mesma constante de propagação, dada pela seguinte equação:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (4.10)$$

em que

- α determina a atenuação da onda (constante de atenuação);
- β fixa a fase (constante de fase ou de comprimento de onda).

A razão entre a onda de corrente e a onda de tensão incidentes é igual a Z_c (impedância característica da linha). Surge uma mudança de sinal no que respeita às ondas de tensão e corrente reflectidas, o que se traduz numa polaridade oposta destas duas ondas (Figura 4.8).

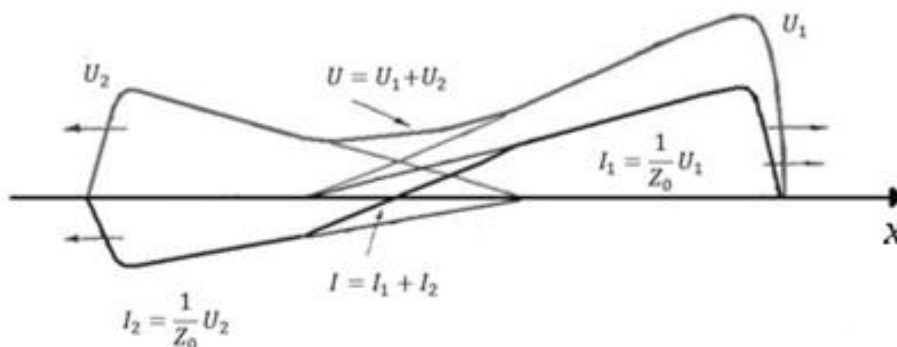


Figura 4.8 - Ondas de tensão e de corrente

As ondas móveis de corrente e tensão movem-se através da rede de distribuição, ao encontrarem pontos de descontinuidade, locais onde a impedância muda (no caso de $Z_1 \neq Z_2$), tais pontos incluem fins de linha, extremidades abertas, conexão de diferentes cabos, transições aéreo-subterrâneo, transformadores, entre outros. Nestes pontos, as ondas são reflectidas de volta à origem e transmitidas adiante com polaridades e intensidades que dependem dos valores relativos das impedâncias envolvidas. Mesmo para uma rede de distribuição relativamente pequena, estes processos de reflexão e transmissão podem

conduzir ao estabelecimento de um sistema muito complexo de ondas móveis, que se somam ou subtraem, possivelmente produzindo tensões muito elevadas em alguns locais (Figura 4.9) [38].

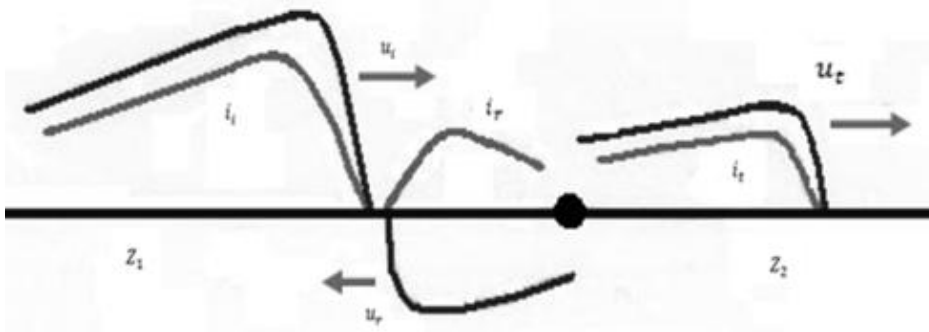


Figura 4.9 - Onda de corrente e tensão quando atinge um ponto de descontinuidade

A razão entre a onda reflectida e a onda incidente fornece o valor do coeficiente de reflexão:

$$\alpha = \frac{u_r}{u_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4.11)$$

A razão entre a onda transmitida e a onda incidente é fornecido pelo coeficiente de refração:

$$\beta = \frac{u_t}{u_i} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (4.12)$$

No caso da descarga atmosférica ocorrer num ponto intermédio de uma linha, a corrente de descarga será dividida pelas duas direcções [Figura 4.10]:

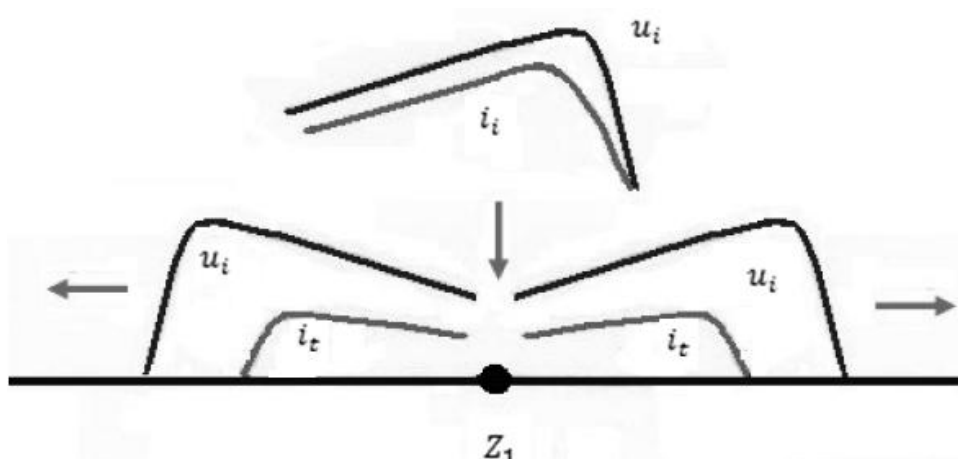


Figura 4.10 - Descarga atmosférica no ponto intermédio de uma linha

Felizmente estas ondas são amortecidas rapidamente enquanto se espalham pela rede devido às perdas associadas à rede de distribuição (resistências), cargas, descarregadores de sobretensão, explosores, arcos eléctricos, entre outros factores que dissipam a energia. De notar que os componentes da rede e equipamentos respondem de maneira diferente a estas sobretensões, caracterizados por transitórios oscilatórios de alta frequência, muito acima da de operação do sistema, 50 Hz [38].

Capítulo 5

Simulações

5.1 - Introdução

Neste capítulo, com base na Figura 4.2 apresentada no capítulo 4, para aplicação do método probabilístico de Monte Carlo, foram usados índices probabilísticos relativos à intensidade de corrente de pico das diferentes descargas atmosféricas e à sua probabilidade de ocorrência. Em seguida, foi implementada uma rede de distribuição de energia eléctrica no software PSCAD/EMTDC®, e escolhendo quatro descarregadores de sobretensão diferentes foi analisado o comportamento da rede modelo após a incidência das diferentes descargas atmosféricas.

5.2 - Método de Monte Carlo (Descargas Atmosféricas)

Para implementação do Método de Monte Carlo foram usados os seguintes índices probabilísticos, Tabela 5.1, relativos à intensidade de corrente de pico das diferentes descargas atmosféricas, que resultaram da análise da Figura 4.2:

Tabela 5.1 - Probabilidades de ocorrência dos diferentes valores de I_p

I_p (kA)	Probabilidade	Probabilidade Acumulada (%)
3 a 5 kA	0,0546	5,46
5 a 30 kA	0,4000	45,46
30 a 55 kA	0,3454	80
55 a 100 kA	0,1546	95,46
> 100 kA	0,0454	100

Em seguida foram gerados números aleatórios e multiplicados pelas probabilidades de ocorrência de cada intervalo de descargas atmosféricas. O número de números aleatórios gerados, ou seja, o número de descargas atmosféricas simuladas foi de 10000. Analisando uma simulação chegaram-se aos seguintes resultados:

Tabela 5.2 - Resultados da implementação do Método de Monte Carlo

I_p (kA)	Número de descargas verificadas	Descargas verificadas (%)
3 a 5 kA	579	5,79
5 a 30 kA	3983	39,83
30 a 100kA	4998	49,98
> 100kA	440	4,4

Analisando os resultados obtidos, conclui-se que num total de 10000 possíveis descargas atmosféricas, quase 5000 têm como corrente de pico um valor ente 30 e 100kA, ou seja, quase metade das descargas atmosféricas estão neste intervalo, o que leva a concluir, que uma coordenação de isolamentos eficaz, deve ter em atenção estes valores de descargas atmosféricas, pois, a probabilidade da sua ocorrência é bastante elevada. Descargas atmosféricas com valores de corrente de pico superiores a 100kA, não são muito prováveis, apenas 440 em 10000 possíveis, ou seja apenas 4,4%, o que leva a uma avaliação económica para verificar, se compensa cobrir esta margem de uma possível falha de isolamentos, relativamente ao aumento de custo de sistemas de protecção necessários.

5.3 - Software utilizado (PSCAD/EMTDC®)

PSCAD/EMTDC® (Power Systems Computer Aided Design/Electromagnetic Transients including DC) é um software de simulação bastante avançado e completo para Sistemas Eléctricos de Energia. EMTDC é o mecanismo de simulação, que é parte integrante do PSCAD® (interface gráfica), representa e resolve equações diferenciais (para ambos os sistemas electromecânicos e electromagnéticos) no domínio do tempo. As soluções são calculadas com base em um intervalo de tempo fixo e sua estrutura de programa permite a representação de sistemas de controlo. É um software usado em projectos e estudos de sistemas de energia, pois, torna-se muito mais fácil e economicamente viável, primeiro projectar e testar em sistemas eléctricos de energia modelo, do que projectar e implementar e depois verificar as contingências ocorridas. O PSCAD/EMTDC® pode ser aplicado para encontrar sobretensões num sistema de energia devido a uma Descarga Atmosférica, para aplicações em redes de distribuição e realizar estudos de coordenação de isolamento entre outros. Estas simulações serão realizadas com um intervalo de tempo muito pequeno (da ordem dos nano-segundos) [15].

5.4 - Descargas atmosféricas incidentes na linha

Foram aplicadas descargas atmosféricas com diferentes valores de pico de corrente numa linha aérea de distribuição de energia eléctrica, nas imediações de um Posto de Transformação MT/BT. Os valores da corrente de pico das descargas atmosféricas foram escolhidos com base na sua probabilidade de ocorrência (Tabela 5.1).

As descargas atmosféricas incidentes directamente num condutor fase de uma linha de distribuição, provocam sobretensões de valores muito elevados. Obtiveram-se os seguintes resultados relativamente às sobretensões provocadas por descargas atmosféricas incidentes num condutor fase (Fase S) de uma linha de distribuição:

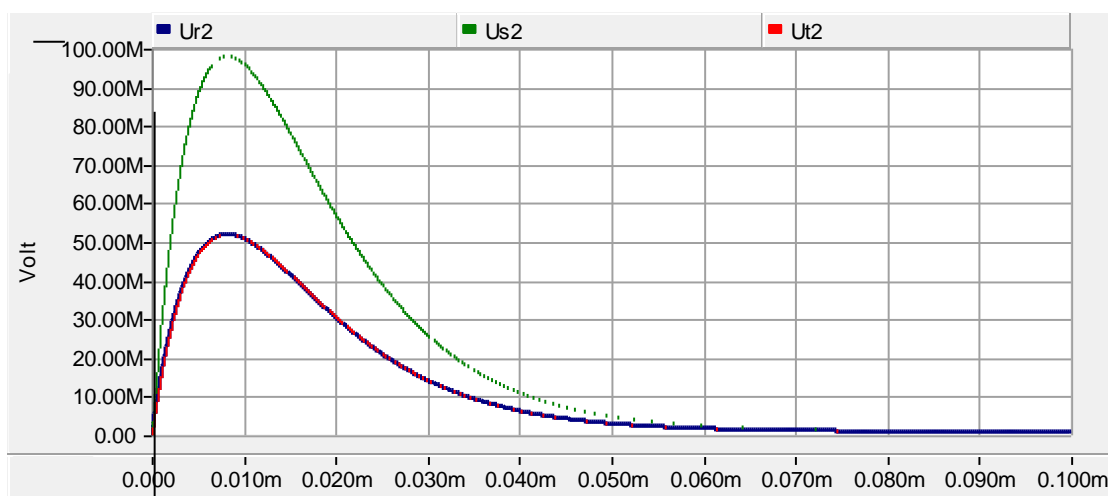


Figura 5.1 - Sobretensão provocada por uma descarga atmosférica com $I_p=200kA$

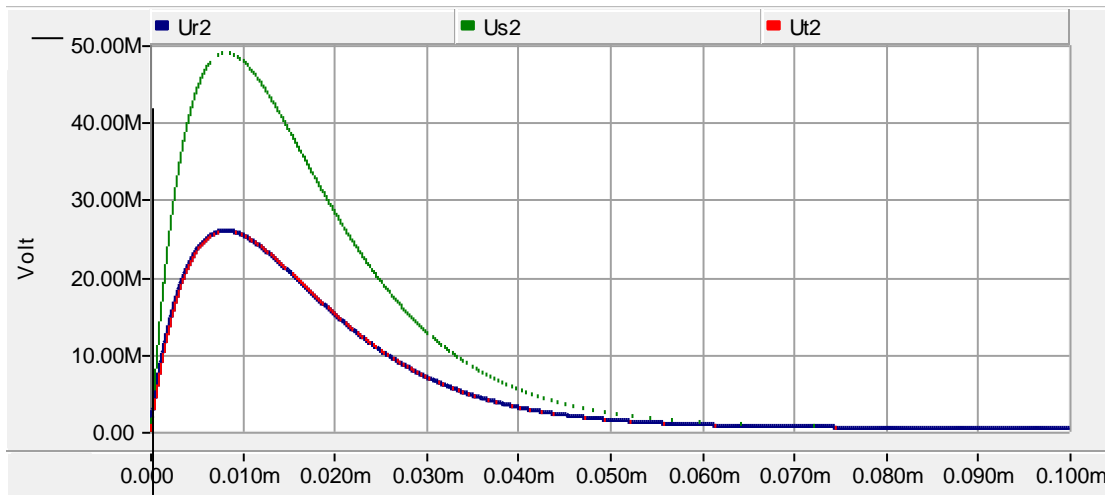


Figura 5.2 - Sobretensão provocada por uma descarga atmosférica com $I_p=100\text{kA}$

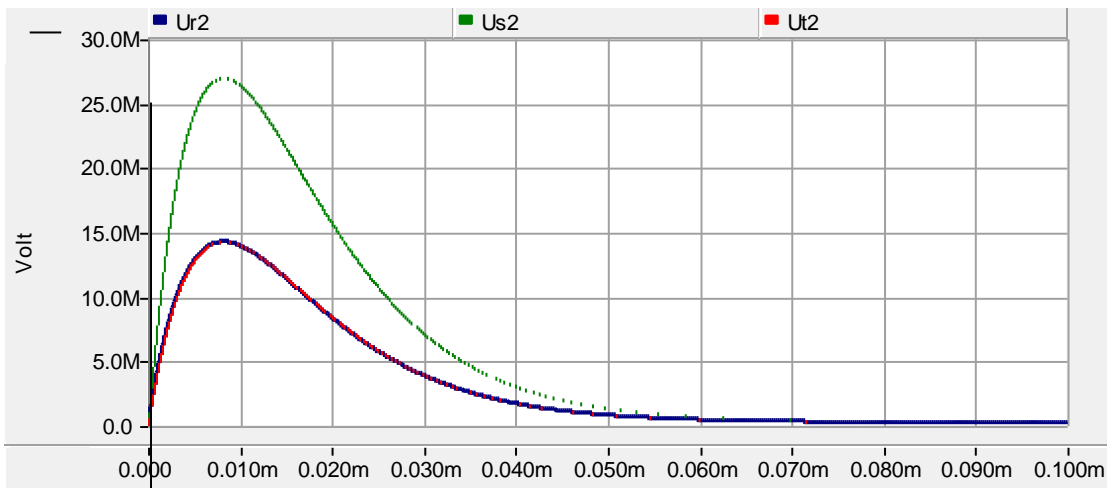


Figura 5.3 - Sobretensão provocada por uma descarga atmosférica com $I_p=55\text{kA}$

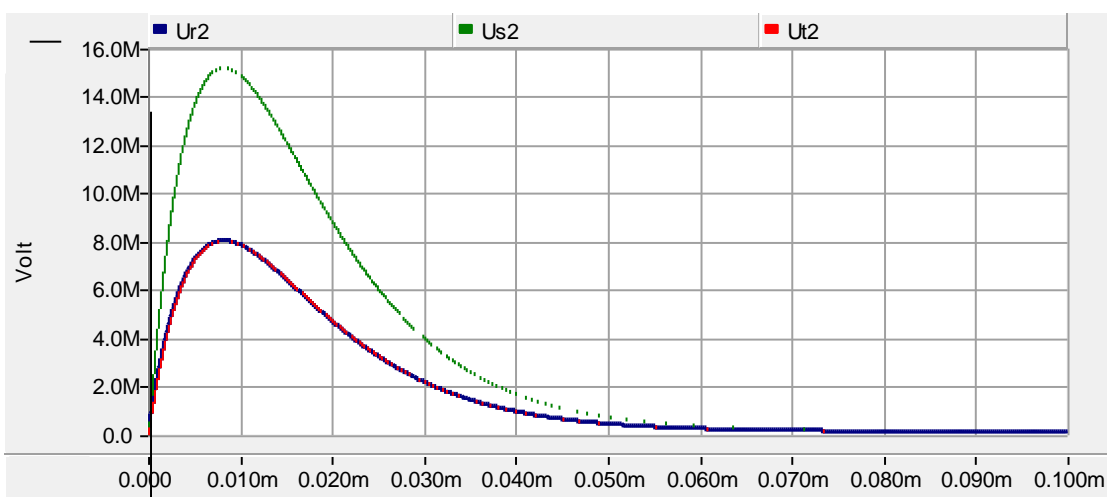


Figura 5.4 - Sobretensão provocada por uma descarga atmosférica com $I_p=31\text{kA}$

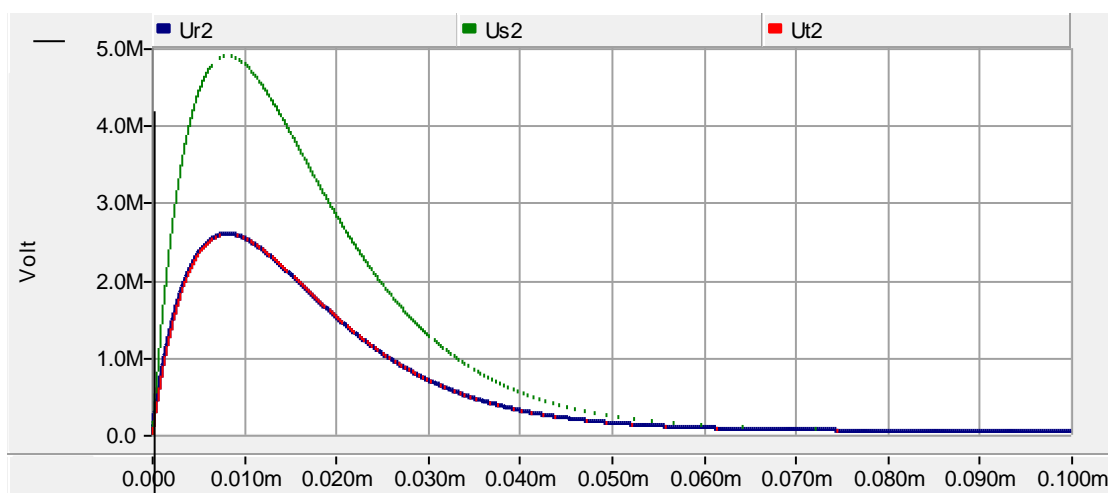


Figura 5.5 - Sobretensão provocada por uma descarga atmosférica com $I_p=10\text{kA}$

Não foram considerados, para já, sistemas de protecção, daí os valores das tensões nas fases serem tão elevados.

Tabela 5.3 - Valores de pico associados às ondas das sobretensões provocadas pelas descargas atmosféricas directas

Descarga Atmosférica aplicada (I_p)	Sobretensão	
	Imediações do PT de MT/BT e Descarga Atmosférica	A 10km do PT de MT/BT e Descarga Atmosférica
200 kA	100 MV	92 MV
100 kA	50 MV	45 MV
55 kA	27,5 MV	25 MV
31 kA	15,5 MV	14,5 MV

Pela análise da Tabela 5.3, pode-se observar que, no local onde incide a descarga atmosférica, a onda de tensão atinge valores na ordem dos MV, o que leva certamente à deterioração do equipamento e saída de serviço dos mesmos.

Ao longo da linha, uma sobretensão provocada pela descarga atmosférica, sofre atenuações, por exemplo para uma descarga atmosférica com $I_p=55\text{kA}$, ao longo de 10km, a sobretensão passa de 27,5MV para 25MV, ou seja sofre uma atenuação de 2,5MV. Relativamente ao tempo de propagação da onda de tensão, observa-se que a onda de tensão provocada pela descarga atmosférica demorou cerca de 0,034ms a percorrer 10km de linha aérea de distribuição.

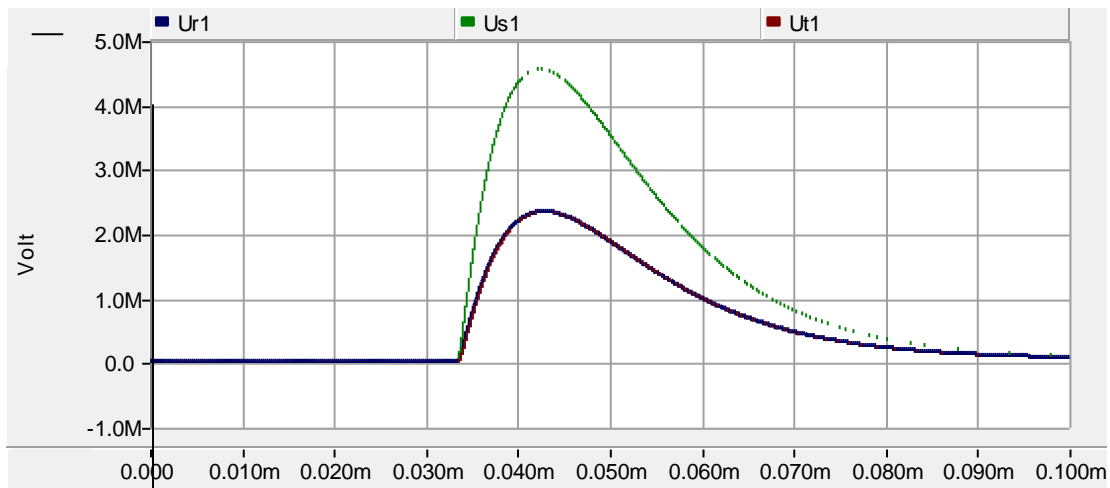


Figura 5.6 - Sobretensão provocada por uma descarga atmosférica com $I_p=10\text{kA}$, a 10km do ponto onde a descarga atmosférica incidiu

Tabela 5.4 - Atenuação de onda de tensão ao longo de 10km de linha

Descarga Atmosférica aplicada (I_p)	Atenuação de onda de tensão ao longo de 10km de linha
200 kA	8MV
100 kA	10MV
55 kA	2,5MV
31 kA	16,5MV

Na Tabela 5.4, pode-se observar os valores das atenuações de tensão, na fase onde incidiu a descarga atmosférica, provocadas pela extensão da linha. Pela análise dos dados constata-se que, na rede implementada, 10km de linha atenuam cerca de 8% do valor da sobretensão verificada no local onde a descarga incidiu. Em linhas longas, este pode ser também um factor a ter em conta para o dimensionamento de sistemas de protecção a implementar.

5.5 - Descarregadores de sobretensão

Para os mesmos valores de corrente de pico das descargas atmosféricas, foram usados diferentes descarregadores de sobretensão para analisar o comportamento da onda de tensão verificada. Foi considerada uma coordenação de isolamentos do ponto de vista probabilístico e determinístico, ou seja, as descargas atmosféricas foram simuladas para valores de corrente de pico inferiores e superiores aos suportados pelos descarregadores de sobretensão, como

descrito no Capítulo 3. Os parâmetros dos descarregadores de sobretensão usados nas simulações foram os seguintes:

Tabela 5.5 - Parâmetros dos descarregadores de sobretensão usados nas simulações

	1	2	3	4
$L_1(\mu\text{H})$	6,045	15,75	18,24	86,445
$L_0(\mu\text{H})$	0,0806	0,21	0,2432	1,1526
$R_1(\Omega)$	26,195	68,25	79,04	374,595
$R_0(\Omega)$	40,3	105	121,6	576,3
$C(\text{pF})$	40,3	105	121,6	576,3
$d(\text{mm})$	403	1050	1216	5763
$I_p(\text{kA})$	65	100	100	150

A metodologia que permite efectuar os cálculos destes parâmetros encontram-se expostos no Anexo 3.

5.5.1 - Descarga atmosférica com $I_p=100\text{kA}$

Nas figuras 5.7 a 5.10 é possível observar a onda de tensão das três fases de uma linha, onde na sua fase S incidiu uma descarga atmosférica com um $I_p=100\text{kA}$. O descarregador de sobretensão está colocado antes do transformador MT/BT, pois esta é uma prática corrente da Operadora da Rede de Distribuição de Energia Nacional, como enunciado no Capítulo 2.

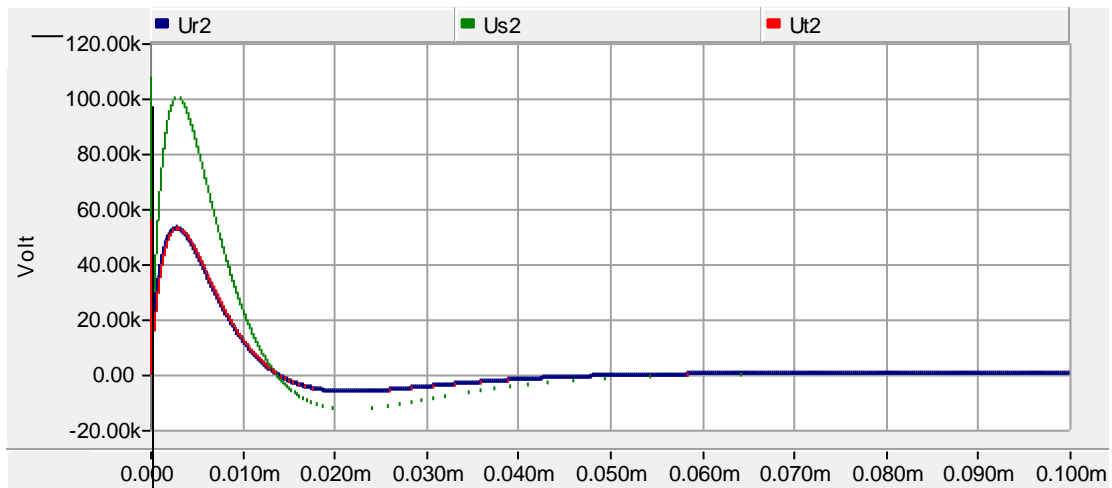


Figura 5.7 - Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=100\text{kA}$ (descarregador de sobretensão 1)

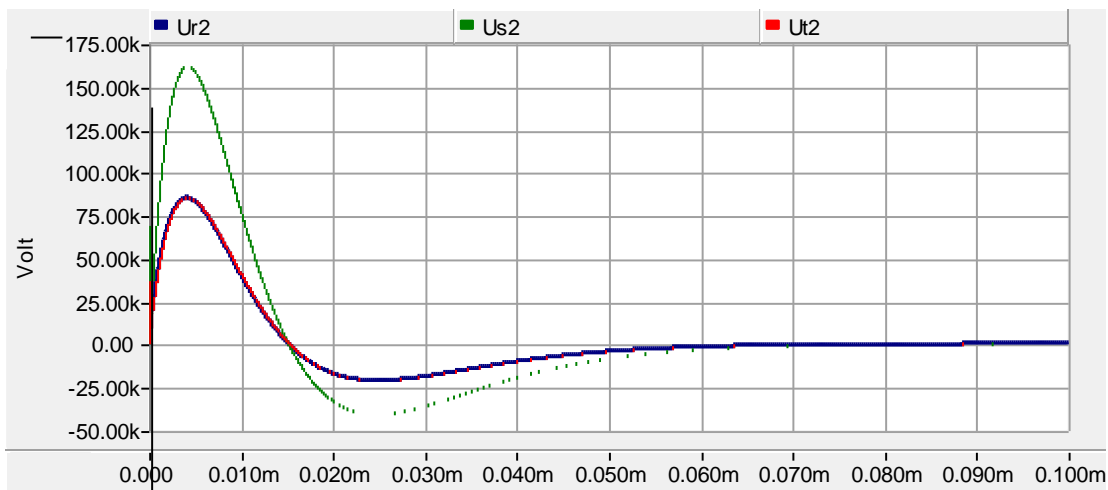


Figura 5.8 - Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=100\text{kA}$ (descarregador de sobretensão 2)

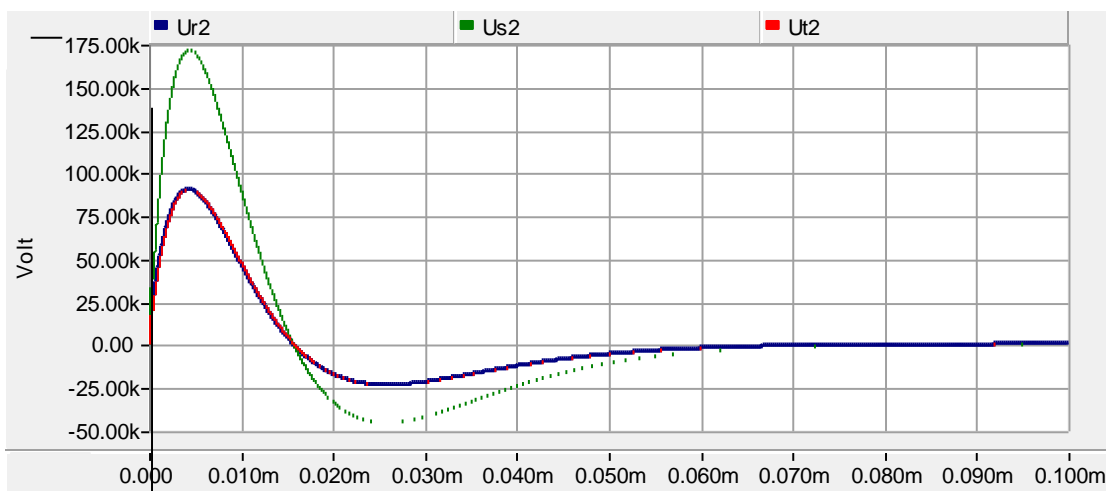


Figura 5.9 - Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=100\text{kA}$ (descarregador de sobretensão 3)

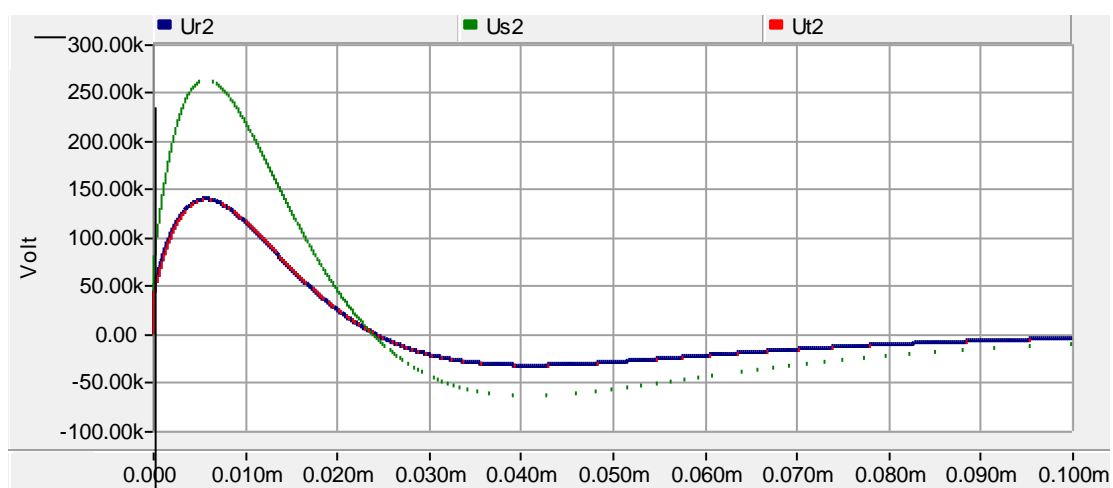


Figura 5.10 - Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=100\text{kA}$ (descarregador de sobretensão 4)

Pela análise da Figura 5.7, Figura 5.8, Figura 5.9 e Figura 5.10 pode-se observar a variação dos valores de pico de tensão na fase S, provocada pela actuação dos diferentes descarregadores de sobretensão, de aproximadamente 50MV para 100kV com o descarregador de sobretensão 1 implementado, ou seja, a configuração do descarregador de sobretensão permite atenuar a tensão. Pode-se observar, que os efeitos da descarga atmosférica, passam também para as outras duas fases, no entanto o efeito sobre estas não é tão severo, provocando valores de pico elevados, mas não tão elevados como os da fase onde incidiu. Na Tabela 5.6 pode-se observar os picos de tensão verificados nas fases S usando os quatro descarregadores de sobretensão propostos, para este valor de descarga atmosférica.

Tabela 5.6 - Picos de tensão na fase S com uma descarga atmosférica com $I_p=100\text{kA}$

Descarregador de sobretensão	Descarga Atmosférica aplicada (I_p (kA))	U_p na fase S (kV)
1		100
2	100	165
3		175
4		255

5.5.2 - Descarga atmosférica com $I_p=55kA$

A Figura 5.11, Figura 5.12, Figura 5.13 e Figura 5.14 representam a forma de onda de tensão das três fases de uma linha, onde na sua fase S incidiu uma descarga atmosférica com $I_p=55kA$.

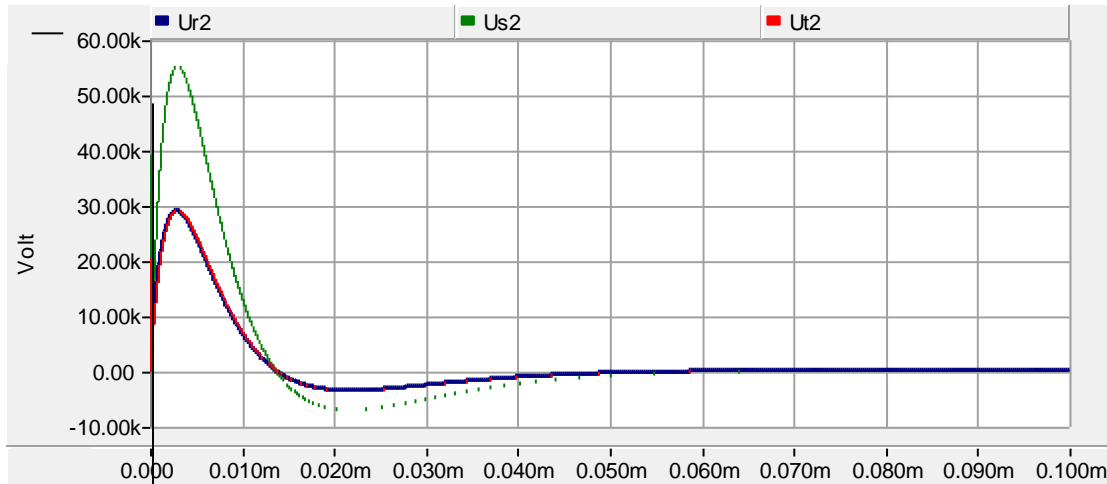


Figura 5.11 - Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=55kA$ (descarregador de sobretensão 1)

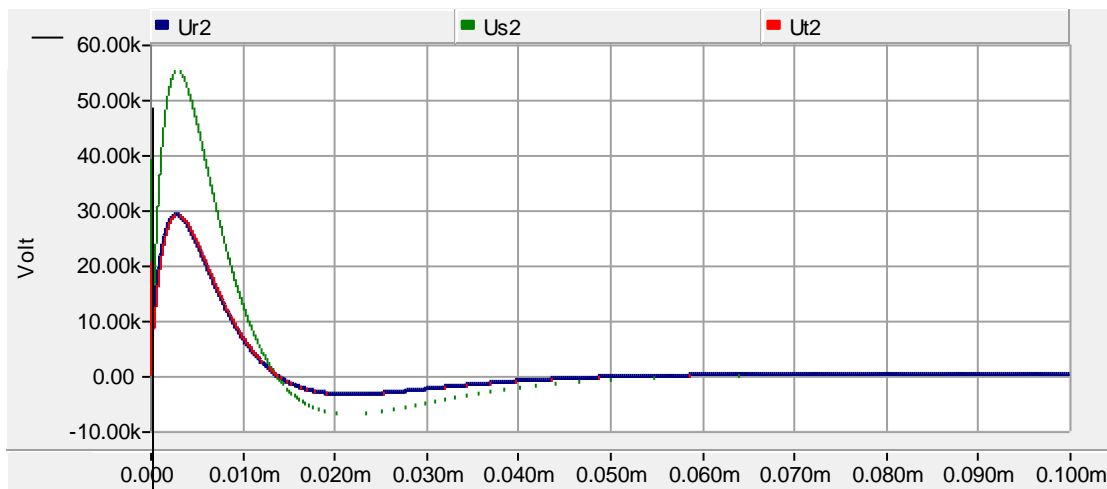


Figura 5.12 - Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=55kA$ (descarregador de sobretensão 2)

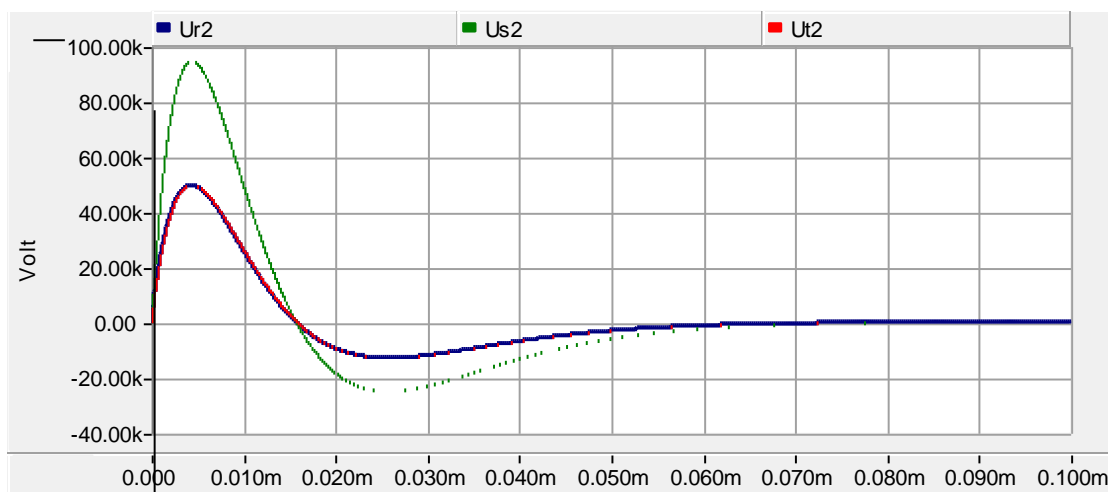


Figura 5.13 - Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=55\text{kA}$ (descarregador de sobretensão 3)

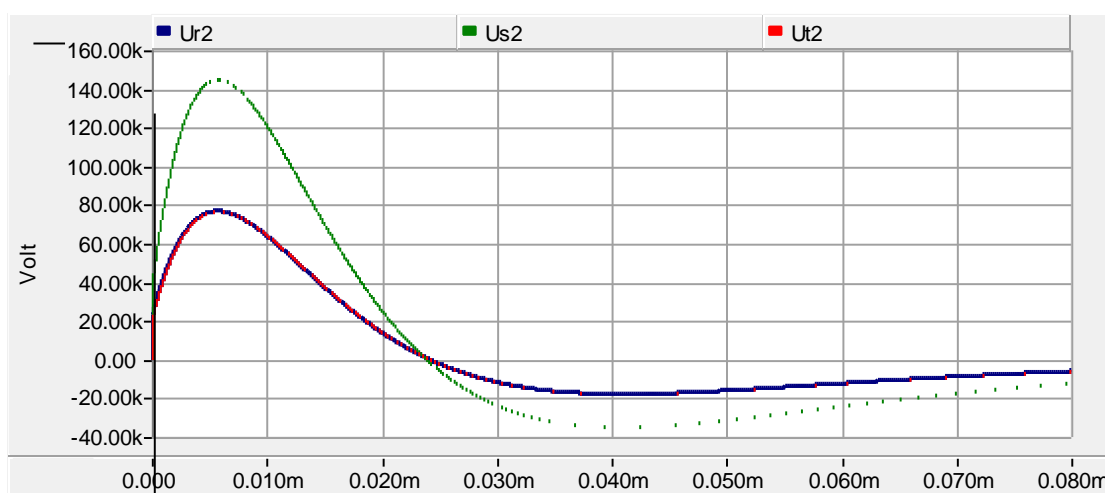


Figura 5.14 - Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=55\text{kA}$ (descarregador de sobretensão 4)

Nesta situação é mais uma vez visível o efeito dos descarregadores de sobretensão, limitando a tensão de pico após uma descarga atmosférica. A atenuação é maior pois o I_p da descarga atmosférica é mais baixo.

Tabela 5.7- Picos de tensão na fase S com uma descarga atmosférica de 55kA

Descarregador de sobretensão	Descarga Atmosférica aplicada (I_p (kA))	U_p na fase S (kV)
1		55
2		55
3	55	95
4		145

5.5.3 - Descarga atmosférica com $I_p=31kA$

A Figura 5.15, Figura 5.16, Figura 5.17 e Figura 5.18 representam as formas de onda da tensão nas três fases do sistema, quando nele incide uma descarga atmosférica com $I_p=31kA$, com diferentes descarregadores de sobretensão ligados ao sistema.

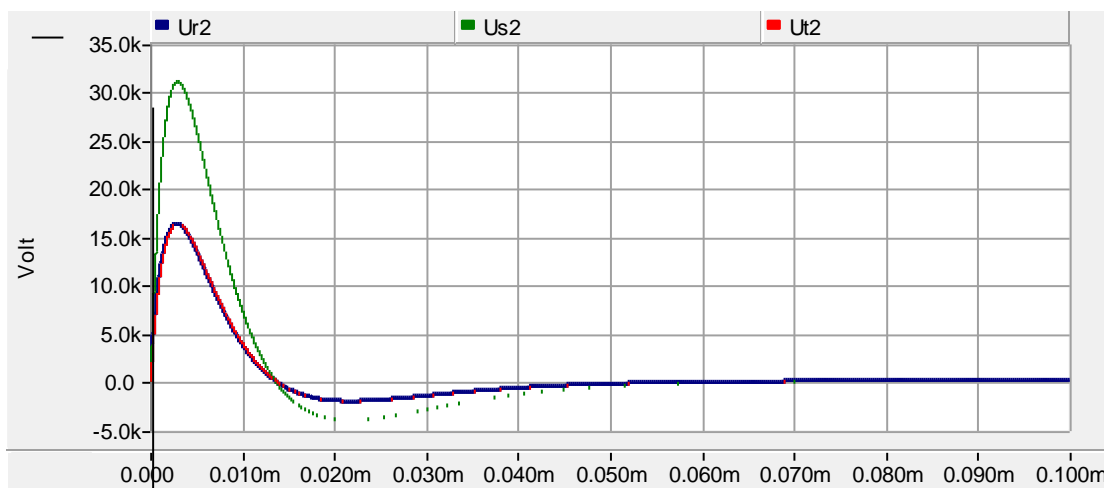


Figura 5.15 - Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=31kA$ (descarregador de sobretensão 1)

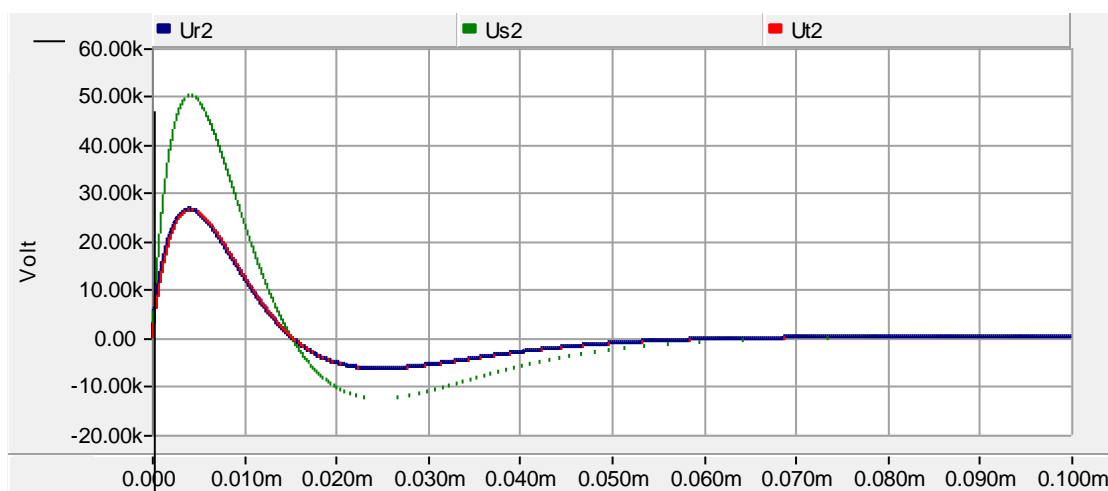


Figura 5.16 - Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=31\text{kA}$ (descarregador de sobretensão 2)

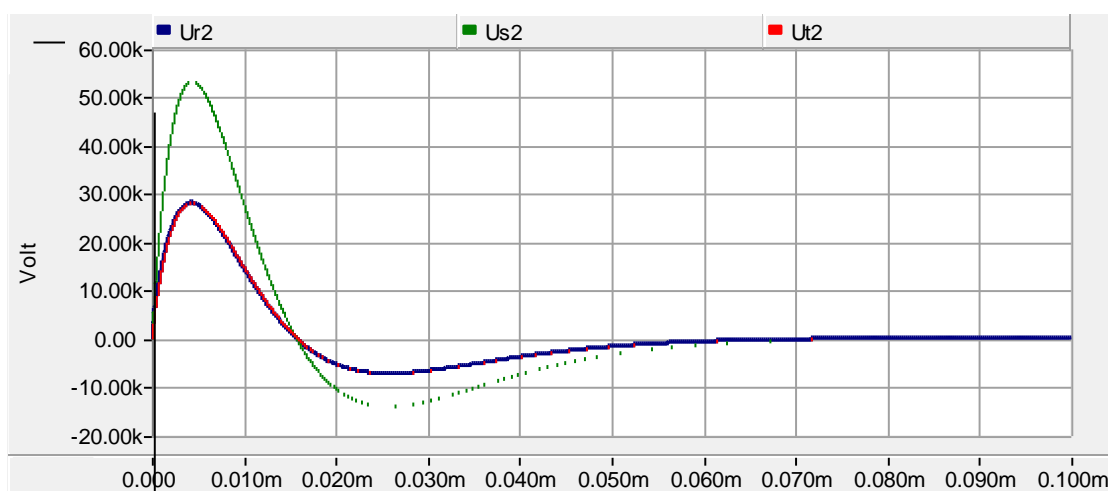


Figura 5.17 - Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=31\text{kA}$ (descarregador de sobretensão 3)

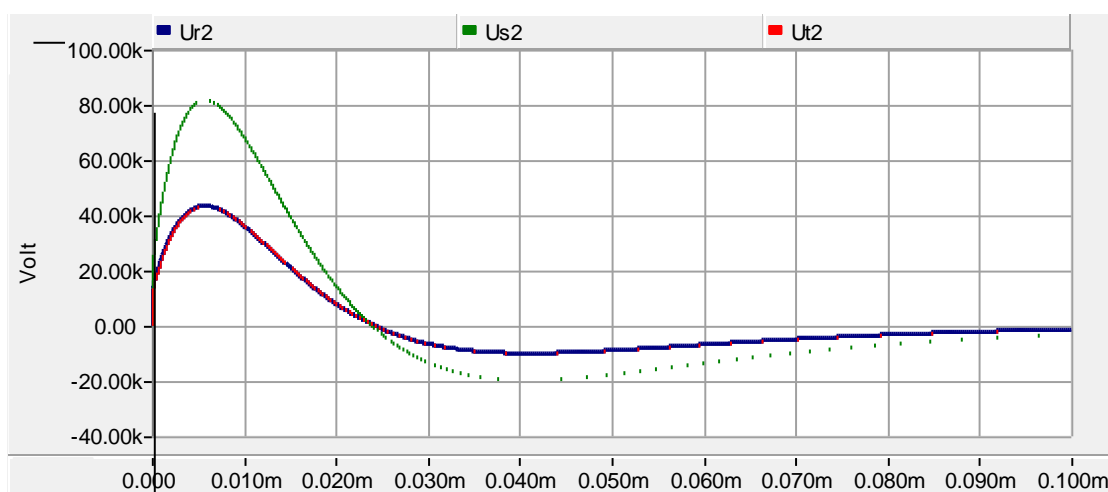


Figura 5.18- Onda de tensão para uma descarga atmosférica com $I_p=31\text{kA}$ (descarregador de sobretensão 4)

Este valor para a corrente de pico da descarga atmosférica (31kA), tem especial relevância, pois, de acordo com [5], metade das descargas atmosféricas ocorridas têm valor inferior a 31kA, ou seja, há uma probabilidade de cedência de isolamentos de cerca de 0,5.

Tabela 5.8 - Picos de tensão na fase S com uma descarga atmosférica de 31kA

Descarregador de sobretensão	Descarga Atmosférica aplicada (I_p (kA))	U_p na fase S (kV)
1	31	32
2		50
3		55
4		82

5.5.4 - Análise do comportamento dos Descarregadores de Sobretensão

Analisando os valores obtidos com as diferentes descargas atmosféricas alternadas com os descarregadores de sobretensão, chegou-se a:

Tabela 5.9 - Variação da tensão alterando descarregadores de sobretensão e descargas atmosféricas

I_p (kA)	U_p (kV)			
	1	2	3	4
31	32	50	55	82
55	55	55	95	145
100	100	165	175	255

Pela análise dos valores da tabela anterior, observa-se a variação das sobretensões verificadas na rede após a incidência das descargas atmosféricas com diferentes descarregadores de sobretensão implementados. Com a diminuição do I_p da descarga atmosférica, o valor de pico da onda de tensão (U_p) também diminui. No entanto verificou-se que, para uma descarga atmosférica, usando descarregadores de sobretensão diferentes, com capacidades de suportar correntes de pico diferentes, a sobretensão na rede provocada pela descarga atmosférica é maior quanto maior for a I_p que o descarregador admite. Para uma descarga atmosférica de 31kA, o valor da sobretensão passou de 32kV com o descarregador de sobretensão 1, para 82kV com o descarregador de sobretensão 4. Para uma descarga de 55kA

a sobretensão verificada na rede com o descarregador de sobretensão 1 implementado, é de 55kV, no entanto com o descarregador de sobretensão 4, para a mesma descarga atmosférica de 55kA, a sobretensão verificada é de 145kV. Para uma descarga atmosférica de 100kA, com o descarregador de sobretensão 1 e 4, a sobretensão verificada na rede passa de 100kV para 255kV. Este facto deve-se às características do descarregador e, tanto das associações de resistências, condensadores e bobinas como dos próprios materiais de fabrico dos descarregadores de sobretensão.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 - Conclusões

As sobretensões de origem atmosférica são umas das principais causas de avarias no sistema de distribuição de energia eléctrica, principalmente as descargas directas nas linhas. Com o objectivo de analisar a performance das Linhas de MT e dos de alguns descarregadores de sobretensão, foram efectuadas várias simulações através do software PSCAD/EMTDC®, para diferentes descargas atmosféricas e descarregadores de sobretensão.

Efectuaram-se simulações com a descarga atmosférica a incidir sobre os condutores de fase de uma linha aérea de distribuição. A amplitude da corrente de descarga variou de $I_p=31\text{kA}$, $I_p=55\text{kA}$ e $I_p=100\text{kA}$, visto que, com aplicação do Método de Monte Carlo constatou-se que são os valores que mais incidem nas linhas de distribuição, em cerca de 95% das descargas atmosféricas incidentes nas redes de distribuição são de valor inferior a 100kA. Assim, foi conseguido formar uma amostra significativa do comportamento de um sistema pelo sorteio de situações e respectiva análise, a fim de se avaliar o comportamento global do sistema a partir do comportamento da amostra.

O valor de 31kA surge por ser o valor médio de descargas atmosféricas verificadas. O aumento da corrente de pico I_p de 31kA para 100kA acarreta um aumento das tensões nos condutores de fase. Quando a descarga incide num condutor fase, nas outras duas fases, registam-se também picos de tensão e corrente elevados, mas mesmo assim de valor inferior ao registado na fase onde incidiu a descarga.

Relativamente aos descarregadores de sobretensão variou-se a capacidade de resistência à corrente de descarga de $I_p=65\text{kA}$, $I_p=100\text{kA}$ e $I_p=150\text{kA}$. Analisando as simulações efectuadas, conclui-se que uma correcta modelização dos descarregadores de sobretensão, é importante, pois, só assim se poderá limitar a tensão na rede provocada pela descarga atmosférica, de modo a que esta não danifique nem tire componentes de serviço, levando ao aumento da energia não fornecida. As características construtivas também são relevantes para o dimensionamento dos descarregadores de sobretensão, visto que estas interferem na parametrização dos mesmos e consequentemente nas resposta dada ás solicitações. O

material usado na construção e os circuitos internos dos descarregadores de sobretensão são factores a ter em conta e que podem alterar o valor das sobretensões geradas por uma descarga atmosférica incidente numa linha de distribuição.

Verificou-se que, para uma descarga atmosférica, usando descarregadores de sobretensão diferentes, com capacidades de suportar correntes de pico diferentes, a sobretensão na rede provocada pela descarga atmosférica é maior, quanto maior for a capacidade de suportar uma corrente de pico por parte do descarregador de sobretensão. Isto deve-se ao facto da capacidade de resistência a valores de pico de corrente, por parte do descarregadores de sobretensão, ser maior, tal como o facto do seu circuito interno ser constituídos por resistências, bobinas e condensadores que aumentam a sua capacidade com o aumento da resistência a valores de pico de corrente e com o tamanho do descarregador o que leva, pela lei de Ohm, a que as tensões suportáveis pelo mesmo descarregador sejam também maiores, e conseqüentemente as tensões verificada na rede também.

6.2 - Trabalhos Futuros

Com a realização deste estudo, surgiram algumas conclusões que, inevitavelmente, se tornaram em novos desafios. Sugere-se, assim, para trabalhos futuros:

- Calcular a taxa de avarias numa Linha de Distribuição devido a falhas dos descarregadores de sobretensão;
- Geração aleatória, através do método de Monte Carlo, dos parâmetros associados a descargas atmosféricas, determinação do ponto de impacto na linha e cálculo das sobretensões originadas pelas descargas atmosféricas;
- Desenvolver modelos para configurações de circuitos internos de descarregadores de sobretensão de modo a melhorar o seu rendimento, capacidade e custo;
- Analisar os efeitos das descargas atmosféricas transferidos à baixa tensão e ao transformador MT/BT, avaliando os impactos para os consumidores (energia não fornecida e qualidade de onda de tensão);
- Modelização dos efeitos da humidade e da poluição a médio e longo prazo na coordenação de isolamentos em redes de distribuição de energia.

Anexos

Anexo 1 - Modelização da rede a montante

Com base nas configurações usadas na actualidade das redes de distribuição, foi definida uma rede de distribuição modelo para realização do estudo, com os parâmetros definidos na tabela seguinte:

Tabela A1.1 - Parâmetros da rede a montante de 60kV

Rede a Montante		
Potência de Curto-circuito máxima	2100	MVA
Potência de Curto-circuito mínima	1700	MVA
X/R	3,5	

A rede a montante da subestação de distribuição é modelizada por um equivalente de rede. Sabendo a potência de curto-circuito máximas, torna-se possível representar a rede para fins de simulação. Para tal, tem-se como auxílio a Figura A1.1.

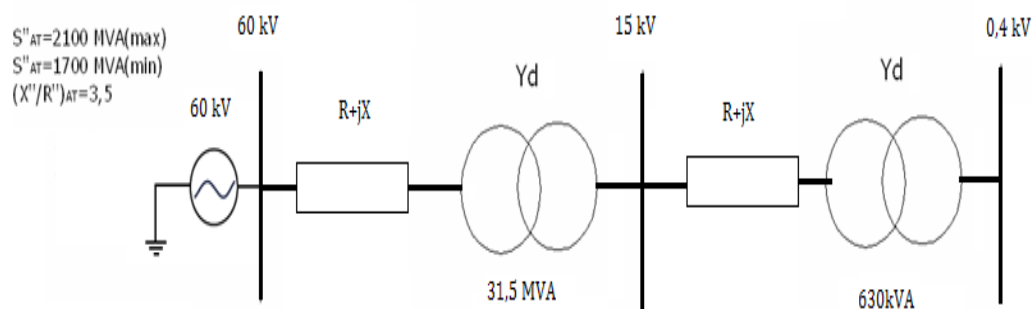


Figura A1.1 - Esquema equivalente representativo da rede abordada no trabalho

Conhecendo a potência de curto-circuito e a relação X/R , expressos na Tabela A.1, pretende-se calcular o valor de R e X a utilizar na simulação. Para isso, sabendo que a potência de curto-circuito relaciona-se com R e X através de:

$$S_{CC} = \frac{V^2}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{V^2}{R \sqrt{1 + \left(\frac{X}{R}\right)^2}} \quad (\text{A1.1})$$

Arranjando a equação e substituindo o valor de X/R obtém-se:

$$R = \frac{V^2}{S_{CC} \sqrt{1 + (3,5)^2}} \quad (\text{A1.2})$$

$$X = 3,5 \times R \quad (\text{A1.3})$$

Substituindo os dados da Tabela obtém-se:

$$R \cong 0,471 \Omega \quad (\text{A1.4})$$

$$X = 3,5 \cdot R \Leftrightarrow X \cong 1,648 \Omega \quad (\text{A1.5})$$

Todavia, o valor da reactância indutiva a inserir no simulador deverá ser da forma de indutância L , logo, sabendo a relação entre as grandezas obtém-se:

$$L = \frac{X}{2\pi f} \cong 5,247 \text{ mH} \quad (\text{A1.5})$$

Anexo 2 - Cálculos dos parâmetros da função bi-exponencial

Neste anexo apresenta-se os passos da metodologia usada para o cálculo dos parâmetros k , α e β da onda bi-exponencial, com base na especificação dos tempos convencionais de frente (T_f) e de cauda (T_q) [30].

- Considerar, para início do processo, $\chi(0) = 1.85$
- Determinar o tempo de pico (T_p) e a variável auxiliar b

$$t_p = \chi^{(0)} \cdot t_f \quad (\text{A2.1})$$

$$b = \frac{t_f}{t_p} \quad (\text{A2.2})$$

- Cálculo recursivo do parâmetro a , tomando para o respectivo valor inicial $a(0)=100$ e utilizando a expressão (A2.3)

$$a^{(n+1)} = \frac{(1-b) \ln a^{(n)}}{\ln \left[\frac{0.5 - \left(1 - \frac{1}{a^{(n)}}\right)}{\left(1 - \frac{1}{a^{(n)b}\right)} \right]} + 1 \quad (\text{A2.3})$$

- Determinar α

$$\alpha = \frac{\ln(a)}{t_f(a-1)} \quad (\text{A2.4})$$

- Determinar β

$$\beta = \alpha \cdot a \quad (\text{A2.5})$$

- Cálculo da constante k

$$k = [e^{-\alpha \cdot T_p} - e^{-\beta \cdot T_p}]^{-1} \quad (\text{A2.6})$$

- Determinar tempo de frente T_f

$$T_f = \frac{1}{0.6\beta} \ln \left[\frac{k-0.3}{k-0.9} \right] \quad (\text{A2.7})$$

- Reavaliação da relação T_p e T_f :

$$\chi^{(1)} = \frac{T_p}{T_f} \quad (\text{A2.8})$$

- Teste de Convergência

$$\text{Se } |\chi^{(1)} - \chi^{(0)}| \geq \varepsilon, \text{ então } \chi^{(0)} = \chi^{(1)} \text{ e volta a 2, se não termina} \quad (\text{A2.9})$$

Anexo 3 - Implementação de uma linha aérea de distribuição em PSCAD/EMTDC®

Nesta dissertação as simulações efectuadas foram realizadas através do software PSCAD/EMTDC®. É feita uma breve descrição da forma de implementação dos diversos componentes para simular uma descarga atmosférica numa linha aérea de distribuição.

Linha de distribuição (apoios e cabos)

O cabo usado para a linha aérea de distribuição foi um cabo de alumínio com alma de aço de:

- 88 mm² (75,4mm² de alumínio e 12,6 mm² de aço);
- 6 fios de alumínio e 1 de aço;
- Diâmetro de cada fio de alumínio de 12mm tal como o de aço;
- Massa por unidade de comprimento de 306,4 kg/km;
- A carga de rotura nominal é de 25,28kN;
- Resistência eléctrica máxima a 20 °C de 0,3806 ohm;
- Módulo de elasticidade final é 76000N/mm²;
- Coeficiente linear de expansão $18,6 \times 10^{-6} K^{-1}$;
- Capacidade nominal de 300^a.

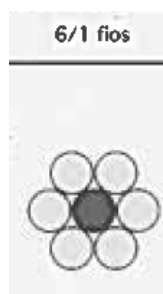


Figura A3.1 - Disposição dos condutores no cabo Al-Aço

A linha de distribuição implementada foi parametrizada com 10km de comprimento. Nesta secção do programa também são parametrizados os apoios e condutores. Não foram usados cabos de guarda, pois, o objectivo é aplicar uma descarga atmosférica directamente num condutor fase de uma linha aérea de distribuição de energia eléctrica de média tensão.

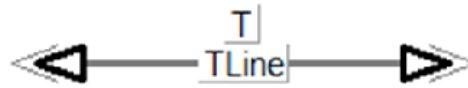


Figura A3.2 - Linha de transmissão em PSCAD/EMTDC®

Relativamente aos apoios usados, o símbolo em PSCAD/EMTDC® é representado na Figura A3.3, enquanto que na Figura A3.4 está representado o modelo do apoio usado tal como as suas medidas.



Figura A3.3 - Apoio de média tensão em PSCAD/EMTDC®

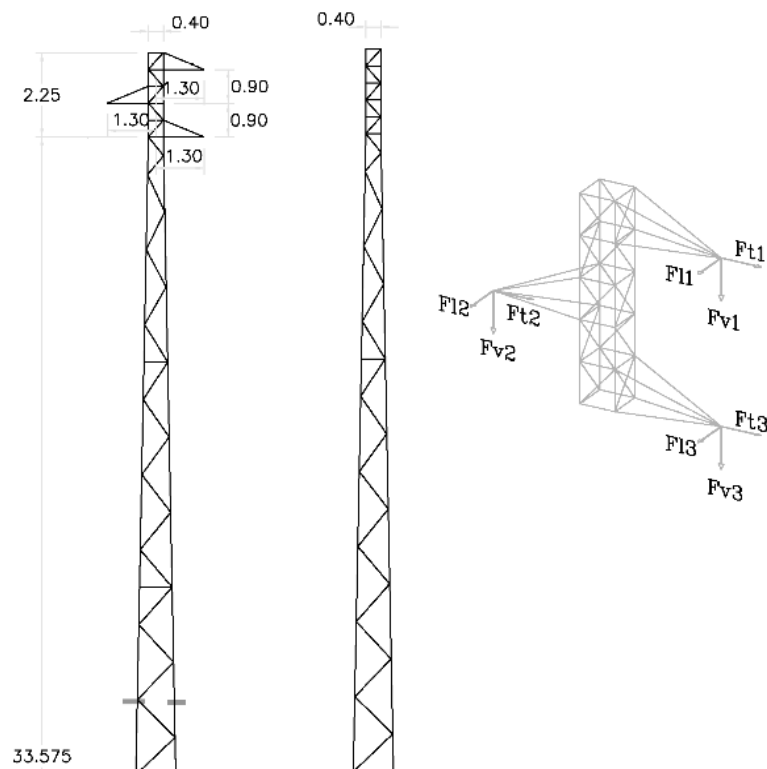


Figura A3.4 - Medidas do Apoio MT de 15kV usado na rede em PSCAD/EMTDC®

Os apoios são representados por uma linha monofásica. Neles pode-se definir o número de fases, que serão três. O número de condutores será o número de fases, visto que não tem cabos de guarda. Em série com as fases dos apoios são colocadas resistências de 600Ω em ambas as extremidades do sistema, que representam a carga que está a ser alimentada.

Transformadores

A rede implementada, tem uma parte em que a tensão nominal é 60kV (AT), outro trecho de 15kV (MT) e também um trecho de 0,4kV (BT). Assim, foram usados dois transformadores no esquema implementado em PSCAD/EMTDC® (Figura A3.5):

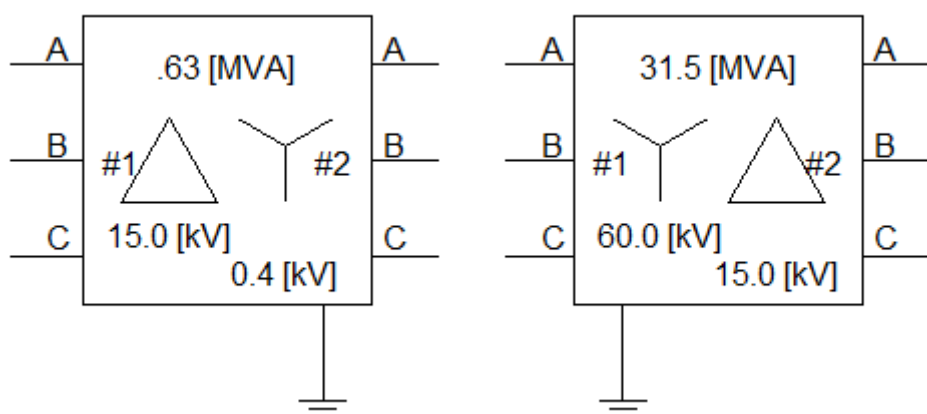


Figura A3.5 - Transformadores usados na rede implementada em PSCAD/EMTDC®

A Tabela A3.1 indica as características dos transformadores usados na rede modelo em que foram efectuadas as simulações:

Tabela A3.1 - Características dos transformadores usados na rede modelo

Transformador MT/BT		
Potencia Nominal	630	kVA
Relação de Transformação	15/0,4	kV
Ligação dos Enrolamentos	Triângulo/Estrela	
Transformador AT/MT		
Potencia Nominal	31,5	MVA
Relação de Transformação	60/15	kV
Ligação dos Enrolamentos	Estrela/Triângulo	

Resistência de terra nos apoios

A resistência de terra é representada por uma resistência finita em série com os apoios, que se irá manter ao longo das diversas simulações, visto não ser objectivo do presente trabalho verificar o impacto da variação da resistência de terra dos apoios. Foi definido o valor de 20Ω para a resistência de terra dos apoios visto ser o valor definido no Guia de Coordenação de Isolamentos da EDP, Distribuição S.A., como referido no Capítulo 2 desta dissertação. Na figura seguinte está representada a resistência de terra nos apoios, que será ligada em série com estes.

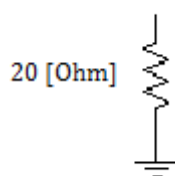


Figura A3.6 - Resistência terra dos apoios

Extremidades das linhas

Optou-se por utilizar uma linha de 10km de comprimento. Assim, o comprimento mínimo das linhas deverá ser determinado para garantir um tempo de propagação inferior ao tempo de simulação total, pois as reflexões nas extremidades da linha poderão ser verificadas se o tempo total de propagação for inferior aos tempos de simulação.

Tensão da rede

A tensão da rede é representada por uma fonte de tensão trifásica de 60 kV que será ligada em série, numa das extremidades da linha, a cada fase, e é representada pela figura seguinte:

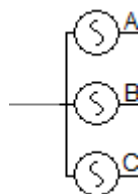


Figura A3.7 - Gerador de Tensão na rede

Ao longo da rede, devido à acção dos transformadores, a tensão vai decaindo, até ao mínimo de 400V.

Descarregador de Sobretensão

O descarregador de sobretensão em PSCAD/EMTDC®, segue a configuração da Figura A3.8, , que é o modelo definido pelo IEEE [24]. O parâmetro essencial a definir no uso deste aparelho de protecção é o valor da tensão que, os explosores.

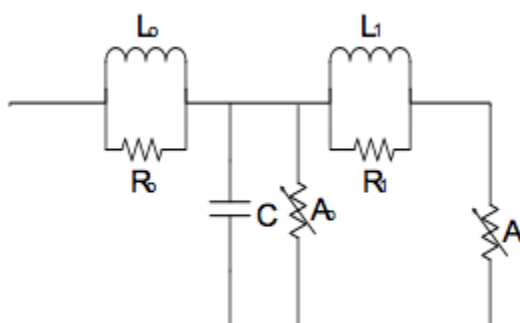


Figura A3.8 - Descarregador de Sobretensão em PSCAD/EMTDC, modelo IEEE [24]

Os explosores que fazem parte do modelo usado para o descarregador de sobretensão (A0 e A1) são parametrizados:

$$A_0 = U_0 \cdot U_n \quad (\text{A3.1})$$

$$A_1 = U_1 \cdot U_n \quad (\text{A3.2})$$

em que

A_0 é o valor de tensão a introduzir no PSCAD/EMTDC® para parametrizar o explosor 0;
 A_1 é o valor de tensão a introduzir no PSCAD/EMTDC® para parametrizar o explosor 1;
 U_0 e U_1 são os valores das tensões (em p.u.) que resultam da intercepção do valor da corrente de pico usada na descarga atmosférica com a curva de A_0 ou A_1 (Figura A3.9) respectivamente;

U_n é a tensão nominal do sistema em que o explosor se encontra (15kV neste caso).

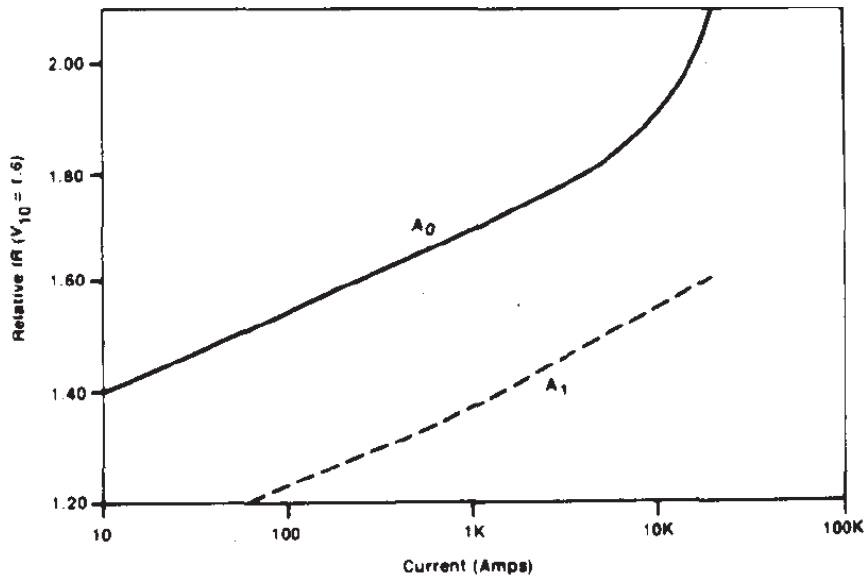


Figura A3.9 - Curva I-V característica (não linear) [24]

Para determinar os restantes parâmetros para o modelo usado, isto é, os valores de C , L_0 , L_1 , R_0 , e R_1 , seguindo o esquema apresentado pelo IEEE, todos os parâmetros anteriormente são modelizados através da altura e do número de descarregadores de sobretensão em paralelo:

$$L_1 = \frac{15.d}{n} [\mu H] \quad (A3.3)$$

$$L_0 = \frac{0.2.d}{n} [\mu H] \quad (A3.4)$$

$$R_1 = \frac{65.d}{n} [\Omega] \quad (A3.5)$$

$$R_0 = \frac{100.d}{n} [\Omega] \quad (A3.6)$$

$$C = \frac{100.d}{n} [pF] \quad (A3.7)$$

em que

d é o valor da altura do descarregador de sobretensão escolhido(mm);

n o número de descarregadores de sobretensão usados em paralelo.

Onda de descarga

A onda da descarga atmosférica é representada por uma função bi-exponencial, com tempo de frente (tf) de 8 μs e tempo de cauda (tq) de 20 μs . Para as descargas incidentes, serão utilizadas descargas com corrente de pico variáveis de 31kA a 100kA. A forma de onda é representada pela Equação (A3.8):

$$I(t) = K \times I_p \times (e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \quad (A3.8)$$

Na Figura A3.10 pode-se ver o modelo representado no PSCAD/EMTDC® para simular a onda de descarga atmosférica.

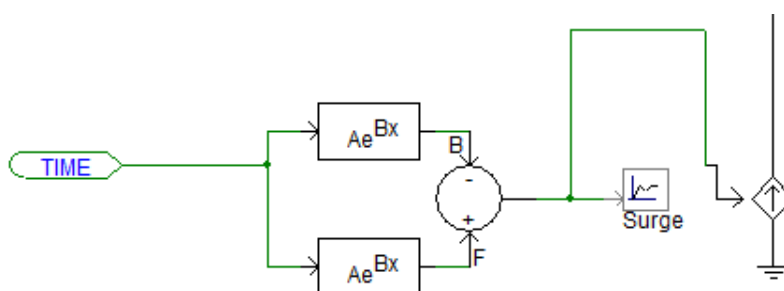


Figura A3.10 - Gerador da descarga atmosférica em PSCAD/EMTDC®

Na Tabela A3.2 encontram-se representadas as características das formas de onda utilizadas nas diversas simulações.

Tabela A3.2 - Ondas de descarga simuladas em PSCAD/EMTDC®

	I_p (kA)	Tempo de frente (μs)	Tempo de cauda (μs)
	10	8	20
Onda Bi-exponencial	31	8	20
	55	8	20
	100	8	20

A forma da onda de descarga atmosférica com uma corrente de pico de 100kA está representada nas Figuras A3.11 e A3.12. Encontra-se representada a onda bi-exponencial da descarga atmosférica em escalas diferentes.

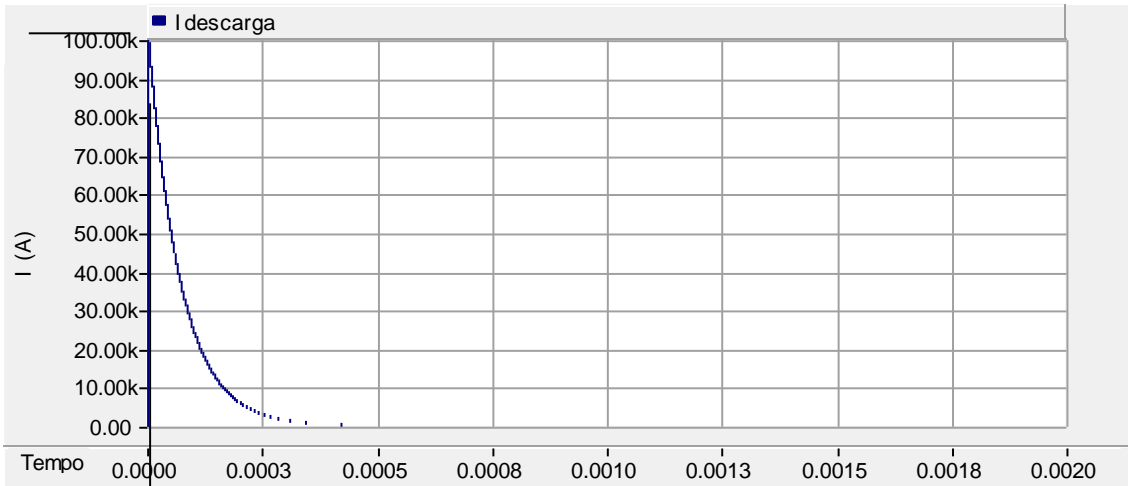


Figura A3.11 - Onda da descarga atmosférica com um $I_p=100kA$

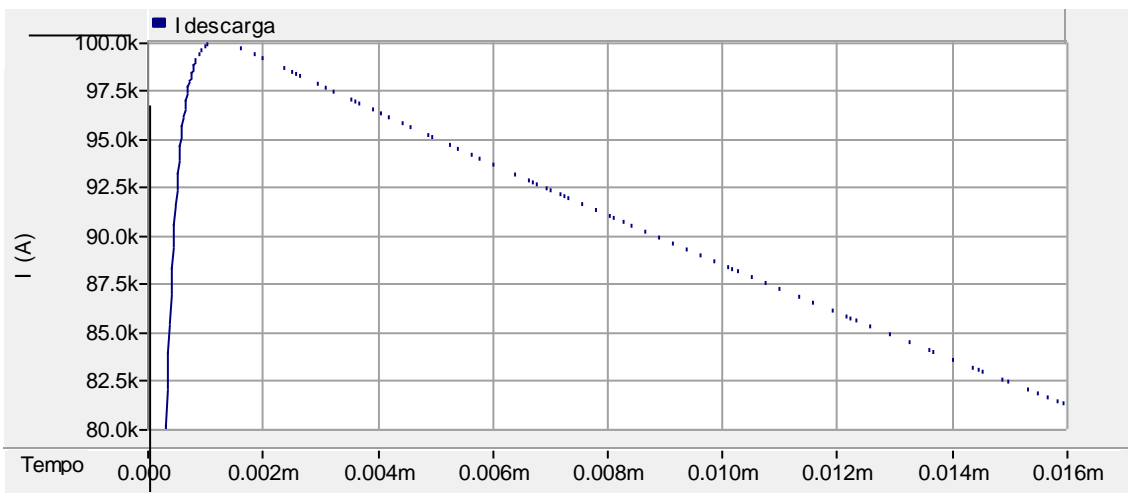


Figura A3.12 - Onda da descarga atmosférica com um $I_p=100kA$ (vista pormenorizada do pico da onda)

Modelos Implementados no PSCAD/EMTDC®

Devido ao tamanho da rede de distribuição de energia eléctrica implementada no software PSCAD/EMTDC®, houve necessidade de a dividir em três partes para expor, como se verifica na Figuras A3.13, A3.14 e A3.15. Foi dividida a rede em secções, a de alta tensão, média tensão e baixa tensão.

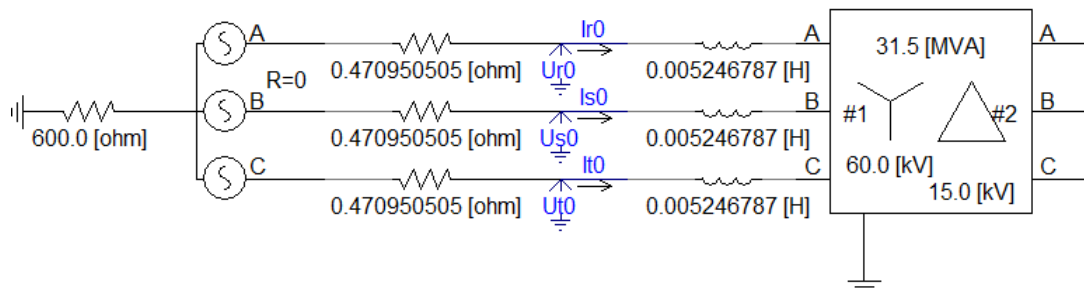


Figura A3.13 - Modelo da rede de distribuição implementado em PSCAD/EMTDC® (parte1)

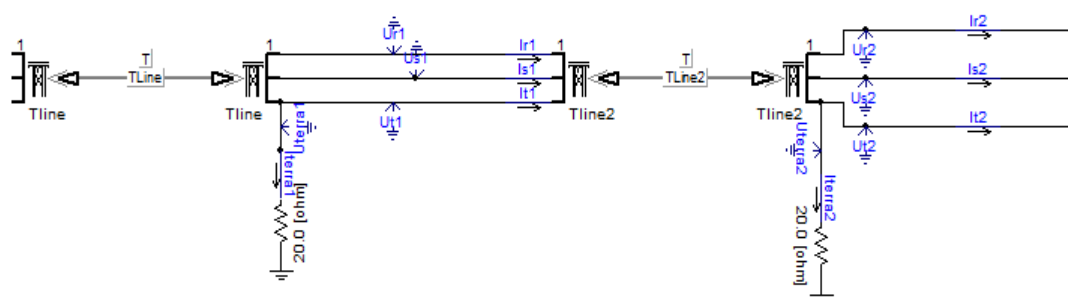


Figura A3.14 - Modelo da rede de distribuição implementado em PSCAD/EMTDC® (parte 2)

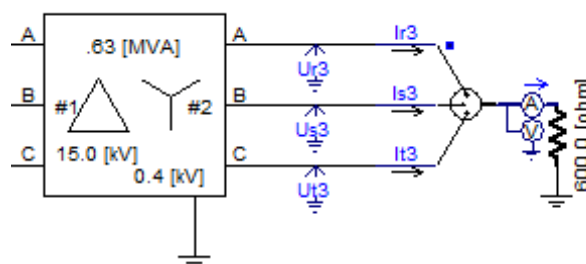


Figura A3.15 - Modelo da rede de distribuição implementado em PSCAD/EMTDC® (parte 3)

Referências Bibliográficas

- [1] EN50341-3-17 (2001). Aspectos Normativos Nacionais (ANN) para Portugal referentes à EN50341-1.
- [2] DRE-C10-001/E (2007). Instalações Eléctricas, Guia de coordenação de isolamento, Regras de execução e montagem, EDP, 2007.
- [3] Lopes, Daniel Henrique Pereira, “Estabelecimento de uma relação entre as actuações das protecções existentes nas linhas aéreas e a ocorrência de incidentes de origem atmosférica.”, 2009.
- [4] "IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination," IEEE Std 1313.2, 1999.
- [5] C. J. Coelho Teixeira, “Estudo e análise de sobretensões de origem atmosférica em linhas aéreas de transmissão de energia eléctrica”, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2005.
- [6] Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Disponível em <http://paginas.fe.up.pt/~jrf/aulas0506/sobretensao/sobretensao.pdf>. Acesso em 23/Abril/2010.
- [7] A. C. Machado e Moura, “TAT Texto Geral”, Apontamentos de Técnicas da Alta tensão, 2008.
- [8] Coelho, Antero João Oliveira, “Desempenho das Linhas Aéreas AT e MAT perante Descargas Atmosféricas”, Junho de 2009.
- [9] Ferreira, José Rui, “Linhas de transmissão”, apontamentos de Sistemas Eléctricos de Energia, 2003.
- [10] Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Disponível em http://paginas.fe.up.pt/~jsaraiva/Textos/Qual_onda.pdf. Acesso em 26/Março/2010.
- [11] Instituto de Meteorologia. Disponível em www.meteo.pt. Acesso em 22/Maio/2010.
- [12] Pinto E., “Projecto, Melhoria e Medição de Terras” Projecto/Seminário/Trabalho Final de Curso, Faculdade de engenharia da universidade do Universidade do Porto, 2005.
- [13] Farag, A.S. "Insulation coordination from the probabilistic point of view," Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on , vol.6, no.2, pp.259-266, Apr 1999.
- [14] Transients in Power Systems. Disponível em <http://www.ece.uidaho.edu/ee/power/ECE524/>. Acesso em 21/Abril/2010.
- [15] PSCAD/EMTDC. Disponível em <https://pscad.com/products/pscad/>. Acesso em 5/Abril/2010.

- [16] Miranda, V, "Princípios de simulação de Monte Carlo", Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Outubro 2007.
- [17] Heilmann, Armando, " Avaliação do sistema de detecção de descargas atmosféricas em VLF - Zeus no Brasil," Departamento de ciências atmosféricas, Universidade de São Paulo, Agosto 2006.
- [18] P. Chowdhuri, Electromagnetic transients in power systems, Research Studies Press Ltd, England, 1996.
- [19] R. B. Anderson, A. J. Eriksson, Lightning parameters for engineering application, *Electra*, nº 69, March 1980, pp. 65-102.
- [20] Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Disponível em <http://paginas.fe.up.pt/~jpl/textos/FEUP.pdf>. Acesso em 7/Junho/2010.
- [21] CIGRE TF 33.01.02, Characterization of lightning for applications in electrical power systems, CIGRE, Brochure 172, December 2000.
- [22] D. Macherras, Prediction of lightning incidence and effects in electrical engineering, *Elect. Eng. Trans., Inst. Eng. Aust, EE-14*, 1978, pp. 73-77.
- [23] CIGRE WG 33-01, Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines, CIGRE, Brochure 63, 1991.
- [24] Pinceti, P.; Giannettoni, M., "A simplified model for zinc oxide surge arresters," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol.14, no.2, pp.393-398, Apr 1999.
- [25] T. Narita, T. Yamada, et al, Observation of current waveshapes of lightning strokes on transmission towers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, n.º1, January 2000, pp. 429-435.
- [26] T. Yamada, T. Narita, et al, Observation and analysis of lightning surges at substations connectec with uhv designed transmission lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, nr. 2, April 2000, pp. 675-683.
- [27] S. Guerrieri, C. A. Nucci, et al, On the influence of elevated strike objects on directly measured and indirectly estimated lightning currents, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, nr. 4, October 1998, pp. 1543-1551.
- [28] G. Le Roy, C. Gary, et al, Les propriétés diélectriques de l' air et les très hautes tensions, Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, nº 51, Paris, 1984.
- [29] P. Popolansky, Frequency distribution of amplitudes of lightning currents, *Electra*, n.º 22, May 1972, pp. 139-147.
- [30] J. A. Gutiérrez, P. Moreno, et al, Fast transients analysis of nonuniform transmission lines through the method of characteristics, *Electric Power and Energy Systems*, n.º 24, 2002, pp. 781-788.
- [31] B. Gustavsen, Frequency-dependent transmission line modeling utilizing transposed conditions, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, nr. 3, July 2002, pp. 834-839.
- [32] J. T. Festas, Sobretensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas aéreas polifásicas, Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1999.
- [33] C. Gary, La foudre- des mythologies antiques à la recherche moderne, Masson, Paris, 1994.

- [34] ABB. Disponível em http://www.rsautomacao.com.br/catalogo/protetor_de_surto/ABB_OVR_PT%20Catalogue.pdf. Acesso em 7/Junho/2010.
- [35] Farag, A.S.; , "Insulation coordination from the probabilistic point of view," Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on , vol.6, no.6, pp.916-916, Dec 1999.
- [36] Shekhar, S.; Dubey, A.; , "Computation of protection zone of a lightning rod using Monte Carlo method," Applied Electromagnetics Conference (AEMC), 2009 , pp.1-4, 14-16 Dec. 2009.
- [37] Liew Ah Choy; Darveniza, M.; Currie, J.R. , "Monte Carlo Determination of the Frequency of Lightning Strokes and Shielding Failures on Transmission Lines," Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on , vol.PAS-90, no.5, pp.2305-2312, Sept. 1971.
- [38] Saran, Marco Aurélio Moreira. "Sobretensões de origem Atmosférica em Linhas de Média Tensão." Itajubá - Minas Gerais, Fevereiro de 2009.