



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

PROTECÇÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA EÓLICA CONTRA DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS

RAFAEL BAPTISTA RODRIGUES
(MESTRE)

TESE PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

Orientador: Doutor João Paulo da Silva Catalão

Co-orientador: Doutor Victor Manuel Fernandes Mendes

FEVEREIRO 2010

Tese realizada sob orientação de
Professor Doutor Eng.º João Paulo da Silva Catalão
e sob co-orientação de
Professor Doutor Eng.º Victor Manuel Fernandes Mendes

Respectivamente, Professor Auxiliar do
Departamento de Engenharia Electromecânica da
UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
e Professor Coordenador com Agregação do
Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação do
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

*Dedicado à Luísa, minha companheira de sempre,
e aos meus filhos Teresa, Miguel e Margarida*

Resumo

Esta tese incide sobre o tema da protecção de sistemas de energia eólica contra descargas eléctricas atmosféricas. Foram disponibilizados, para o propósito desta tese, os registos dos primeiros cinco anos de actividade do sistema automático de detecção de trovoadas do Instituto de Meteorologia. Novos resultados referentes à caracterização da actividade cerúunica sobre o território continental Português são apresentados. É elaborada uma modelação matemática adequada ao estudo da propagação das sobretensões transitórias causadas por DEA. Um novo modelo sobre a protecção de sistemas de energia eólica foi desenvolvido e sujeito a simulação com o programa de computador EMTP-RV. Os resultados da simulação com o EMTP-RV são apresentados e discutidos. Ainda, foi desenvolvido um novo programa de computador, LPS 2008. O LPS 2008 permite efectuar a análise de risco de danos causados por DEA de acordo com a norma internacional IEC 62305-2. O LPS 2008 simula o modelo da esfera rolante proposto pela IEC 62305, identificando os pontos vulneráveis de uma estrutura e permitindo ao projectista conceber um sistema de protecção eficaz.

Palavras-chave

Modelação e Simulação

Parques Eólicos

Protecção contra DEA

Protecção contra Sobretensões Transitórias

Análise do Risco

Método da Esfera Rolante

Abstract

This thesis focuses on the lightning protection of wind power plants. For the purpose of this thesis, the records of the first five years of operation of the Lightning Location System were made available by the Portuguese Institute of Meteorology. New results concerning the characterization of the lightning activity over the continental territory of Portugal are presented. A mathematical model suitable for studying the transient overvoltages caused by lightning is provided. A new lightning protection wind turbine model was developed for the simulations carried out with the computer program EMTP-RV. The results of the simulation with EMTP-RV are presented and discussed. A new computer program, LPS 2008, was developed for the purpose of this thesis. LPS 2008 is able to perform risk analysis due to lightning damages in accordance with IEC 62305-2. LPS 2008 is also able to simulate the rolling sphere model proposed by IEC 62305, identifying the vulnerable points on a given structure and enabling the design of a reliable lightning protection system.

Keywords

Modelling and Simulation

Wind Power Plants

Lightning Protection

Transient Overvoltages Protection

Risk Analysis

Rolling Sphere Method

Agradecimentos

Ao Professor Doutor João Paulo da Silva Catalão, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade da Beira Interior, principal responsável como orientador científico, desejo expressar o meu profundo agradecimento por tantos motivos que tornariam este texto demasiado extenso. De facto, o Professor Doutor João Paulo da Silva Catalão não se poupou a esforços desde que nos conhecemos em Agosto de 2007. Incansável na procura de bibliografia de apoio, excelente na revisão de textos, na escolha de conferências ou revistas para divulgação dos trabalhos, e inexcedível no apoio e motivação constantes. Foi um enorme privilégio para mim poder trabalhar ao seu lado e contar com a sua amizade e será certamente um privilégio para qualquer aluno tê-lo como Professor. Bem-haja Prof. Catalão.

Ao Professor Doutor Victor Manuel Fernandes Mendes, Professor Coordenador com Agregação do Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, responsável como co-orientador científico, desejo expressar o meu agradecimento por ter acreditado neste projecto desde o seu início, por me ter ajudado a encontrar o caminho para o concretizar e por todos os momentos de discussão, aconselhamento, partilha de conhecimento e amizade.

Ao Professor Doutor Carlos Manuel Pereira Cabrita, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade da Beira Interior, desejo expressar o meu agradecimento pelo caloroso acolhimento na Universidade da Beira Interior e pelo interesse continuado que manteve sobre os resultados do trabalho de investigação.

Ao Professor Doutor José Carlos Lourenço Quadrado, Professor Coordenador com Agregação do Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, desejo expressar o meu agradecimento pela ajuda e estímulo constante na prossecução dos meus objectivos quer académicos quer profissionais.

Ao Doutor Victor Manuel Martins Soares Prior, Coordenador do Processamento e Previsão Numérica do Estado do Tempo do Instituto de Meteorologia, desejo expressar o meu agradecimento pela oportunidade de poder trabalhar em primeira mão informação do sistema automático de detecção de trovoadas.

À Parque Expo 98, S.A. e à Parque Expo – Gestão Urbana do Parque das Nações, S.A., desejo expressar o meu agradecimento pela compreensão, estímulo e apoio financeiro com que me agraciaram.

Ainda, à Professora Doutora M. T. Correia de Barros, do Instituto Superior Técnico, à Professora Doutora Mónica Aguado, da Universidade Pública de Navarra, à Dr.^a Sandra Correia, do Instituto de Meteorologia e a todos aqueles que contribuíram directa ou indirectamente para a elaboração deste trabalho de doutoramento, desejo expressar o meu agradecimento.

Índice

Capítulo 1	Introdução	1
	1.1 Enquadramento	2
	1.2 Motivação	10
	1.3 Estado da Arte	14
	1.4 Organização do Texto	24
	1.5 Notação	26
Capítulo 2	Descarga Eléctrica Atmosférica	27
	2.1 Introdução	28
	2.2 Formação das Nuvens de Trovoada	29
	2.3 Desenvolvimento da DEA	32
	2.4 Processo de Impacto	37
	2.5 Parâmetros da DEA	40
Capítulo 3	Caracterização da Actividade Cerâmica em Portugal Continental	49
	3.1 Introdução	50
	3.2 Sistemas de Localização de DEA	50
	3.3 Sistema de Localização de DEA em Portugal	59
	3.4 Método de Análise	63
	3.5 Resultados e Discussão	66
	3.6 Conclusões	78

Capítulo 4	Protecção dos Parques Eólicos contra Efeitos Indirectos das DEA	82
4.1	Introdução	83
4.2	Modelação Matemática	84
4.3	Ferramenta Computacional EMTP-RV	91
4.4	Resultados e Discussão	93
4.5	Conclusões	115
Capítulo 5	Protecção dos Parques Eólicos contra Efeitos Directos das DEA	116
5.1	Introdução	117
5.2	Análise do Risco de Danos	121
5.3	Modelo Electrogeométrico e RSM	126
5.4	Ferramenta Computacional LPS 2008	130
5.5	Resultados e Discussão	137
5.6	Conclusões	148
Capítulo 6	Conclusão	150
6.1	Contribuições	151
6.2	Publicações	153
6.3	Direcções de Investigação	157
	Referências Bibliográficas	158

Apêndice A	172
A.1 Caracterização da Actividade Cerâmica em Portugal Continental	173
Apêndice B	186
B.1 Introdução ao Programa LPS 2008	187
B.2 Desenhar Objectos em 3D	188
B.3 Obtenção das Áreas de Influência	197
B.4 Executar o Programa LPS 2008	200
B.5 Simulação do Modelo RSM com o LPS 2008	212

Lista de Figuras

Fig. 1.1	Saldo importador de produtos energéticos entre 2000 e 2008 (Fonte: DGEG)	2
Fig. 1.2	Repartição da produção de energia eléctrica em 2008 e 2009 (Fonte: REN)	4
Fig. 1.3	Atlas eólico mundial (Fonte: www.climate-charts.com/images/NasaWindSpeed)	5
Fig. 1.4	Atlas eólico de Portugal (Fonte: INETI)	6
Fig. 1.5	DEA atinge aerogerador no parque eólico de Torres Vedras em 09/09/2009	12
Fig. 1.6	Danos causados pela DEA na <i>nacelle</i> do aerogerador atingido no parque eólico de Torres Vedras em 09/09/2009	13
<hr/>		
Fig. 2.1	DEA sobre o Parque das Nações em 09/09/2009	29
Fig. 2.2	Mecanismos de elevação do ar quente e húmido na atmosfera (Fonte: IM)	30
Fig. 2.3	Classificação das nuvens (Fonte: IM)	31
Fig. 2.4	Relação entre a frequência e o método de localização das DEA [19]	35

Fig. 2.5	a) DEA fotografada com uma câmara em repouso. b) DEA fotografada com uma câmara em movimento [24]	37
Fig. 2.6	Processos envolvidos numa DEA nuvem-solo negativa [24]	38
Fig. 2.7	Definição dos parâmetros do arco-de-retorno curto ($T_2 < 2$ ms) [5]	40
Fig. 2.8	Definição dos parâmetros do arco-de-retorno longo (2 ms $< T_{\text{long}} < 1$ s) [5]	41
Fig. 2.9	Possíveis combinações de arcos-de-retorno em DEA descendentes (típicas em terrenos planos e estruturas baixas) [5]	41
Fig. 2.10	Densidade de probabilidade de i , segundo a IEC 61663-1, CIGRE e Eriksson [27]	43
Fig. 2.11	Distribuição da frequência acumulada dos parâmetros da DEA [5].....	45
<hr/>		
Fig. 3.1	Situação óptima para o método DF [33]	51
Fig. 3.2	a) Método TOA da direcção hiperbólica. b) Exemplo de ambiguidade [34]	53
Fig. 3.3	Exemplo de localização do algoritmo IMPACT [34]	54
Fig. 3.4	Em cima: representação altitude/tempo de DEA nuvem- solo; em baixo: representação altitude/distância horizontal em direcção a norte de DEA [18]	57

Fig. 3.5	Em cima: representação altitude/distância horizontal em direcção a norte de DEA nuvem-nuvem; em baixo: representação XY de DEA [18]	58
Fig. 3.6	Mapa de nível isoceraunico de Portugal continental, desde 1961 a 1990 (Fonte: IM)	60
Fig. 3.7	Detector instalado em Braga e aspecto das antenas electromagnéticas (Fonte: IM)	62
Fig. 3.8	Localização actual dos detectores IMPACT e expansão prevista ao território insular (Fonte: IM)	62
Fig. 3.9	Precisão de localização e eficiência de detecção para DEA maiores que 5 kA (Fonte: IM)	62
Fig. 3.10	Aspecto da visualização obtida em 29/10/2002 (Fonte: IM)	63
Fig. 3.11	Agrupamento dos registos segundo critérios de validação	64
Fig. 3.12	Áreas de trabalho consideradas	65
Fig. 3.13	Aspecto de um ficheiro de dados ASCII do IM	66
Fig. 3.14	DEA em função da latitude em 2007	69
Fig. 3.15	DEA em função da longitude em 2007	70
Fig. 3.16	DEA em função do mês na região B em 2007	71
Fig. 3.17	Probabilidade acumulada do pico de corrente sobre a região B	72

Fig. 3.18	Mapa GFD global de Portugal de 2003 a 2006 (Fonte: IM)	74
Fig. 3.19	Mapas GFD de Portugal com DEA positivas de 2003 a 2006 (Fonte: IM)	75
Fig. 3.20	Mapas GFD de Portugal com DEA negativas de 2003 a 2006 (Fonte: IM)	76
Fig. 3.21	Mapa orográfico de Portugal (Fonte: IGP)	78
<hr/>		
Fig. 4.1	Circuito equivalente de uma linha de transmissão considerada com parâmetros distribuídos	87
Fig. 4.2	Pás do rotor do aerogerador (Fonte: Enercon)	94
Fig. 4.3	Sistema de accionamento do aerogerador (Fonte: Enercon)	94
Fig. 4.4	Ligação do aerogerador ao transformador (Fonte: Enercon)	95
Fig. 4.5	Esquema eléctrico da torre eólica (Fonte: Siemens)	96
Fig. 4.6	Esquema eléctrico equivalente em EMTP-RV da Fig.4.5 em funcionamento normal	98
Fig. 4.7	Modelo da linha de parâmetros distribuídos CP	100
Fig. 4.8	Formas de onda da tensão: a) á saída do gerador (m2); b) à saída do transformador elevador (m6, 7, 9); c) à saída do transformador auxiliar (m4)	104

Fig. 4.9	Esquema eléctrico equivalente em EMTP-RV da Fig.4.5 com DEA indirecta	105
Fig. 4.10	Formas de onda da sobretensão resultantes da simulação em EMTP-RV do esquema da Fig.4.9: a) á saída do gerador (m2); b) à saída do transformador elevador (m6, 7, 9); c) à saída do transformador elevador (m1); d) à saída do transformador auxiliar (m4)	106
Fig. 4.11	Esquema eléctrico equivalente em EMTP-RV da Fig.4.5 com DEA indirecta e DPST quase idealmente ligado	107
Fig. 4.12	Formas de onda da sobretensão resultantes da simulação em EMTP-RV do esquema da Fig.4.11: a) á saída do gerador (m2); b) à saída do transformador elevador (m1); c) à saída do transformador auxiliar (m4)	108
Fig. 4.13	Esquema eléctrico equivalente em EMTP-RV da Fig.4.5 com DEA indirecta e DPST idealmente ligado	109
Fig. 4.14	Formas de onda da sobretensão resultantes da simulação em EMTP-RV do esquema da Fig.4.13: a) á saída do gerador (m2); b) à saída do transformador elevador (m1); c) à saída do transformador auxiliar (m4)	110
Fig. 4.15	Esquema eléctrico com dois aerogeradores	111
Fig. 4.16	Esquema eléctrico equivalente em EMTP-RV da Fig.4.15 com ocorrência de uma DEA indirecta junto a uma das torres	112

Fig. 4.17	Formas de onda da sobretensão resultantes da simulação em EMTP-RV do esquema da Fig.4.16: a) à saída do transformador elevador (m1); b) à saída do transformador auxiliar (m4); c) à saída do transformador elevador (m16); d) à saída do transformador auxiliar (m12)	113
Fig. 4.18	Formas de onda da sobretensão obtidas para esquema da Fig.4.16 com $I = 200$ kA: a) à saída do transformador elevador (m1); b) à saída do transformador auxiliar (m4); c) à saída do transformador elevador (m16)	114
<hr/>		
Fig. 5.1	Capacidade instalada na Europa em Finais de 2008 [73]	117
Fig. 5.2	Capacidade instalada e acumulada em Portugal (Junho de 2009 [73])	118
Fig. 5.3	Localização dos parques eólicos em Portugal (Junho de 2009 [73])	118
Fig. 5.4	Modelo E-126 da Enercon (Fonte: Enercon)	119
Fig. 5.5	Aplicação do modelo electrogeométrico à protecção de um condutor de fase de uma linha aérea [83]	128
Fig. 5.6	Ecrã de boas-vindas do LPS 2008	131
Fig. 5.7	LPS 2008 a ser executado com o AutoCAD	132
Fig. 5.8	Um dos ecrãs de entrada de dados no LPS 2008	134

Fig. 5.9	Fluxograma para decisão de instalação de medidas de protecção adicionais no LPS 2008	135
Fig. 5.10	Ecrã para simulação do RSM no LPS 2008	136
Fig. 5.11	Aerogerador modelado em 3D no AutoCAD	138
Fig. 5.12	Resultado da simulação do RSM com o LPS 2008 ao aerogerador	139
Fig. 5.13	Esquema eléctrico equivalente em EMTP-RV da Fig.4.5 com DEA directa	139
Fig. 5.14	Formas de onda da sobretensão resultantes da simulação em EMTP-RV do esquema da Fig.5.13: a) á saída do gerador (m2); b) à saída do transformador elevador (m6, 7, 9); c) à saída do transformador elevador (m1); d) à saída do transformador auxiliar (m4)	140
Fig. 5.15	Esquema eléctrico equivalente em EMTP-RV da Fig.4.5 com DEA directa e com DPST quase idealmente ligado	141
Fig. 5.16	Formas de onda da sobretensão resultantes da simulação em EMTP-RV do esquema da Fig.5.15: a) á saída do gerador (m2); b) à saída do transformador elevador (m1); c) à saída do transformador auxiliar (m4)	142
Fig. 5.17	Esquema eléctrico equivalente em EMTP-RV da Fig.4.5 com DEA directa e com DPST idealmente ligado	143

Fig. 5.18	Formas de onda da sobretensão resultantes da simulação em EMTP-RV do esquema da Fig.14: a) á saída do gerador (m2); b) à saída do transformador elevador (m1); c) à saída do transformador auxiliar (m4) 144
Fig. 5.19	Esquema eléctrico equivalente em EMTP-RV da Fig.4.15 com ocorrência de uma DEA directa numa das torres 145
Fig. 5.20	Formas de onda da sobretensão obtidas para esquema da Fig.5.19 com $I = 10$ kA: a) à saída do transformador elevador (m1); b) à saída do transformador auxiliar (m4); c) à saída do transformador elevador (m16); d) à saída do transformador auxiliar (m12) 146
Fig. 5.21	Formas de onda da sobretensão obtidas para esquema da Fig.5.19 com $I = 200$ kA: a) à saída do transformador elevador (m1); b) à saída do transformador auxiliar (m4); c) à saída do transformador elevador (m16); d) à saída do transformador auxiliar (m12) 147
<hr/>	
Fig. A.1	DEA em função da latitude em 2003 173
Fig. A.2	DEA em função da latitude em 2004 174
Fig. A.3	DEA em função da latitude em 2005 174
Fig. A.4	DEA em função da latitude em 2006 175
Fig. A.5	DEA em função da longitude em 2003 175

Fig. A.6	DEA em função da longitude em 2004	176
Fig. A.7	DEA em função da longitude em 2005	176
Fig. A.8	DEA em função da longitude em 2006	177
Fig. A.9	DEA em função do mês na região A em 2003	178
Fig. A.10	DEA em função do mês na região A em 2004	179
Fig. A.11	DEA em função do mês na região A em 2005	179
Fig. A.12	DEA em função do mês na região A em 2006	180
Fig. A.13	DEA em função do mês na região A em 2007	180
Fig. A.14	DEA em função do mês na região B em 2003	181
Fig. A.15	DEA em função do mês na região B em 2004	181
Fig. A.16	DEA em função do mês na região B em 2005	182
Fig. A.17	DEA em função do mês na região B em 2006	182
Fig. A.18	DEA em função do mês na região C em 2003	183
Fig. A.19	DEA em função do mês na região C em 2004	183
Fig. A.20	DEA em função do mês na região C em 2005	184
Fig. A.21	DEA em função do mês na região C em 2006	184
Fig. A.22	DEA em função do mês na região C em 2007	185

Fig. B.1	a) Vista em planta do edifício b) Vista em perspectiva isométrica	192
Fig. B.2	Edifício complexo pretendido	193
Fig. B.3	Resultado após construção das duas caixas	193
Fig. B.4	Resultado após executar “Union”	194
Fig. B.5	a) Aspecto das duas cunhas b) Resultado após o comando “Union”	195
Fig. B.6	Aspecto de todas as cunhas	195
Fig. B.7	a) O efeito do comando “Slice” b) Aspecto de todas as cunhas após o comando “Slice”	195
Fig. B.8	Aspecto final do telhado	196
Fig. B.9	Aspecto final da portaria	196
Fig. B.10	Desenho 3D respeitante ao edifício da Fig. B.1, mostrando as áreas de influência	197
Fig. B.11	Resultado do comando “Arc Start Center End”	198
Fig. B.12	Resultado do comando “Trim”	199
Fig. B.13	Ecrã de “Boas-Vindas” do LPS 2008	201
Fig. B.14	Ecrã inicial do LPS 2008	201
Fig. B.15	Análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a BS 6651	202

Fig. B.16	Entrada de dados para análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 61662, ecrã D1	203
Fig. B.17	Entrada de dados para análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 61662, ecrã D2	204
Fig. B.18	Entrada de dados para análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 61662, ecrã D3	204
Fig. B.19	Entrada de dados para análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 61662, ecrã D4	205
Fig. B.20	Entrada de dados para análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 61662, ecrã D5	205
Fig. B.21	Resultados da análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 61662, ecrã R1	206
Fig. B.22	Resultados da análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 61662, ecrã R2	206
Fig. B.23	Conclusões da análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 61662, ecrã C	207
Fig. B.24	Conclusões da análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 61662 com IPR de nível III, ecrã C	208

Fig. B.25	Entrada de dados para análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 62305-2, ecrã D1	209
Fig. B.26	Entrada de dados para análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 62305-2, ecrã D2	209
Fig. B.27	Entrada de dados para análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 62305-2, ecrã D3	210
Fig. B.28	Entrada de dados para análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 62305-2, ecrã D4	210
Fig. B.29	Resultados da análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 62305-2, ecrã R1	211
Fig. B.30	Conclusões da análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 62305-2 com IPR de nível IV, ecrã C1	211
Fig. B.31	Conclusões da análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 62305-2 com IPR e DPST de nível IV, ecrã C1	212
Fig. B.32	Simulação do RSM a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 62661 com IPR de nível III, ecrã RSM	213

Fig. B.33	Resultado da simulação do RSM a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 62661 com IPR de nível I e IV	214
Fig. B.34	Igreja dos Pastorinhos modelada em 3D com o AutoCAD	215
Fig. B.35	Resultado da simulação do RSM à Igreja dos Pastorinhos	216
Fig. B.36	IPR na igreja dos Pastorinhos	217

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Classificação oficial das sobretensões até 1993, segundo a IEC	44
Tabela 2.2	Valores dos parâmetros da DEA de CIGRE (Electra N.º 41 ou N.º 69) e [5]	46
Tabela 2.3	Valores de μ e σ_{log} de CIGRE (Electra N.º 41 ou N.º 69) [5]	47
<hr/>		
Tabela 3.1	Agrupamento dos registos segundo critérios de validação	64
Tabela 3.2	Valor absoluto e relativo de DEA por ano e por polaridade....	67
Tabela 3.3	Valores de GFD e T_d	68
<hr/>		
Tabela 5.1	Valores típicos para R_T	125
Tabela 5.2	Dados típicos para caracterizar uma estrutura	133
Tabela 5.3	Dados típicos para caracterizar a instalação eléctrica da estrutura, o seu equipamento electrónico e a linha de abastecimento de energia	133
Tabela 5.4	Dados típicos para caracterizar as zonas de uma estrutura	134

Lista de Siglas

2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
AT	Alta Tensão
BOD	<i>Breakover Diode</i>
BT	Baixa Tensão
CIGRE	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>
CP	<i>Constant Parameter</i>
CRDF	<i>Cathode Ray Direction Finder</i>
DEA	Descarga Eléctrica Atmosférica
DF	<i>Direction Finders</i>
DGEG	Direcção Geral de Energia e Geologia
DPST	Dispositivos de Protecção contra Sobretensões Transitórias
EMTP	<i>Electro-Magnetic Transient Program</i>
GAI	<i>Global Atmospherics Inc.</i>
GDT	<i>Gas Discharge Tube</i>
GFD	<i>Ground Flash Density</i>
IE	Instalação Eléctrica

IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IGP	Instituto Geográfico Português
IM	Instituto de Meteorologia
IMPACT	<i>Improved Accuracy Using Combined Technology</i>
INEGI	Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
INERIS	<i>Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques</i>
INETI	Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
IPR	Instalação de Pára-Raios
ktep	Quilo Toneladas Equivalentes de Petróleo
LF	<i>Low Frequency</i>
LLS	<i>Lightning Location System</i>
LPATS	<i>Lightning Position and Tracking System</i>
MAT	Muito Alta Tensão
MOV	<i>Metal Oxide Varistor</i>
MT	Média Tensão
M€	Milhões de Euros
NS	Norte-Sul
PT	Posto de transformação
QE	Quadro de Entrada

REN	Rede Eléctrica Nacional
RSM	Modelo da Esfera Rolante
TOA	<i>Time of Arrival</i>
TSS	<i>Tyristhor Surge Supressor</i>
UE	União Europeia
VLf	<i>Very Low Frequency</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
WE	<i>West-East</i>

Lista de Símbolos

A	Área
α	Constante de atenuação
B	Densidade de fluxo magnético
β	Desvio padrão logaritmico ou constante de fase
C	Capacidade
C_d	Factor de localização
C_e	Factor ambiental
C_t	Factor de correcção transformador MT/BT
c	Velocidade da luz no vácuo
D	Densidade de fluxo eléctrico
d	Distância ou profundidade de enterramento
δ	Profundidade de penetração
E	Intensidade do campo eléctrico
ε	Permitividade dieléctrica do meio
ε_0	Permitividade dieléctrica do vácuo
ε_r	Permitividade dieléctrica relativa do meio

f	Frequência
Φ	Fluxo magnético
G	Condutância
H	Intensidade do campo magnético
H	Altura a que se encontra o condutor do solo
i	Intensidade da corrente eléctrica
I	Valor de pico da intensidade da corrente eléctrica
J_c	Densidade da corrente
K	Escarpamento
K_{S1}	Coefficiente da presença de blindagem
K_{S2}	Coefficiente de equipotencialização
K_{S3}	Coefficiente da instalação dos cabos
K_{S4}	Coefficiente da tensão suportada U_w
L	Coefficiente de auto-indução ou perda média em consequência de uma DEA capaz de influenciar a estrutura ou o serviço
ℓ	Comprimento
M	Valor médio
μ	Permeabilidade magnética do meio
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo

μ_r	Permeabilidade magnética relativa do meio
N	Número anual de DEA capaz de influenciar a estrutura ou o serviço
P	Probabilidade de uma DEA com influência na estrutura ou serviço causar danos
Q	Carga eléctrica
R	Resistência ou risco global de danos causados por DEA
r_{cd}	Raio do condutor
ρ	Resistividade do solo
ρ_v	Densidade volumétrica de carga eléctrica
S_m	Incremento máximo
s	Secção do condutor
σ	Condutividade
σ_{log}	Dispersão
t	Tempo
t_f	Tempo de frente de onda
t_h	Tempo de meia onda
u	Tensão eléctrica
V	Potencial eléctrico

v	Velocidade de propagação de uma onda móvel numa linha de transmissão
W	Energia
ω	Frequência angular
x	Espaço
Z	Impedância
Z_0	Impedância impulsiva

CAPÍTULO

1

Introdução

Neste capítulo é abordado e enquadrado o tema da energia eólica nos contextos ambiental, energético e potencial de desenvolvimento. O recente e enorme crescimento de potência instalada em parques eólicos, no mundo em geral e na Europa e Portugal em particular, as descargas eléctricas atmosféricas, enquanto causa principal de danos destes sistemas, e a possibilidade de utilizar os registos dos primeiros anos de funcionamento do sistema de detecção de trovoadas do Instituto de Meteorologia, são alguns dos factores de motivação para abordar este tema. Apresenta-se uma revisão do estado da arte e é descrita a forma como o texto está organizado. Finalmente, apresenta-se a notação utilizada nesta tese.

1.1 Enquadramento

A assinatura do Protocolo de Quioto em 1997 aumentou significativamente a reflexão sobre as questões ambientais no que concerne às decisões políticas quer a nível mundial quer a nível de cada nação, sobre a mitigação das emissões antropogénicas dos gases responsáveis pelo efeito de estufa. O protocolo entrou em vigor em 16 de Fevereiro de 2005 e fixou metas para os diversos países signatários até 2012. Assim, para os países da União Europeia (UE), no global foi fixada uma redução de 8% face aos níveis de emissão verificados em 1990.

A evolução nacional do saldo importador de produtos energéticos entre 2000 e 2008, de acordo com a factura energética de 2008 da responsabilidade da Direcção Geral de Energia e Geologia (DGEG), é apresentado na Fig. 1.1.

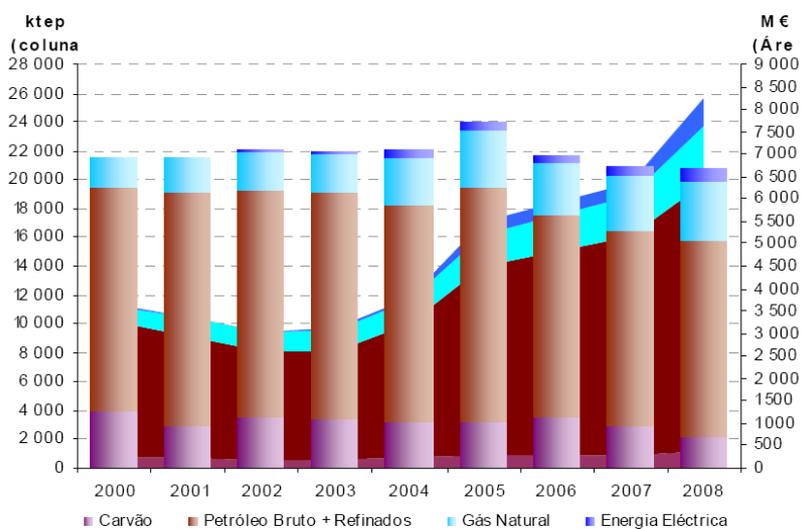


Fig. 1.1 – Saldo importador de produtos energéticos entre 2000 e 2008 (Fonte: DGEG)

Na Fig. 1.1 as colunas representam o saldo importador em quilo toneladas equivalentes de petróleo (ktep) e as áreas representam o saldo importador em milhões de euros (M€).

O petróleo bruto e os seus refinados representaram em 2008 cerca de 77 % do saldo importador em M€ (Fonte: DGEG), o que representa uma forte dependência exterior de produtos energéticos não renováveis com responsabilidade no efeito de estufa.

O Governo Português aprovou uma estratégia nacional para a energia expressa na resolução do Conselho de Ministros de Outubro de 2005. O Governo Português empenhado na redução das emissões de CO₂, no aumento da qualidade dos serviços energéticos e em promover a concorrência, definiu nesta estratégia as grandes linhas a implementar no sector da energia eléctrica. Esta estratégia estabeleceu vários objectivos para o sector, nomeadamente a expansão do investimento em energias renováveis e a promoção da eficiência energética.

Assim, o Governo estabeleceu na Resolução do Conselho de Ministros n.º 1/2008 novas metas para a energia eólica:

- Aumentar em 1950 MW a capacidade instalada, até 2012, perfazendo um total de 5100 MW em que 600 MW serão por renovação do equipamento;
- Criar um “cluster” industrial e tecnológico para acelerar a taxa de instalação de capacidade em energia eólica.

Em 2009, o consumo de energia eléctrica foi de 49,9 TWh, segundo informação da Rede Eléctrica Nacional (REN), registando a primeira evolução anual negativa, de 1,8 %, desde 1981. A produção em regime especial cresceu 25 % e abasteceu 29 % do consumo, dos quais 15 % se deveram às eólicas que reforçaram a potência em 700 MW. Em particular, no dia 8 de Novembro de 2009 os aproveitamentos em energia eólica abasteceram cerca de 50 % do consumo, tendo o valor médio do abastecimento desse mês sido de 24 %. O saldo importador foi o mais baixo desde 2003 e abasteceu 10 % do consumo, como é apresentado na Fig. 1.2.

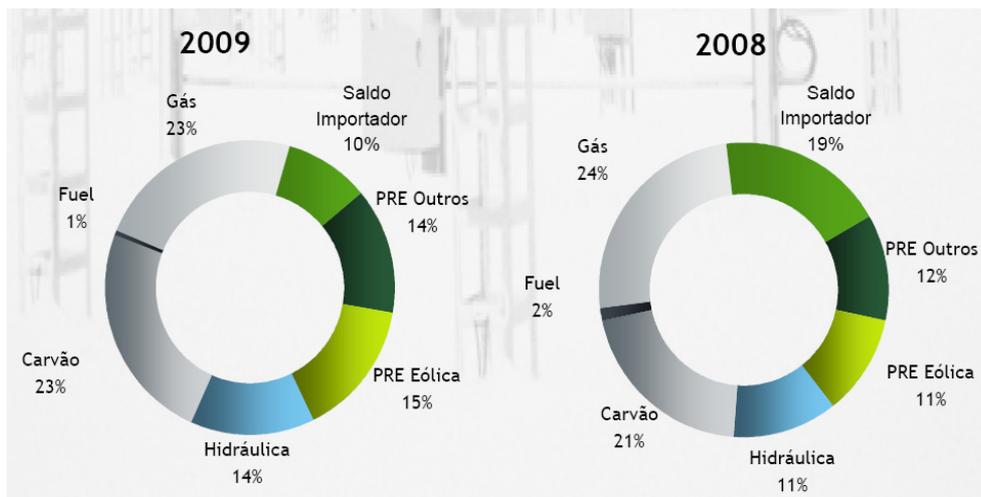


Fig. 1.2 – Repartição da produção de energia eléctrica em 2008 e 2009 (Fonte: REN)

Ainda pela Fig. 1.2, comparando o ano de 2008 com 2009 é observada uma diminuição do saldo importador em cerca de 9 %, o qual se deveu principalmente ao aumento da produção eólica.

A energia eólica é uma forma de energia que deriva da conversão da energia solar devido ao desequilíbrio no aquecimento da atmosfera provocado pelo sol. Este desequilíbrio está associado às irregularidades da superfície terrestre e ao movimento de rotação da Terra. O regime dos ventos é influenciado pela forma do solo, pelos planos de água e pelo coberto vegetal.

Desde há alguns milhares de anos que a energia eólica é utilizada. Há 5000 anos que é utilizada na navegação no rio Nilo, ou em bombagem de água na China, muitos séculos antes da Era Cristã. Em Portugal é frequente encontrar no cume dos montes as ruínas de moinhos de vento que deixaram de funcionar há décadas devido ao progresso tecnológico. Contudo, em muitas quintas ainda se podem encontrar moinhos de vento para bombagem de água.

O que apelidamos de aproveitamento de energia eólica está associado com o processo pelo qual a energia cinética do vento é utilizada na conversão para a forma de energia mecânica.

Esta energia mecânica pode ser utilizada para muitas actividades tais como: moer grão, bombear água ou accionar um gerador que a converte em energia eléctrica. A energia eléctrica assim obtida pode ser injectada na rede eléctrica para ser distribuída ao consumidor, constituindo os aproveitamentos ditos de “ligados à rede”.

O aproveitamento da energia eólica também pode ter uma aplicação localizada, ou seja, utilizada apenas para fornecer electricidade num determinado local situado longe da rede eléctrica de distribuição aos consumidores, constituindo os aproveitamentos ditos de “autónomos”.

O conhecimento do potencial eólico é um factor determinante na escolha do local de instalação dos aproveitamentos da energia eólica. O atlas eólico mundial é apresentado na Fig. 1.3.

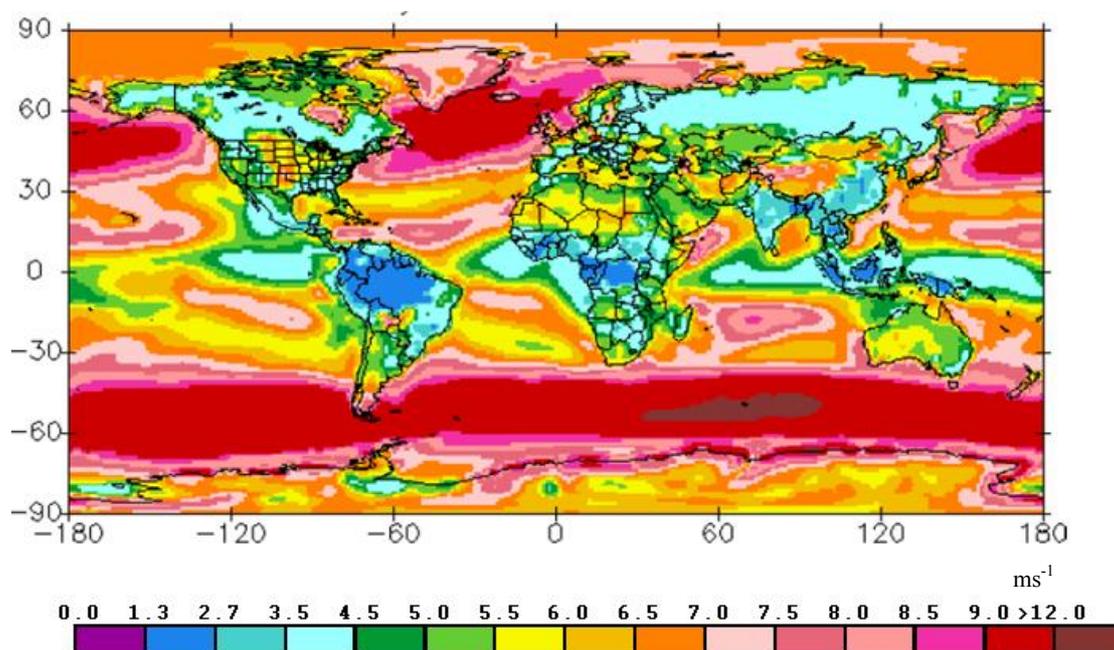


Fig. 1.3 – Atlas eólico mundial (Fonte: www.climate-charts.com/images/NasaWindSpeed)

O atlas da Fig. 1.3 representa a velocidade média anual do vento medida cinquenta metros acima do solo ou da superfície do mar.

O departamento de energias renováveis do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI) produziu uma base de dados do potencial eólico do vento em Portugal, que apresenta as características físicas e energéticas do escoamento atmosférico num conjunto de 57 locais em Portugal continental e uma folha de cálculo simplificada, que permite, em função do investimento, avaliar a viabilidade económica. A Fig. 1.4 apresenta um atlas eólico de Portugal sessenta metros acima do solo ou da superfície do mar.

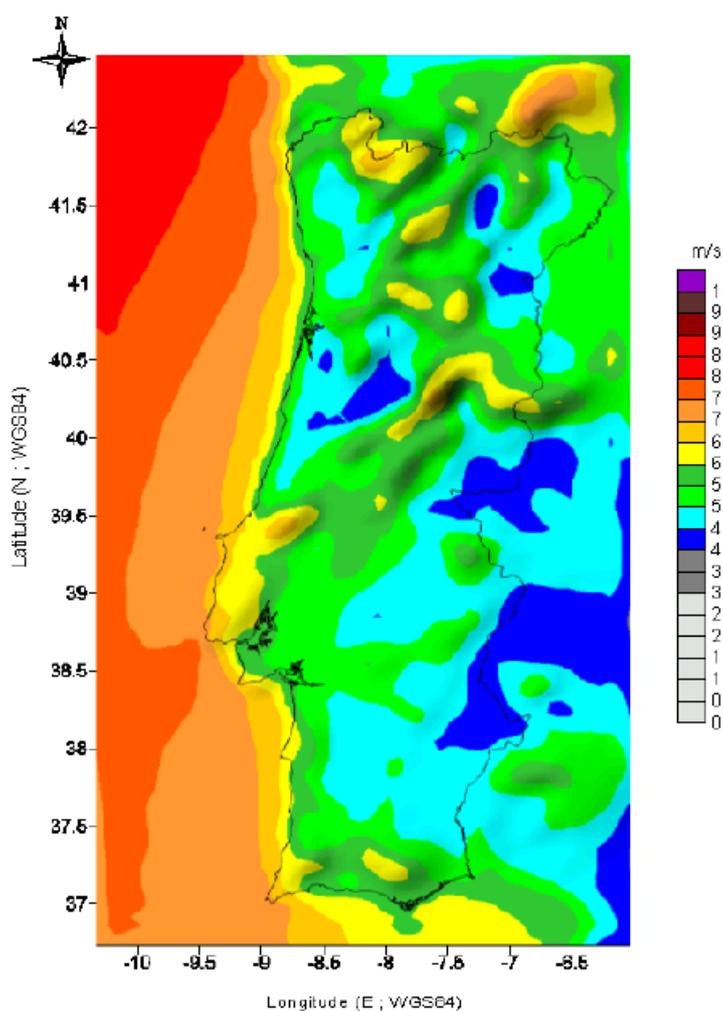


Fig. 1.4 – Atlas eólico de Portugal (Fonte: INETI)

Em Portugal, devido à sua situação geográfica e geomorfologia, apenas nas zonas montanhosas a velocidade e a regularidade do vento é susceptível de aproveitamento energético.

A maior parte dos locais com essas características favoráveis situam-se a norte do rio Tejo, e a sul junto à Costa Vicentina e Ponta de Sagres, sendo raros os locais favoráveis na extensa planície alentejana.

Ainda, a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto em colaboração com o Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI), o Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto e o *Research Centre for Wind Energy and Atmospheric Flows* desenvolveram o programa VENTOS, que é utilizado para simulação computacional do comportamento do escoamento do vento sobre solos complexos com ou sem arborização. A base de dados do potencial eólico, a folha de cálculo simplificada e o programa Ventos são ferramentas importantes para o conhecimento do potencial eólico, mas outras são ainda necessárias, como é o caso do programa de computador desenvolvido nesta tese no âmbito da protecção dos aerogeradores.

Os aerogeradores podem ser classificados em dois tipos: de eixo horizontal, como os antigos moinhos; e de eixo vertical, como o aerogerador Darrieus. A tecnologia dos aerogeradores tem evoluído muito devido aos avanços tecnológicos dos materiais, da engenharia, da electrónica e da aerodinâmica. Em geral, os aerogeradores estão agrupados num determinado local, onde as condições do vento são favoráveis. Estes agrupamentos são designados por Parques Eólicos. A energia eléctrica por eles obtida é incorporada na rede eléctrica e distribuída aos consumidores da mesma forma que a obtida nas centrais térmicas convencionais.

A energia produzida por qualquer aerogerador é directamente proporcional ao cubo da velocidade do vento. Por isso, existe vantagem em instalar os aerogeradores nas zonas em que a velocidade do vento é elevada, ditos de ventosos. Como a velocidade do vento é afectada pelo relevo do solo, e aumenta com a altura acima do solo, de acordo com a lei de Prandel, as turbinas são montadas em torres muito altas.

Os produtores de energia eléctrica em regime especial, anteriormente designados por produtores independentes, entregam à REN toda a energia produzida. O valor da tarifa praticada depende da tecnologia utilizada, sendo o mesmo estabelecido pelo Decreto-Lei n.º 225/2007 de 31 de Maio. Os aerogeradores instalados numa zona com maior velocidade de vento, originando uma significativa disponibilidade de energia cinética das massas de ar, permitem um retorno económico do investimento mais favorável em comparação com os situados em zonas mais desfavoráveis. Mas, não é só importante fazer uma avaliação da disponibilidade em energia cinética das massas de ar, visto que, a actividade cerâmica do local também é um factor importante do sucesso do investimento. Esta tese constitui um contributo no âmbito da caracterização da actividade cerâmica em Portugal continental.

Os custos da energia eléctrica produzida pelos aerogeradores são fundamentalmente determinados por:

- Custo do investimento, como por exemplo no aerogerador, nas fundações e na ligação à rede;
- Tempo de vida útil do equipamento;
- Taxa de juro associado com o empréstimo requerido para cobrir o investimento total ou parcialmente;
- Custos de manutenção, que normalmente são directamente proporcionais às avarias;
- Custos devidos ao pagamento de impostos e seguros;
- O custo unitário da energia eléctrica produzida pelos aerogeradores, decrescendo com o aumento das horas de indisponibilidade.

Segundo informação disponibilizada na página da DGEG, os custos dos aerogeradores têm vindo a decrescer nos últimos anos, mas esta tecnologia ainda requer um investimento inicial mais elevado por kW de potência instalada do que a produção de electricidade baseada em derivados de petróleo.

Em média, em 2004, os custos variaram entre 650 a 900 €/kW instalado, dependendo do fabricante e da capacidade de produção do aerogerador. Contudo, em Portugal, a redução dos custos não foi tão acentuada, devido à tendência de instalação de aerogeradores de grandes dimensões e ao elevado custo dos terrenos, sendo estimado que os custos dos aerogeradores em Portugal se situem entre 1000 e 1200 €/kW instalado. No entanto, o relatório anual relativo a 2008 da *International Energy Agency* refere custos mais baixos neste ano, os quais se situam entre 950 a 1110 €/kW instalado.

Todos os aerogeradores, independentemente da sua dimensão, são constituídos pelos seguintes componentes:

- Um rotor, que corresponde à parte que roda por acção do vento sofrendo um movimento de rotação propulsionado pelas pás;
- Um gerador eléctrico, que converte a forma de energia mecânica disponível no veio em energia eléctrica;
- Um sistema de controlo da velocidade, que adequa as condições de velocidade de rotação do veio de forma que sejam tecnicamente admissíveis;
- Uma torre, que é a estrutura de suporte físico a toda a instalação do aerogerador.

Os aerogeradores possuem também sistemas de segurança que visam evitar danos e prejuízos que possam conduzir à inoperacionalidade futura do aerogerador. Esta tese constitui também uma contribuição para os sistemas de segurança, colmatando a eventualidade de danos produzidos por descargas eléctricas atmosféricas.

1.2 Motivação

A energia eólica evita importar petróleo ou gás natural e por isso contribui para aliviar a dependência e a factura energética dum país. A energia eólica evita as emissões de CO₂ e os custos associados à violação dos níveis de emissão acordados entre os países, custos ambientais e de saúde pública, bem como contribui para diminuir o recurso aos combustíveis de origem fóssil, ditos de “fonte de energia não renovável”.

Ainda, segundo a DGEG, a energia eólica é um recurso nacional, fiável, e que gera cinco vezes mais emprego por Euro investido do que as tecnologias associadas ao carvão ou ao nuclear. A energia eólica representa, pelas razões anteriormente referidas, um contributo para se atingirem os compromissos internacionais, nomeadamente os fixados no Protocolo de Quioto.

De acordo com os dados da *European Wind Energy Association*, em 2008 a potência total instalada na UE em produção de electricidade foi de 19651 MW. A potência instalada de origem eólica foi de 8484 MW, o que fez 43 %.

A energia eólica foi a fonte de energia mais utilizada no aumento da capacidade de produção de electricidade da UE, à frente do gás com 35 % e do petróleo com 13 %.

Por cada MWh de energia eléctrica de origem eólica são reduzidas entre 0,8 a 0,9 toneladas de emissões de gases com efeito de estufa que seriam produzidas pela utilização dos combustíveis fósseis na produção de energia eléctrica.

O sector da energia eólica é pois um mercado em franco crescimento, com 11000 M€ gastos em 2008 na UE, cujo potencial se situa a vários níveis:

- Exploração comercial de energia;
- Produção de equipamentos;
- Manutenção e serviços;
- Investigação e desenvolvimento.

Em consequência, os estudos no âmbito da energia eólica são linhas de investigação motivantes pelo carácter utilitário de não só responderem às reflexões sobre questões ambientais mas também à diversificação de fontes de energia primárias.

A rentabilidade económica dos parques eólicos é afectada pelo fenómeno da Descarga Eléctrica Atmosférica (DEA), ou raio, que na sua forma extrema dá origem às trovoadas, sendo sem dúvida um dos fenómenos atmosféricos devastadores que pode causar a perda de vidas humanas, de bens materiais, e condicionar a operacionalidade de numerosas actividades socioeconómicas.

A previsão deste fenómeno é apoiada nas observações meteorológicas tradicionais, nos resultados de modelos de previsão numérica e, sobretudo, nas imagens de satélite, nos dados de radares meteorológicos e nos dados de Sistemas de Detecção e Localização de DEA (LLS - *Lightning Location System*). Estes últimos são de grande utilidade meteorológica na previsão das trajectórias dos sistemas nebulosos que originam as DEA e na caracterização da actividade ceráunica da região.

Em Portugal, o primeiro LLS entrou em funcionamento em meados de 2002. O Instituto de Meteorologia (IM) gentilmente aceitou a disponibilizar todos os seus registos desde então até final de 2007.

Estes dados são merecedores não só de um tratamento meteorológico, mas também de um tratamento na óptica das instalações eléctricas, visto que, encerram informação relevante para a mitigação dos efeitos nefastos das DEA.

As estatísticas mostram que as DEA são de longe a maior causa de danos em parques eólicos [1]. Na Alemanha, 14 % dos aerogeradores localizados em zonas montanhosas foram danificados por DEA [2]. O Japão é outro país que sofre intensamente os efeitos das DEA, onde a percentagem de aerogeradores danificados é de 36 % [3]. Infelizmente, não foi possível obter percentagens concretas de turbinas eólicas afectadas por DEA em Portugal. Contudo, pode-se referir de acordo com a REN que, em 2009, 36 % das perturbações nas linhas de muito alta tensão em Portugal foram provocadas por DEA, percentagem idêntica à de aerogeradores danificados no Japão por DEA.

As Fig. 1.5 e 1.6 apresentam os danos infligidos por DEA num aerogerador do parque de Torres Vedras durante as trovoadas de 9 de Setembro de 2009.



Fig. 1.5 – DEA atinge aerogerador no parque eólico de Torres Vedras em 09/09/2009



Fig. 1.6 – Danos causados pela DEA na *nacelle* do aerogerador atingido no parque eólico de Torres Vedras em 09/09/2009

De modo a mitigar os efeitos das DEA em parques eólicos é crucial conhecer a actividade cerâmica da região e determinar o risco de danos associado a cada parque em concreto, tornando assim possível conceber medidas de protecção mais eficazes [4].

Em consequência da rentabilidade económica dos parques eólicos ser afectada pelos efeitos nefastos das DEA, e da disponibilidade dos primeiros registos de dados de 2002 até ao final de 2007 permitir uma caracterização da actividade cerâmica em Portugal continental como até aqui não havia sido possível, resultou noutra linha de investigação que foi motivante para a realização desta tese.

Finalmente, com a entrada em vigor em Janeiro de 2006 do conjunto de normas internacionais, série IEC 62305, foram confirmados dois aspectos importantes no que respeita à protecção de estruturas e seu conteúdo contra os efeitos nefastos das DEA:

- O método de análise de risco de danos causados por DEA, anteriormente parte integrante do relatório técnico IEC 61662, como método a utilizar na quantificação do risco a que uma estrutura está sujeita e em função desse valor permitir a adopção de medidas de protecção adequadas;
- O modelo da esfera rolante, como modelo a utilizar na previsão dos pontos vulneráveis de uma estrutura e em função dessa indicação permitir a instalação apropriada de captos artificiais das DEA.

Em consequência deste novo enquadramento normativo e ainda pelo facto do autor desta tese ter já realizado programas de computador baseados na IEC 61662 e no modelo da esfera rolante, resultou outra linha de investigação que foi motivante para a realização desta tese na medida em que, não só se confirmavam em norma internacional as linhas de investigação seguidas no passado, como se tornava agora necessário adaptar à nova realidade normativa os programas então desenvolvidos.

1.3 Estado da Arte

Protecção contra DEA directas

Benjamin Franklin (1706-1790), escritor, inventor, cientista e diplomata norte-americano, nascido em Boston, foi juntamente com Jefferson e John Adams, enquanto desempenhava o cargo de deputado do 1.º Congresso (1776), um dos criadores do manifesto da Declaração da Independência dos Estados Unidos da América.

Em 1752 propôs uma série de experiências, realizadas em França, que demonstraram que os raios eram descargas eléctricas. Nesse mesmo ano, em Filadélfia, Franklin levou a cabo uma experiência que se tornou famosa. Lançou um papagaio de papel durante uma trovoadas e atou uma chave metálica na gaita que o sustinha a cerca de metro e meio do solo. O intenso campo eléctrico criou condições para uma forte acumulação de carga eléctrica na chave de onde saltaram pequenos arcos eléctricos para os nós dos seus dedos. Franklin teve a sorte de não morrer durante esta arriscada experiência. Ficou assim provado que os raios tinham uma natureza eléctrica e eram na verdade DEA.

Vários anos antes, Franklin especulara que uma barra metálica longa e fina, cravada no alto de um telhado e ligada por um cabo condutor ao solo no exterior do edifício, conduziria a electricidade das DEA para o solo sem provocar danos no edifício. Esta invenção, apresentada ao público em 1753, foi designada por pára-raios. Ainda hoje, empresas como a Franklin France fabricam e comercializam o pára-raios do tipo Franklin, quase sem alterações desde a sua invenção. O pára-raios do tipo Franklin consiste normalmente num tubo de cobre niquelado cromado ou de aço inoxidável, com diâmetros compreendidos entre uma e duas polegadas, com um comprimento standard de 2,4 m e uma ponta afilada, de forma cónica numa das extremidades.

Estes pára-raios podem ser prolongados pela associação de mastros prolongadores de aço tratado ou aço inoxidável.

Michael Faraday (1791-1867) foi um químico e físico britânico, e é considerado um dos cientistas mais influentes de todos os tempos. Faraday foi principalmente um experimentalista, frequentemente descrito como o "melhor experimentalista na história da ciência".

Na Química, descobriu o benzeno, produziu os primeiros cloretos de carbono conhecidos por C_2Cl_6 e C_2Cl_4 , ajudou a estender as fundações da metalurgia, além de ter tido sucesso em liquefazer gases nunca antes liquefeitos, como por exemplo, o dióxido de carbono e o cloro, tornando possíveis os processos de refrigeração tão usados hoje em dia. Talvez a sua maior contribuição tenha sido a de fundar a electroquímica, e introduzir termos como electrólito, ânodo, cátodo, eléctrodo, e ião.

Na Física, foi um dos primeiros a estudar as ligações entre electricidade e magnetismo. Em 1821, Faraday publicou um trabalho que denominou de "rotação electromagnética", o princípio de funcionamento do motor eléctrico. Em 1831, Faraday descobriu a indução electromagnética, o princípio de funcionamento do gerador eléctrico. Faraday demonstrou que uma superfície condutora electrizada possui campo eléctrico nulo no seu interior, uma vez que as cargas se redistribuem de forma homogénea na parte mais externa da superfície condutora.

Esta experiência de Faraday, conhecida por “Gaiola de Faraday” ou método da malha, é aplicado na protecção de edifícios contra as DEA e consiste em dispor condutores de cobre ou de aço galvanizado, sobre o telhado e/ou cobertura das estruturas a proteger, ligando-se uns aos outros com acessórios de aperto mecânico e de modo a se obter uma malha com dimensão adequada.

Essa malha é ligada ao eléctrodo de terra através de descidas constituídas por condutores do mesmo material dos instalados no telhado e/ou cobertura. Trata-se de um método de protecção passivo, muito utilizado na Europa e que beneficia da vantagem de existirem normas europeias e internacionais que o contemplam.

A protecção contra DEA sofreu um grande impulso com a electrificação dos países industrializados no início do séc. XX.

Sabe-se há muito que um condutor ligado à terra e colocado ao longo de uma linha, a uma altura superior à dos condutores activos, reduz a probabilidade destes serem directamente atingidos por DEA.

Nos anos sessenta o modelo electrogeométrico, desenvolvido por Golde, Armstrong e Whitehead, forneceu uma explicação muito mais satisfatória para o modo de actuação do cabo-de-guarda. Segundo este modelo, que será descrito mais em pormenor no Capítulo 5, a distância do salto final, isto é, a distância mínima de aproximação entre o traçador descendente e o ascendente antes da sua junção, está directamente relacionada com a corrente de pico da DEA.

Actualmente existem vários modelos propostos que se enquadram no conceito do modelo electrogeométrico. O mais utilizado na prática, e recentemente reconhecido em norma internacional [5], [6] e [7] pela *International Electrotechnical Commission* (IEC), é provavelmente o Modelo da Esfera Rolante (RSM – *Rolling Sphere Method*), também conhecido por modelo da esfera fictícia ou modelo da bola.

O RSM permite determinar os pontos vulneráveis de uma estrutura, isto é, os pontos com maior probabilidade de serem atingidos directamente por uma DEA. Este conhecimento possibilita o posicionamento rigoroso dos captos artificiais, isto é, condutores metálicos de secção apropriada a colocar sobre estruturas essencialmente não metálicas, e em particular nos telhados e/ou coberturas. Assim, garante-se um nível de eficiência da Instalação de Pára-Raios (IPR) mais elevado e que minimiza o custo de instalação.

Claro que outros tipos de pára-raios foram tentados. A ideia de se criar um pára-raios ionizante com a utilização da radioactividade foi concebida originalmente em 1914 pelo físico húngaro J. B. Szillard, colaborador do casal Pierre e Marie Curie. Szillard comunicou à Academia Francesa de Ciências, em 9 de Março de 1914, os ensaios realizados com um terminal Franklin contendo um sal de rádio.

Szillard achava que, quando esse dispositivo era colocado num campo eléctrico, a corrente resultante seria consideravelmente maior que a medida utilizando-se uma haste de Franklin convencional.

O acréscimo de corrente foi atribuído à ionização do ar provocada pelas partículas alfa e beta e pelos raios gama provenientes do decaimento do Ra-226 e de seus descendentes radioactivos. Este aumento da corrente, teria como efeito aumentar a distância do salto final e, em consequência, alargar a zona probabilística de protecção.

Em 1931, o físico belga Gustav P. Capart, também colega de Madame Curie, patenteia o primeiro captor ionizante com utilização de radioactividade.

Em 1953, Alphonse Capart, filho de Gustav, continuou a pesquisa iniciada pelo pai e por Szillard e construiu o primeiro captor radioactivo.

Em 1956, Capart passou a fabricar em escala industrial os primeiros captores radioactivos que foram utilizados no mundo. Estes captores foram então baptizados com o nome de PREVENTOR e passaram a ser produzidos pela empresa francesa INDELEC, e pela empresa americana *Lightning Preventor of America*.

Após a Segunda Guerra Mundial, o emprego do Ra-226 foi substituído pelo emissor de Amerício 241, radioisótopo mais disponível e económico naquela época.

Apesar de em 1962 o cientista alemão Müller Hillebrand ter apresentado um estudo sobre o assunto, afirmando que o captor radioactivo e o captor Franklin apresentavam comportamentos iguais na presença de um campo eléctrico, este tipo de pára-raios foi largamente utilizado em quase todo o mundo entre as décadas de setenta e noventa. No entanto, encontram-se hoje proibidos em muitos países incluindo Portugal.

Com a proibição dos pára-raios radioactivos outros tipos de pára-raios ionizantes têm sido tentados: piezoeléctricos, com perfil especial e com dispositivo de antecipação. Todos são hastes de Franklin com um dispositivo que promete ionizar intensamente o ar em volta da ponta e, desta forma, aumentar a distância do salto final. Este conceito é conhecido por *Early Streamer Emission*. O objectivo dos fabricantes de todos os pára-raios que prometem uma área de influência muito maior que o pára-raios de Franklin é oferecer aos seus clientes uma solução tecnologicamente evoluída e com vantagens económicas na instalação.

Infelizmente a realidade dos factos nem sempre é a anunciada nos catálogos dos fabricantes. Foi em França que o pára-raios com dispositivo electrónico de antecipação foi mais impulsionado pela indústria local. Estes são constituídos por uma haste metálica à qual se junta um dispositivo electrónico capaz de produzir, no momento certo, uma forte ionização do ar na vizinhança da ponta da haste ao provocar a disrupção do ar e gerar pequenos arcos eléctricos. A ionização do ar aumenta o número de electrões germe aumentando assim a probabilidade de se iniciar o efeito coroa, se o campo eléctrico em redor for suficientemente elevado.

Este tipo de pára-raios foi inclusivamente objecto da cobertura normativa Francesa, a NF C 17-102, mas as dúvidas levantadas pela comunidade científica internacional sobre as reais vantagens destes pára-raios relativamente ao pára-raios Franklin levaram o Governo Francês a encomendar ao *Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques* (INERIS) um estudo rigoroso.

Em Outubro de 2001, o INERIS publicou as suas conclusões [8] onde se pode ler que, apesar das bases científicas nas quais se apoiam estes dispositivos estarem correctas, o problema reside no momento do disparo do dispositivo electrónico. Se o disparo ocorre muito cedo o traçador ascendente não se poderá propagar suficientemente longe devido ao ainda fraco campo eléctrico envolvente e, assim, não se dará a junção dos dois traçadores.

Após o disparo o dispositivo electrónico tem necessidade de se recarregar para efectuar novo disparo e o tempo de carga é longo face ao tempo de duração da DEA. Se o disparo ocorre após o impacto da DEA não serve para nada e o pára-raios com dispositivo de antecipação comporta-se como um simples pára-raios Franklin.

Após a publicação deste relatório as vendas dos pára-raios com dispositivo de antecipação diminuíram drasticamente em todo o mundo. Curiosamente em Portugal as vendas aumentaram e até foi publicada, em Dezembro de 2003, uma norma, a NP 4466.

Protecção contra DEA indirectas

O modo de proteger uma Instalação Eléctrica (IE) contra os efeitos indirectos das DEA, isto é, as sobretensões de origem atmosférica pode resumir-se em três etapas fundamentais: a intercepção da DEA; a condução para o solo da corrente veiculada pela DEA, com limitação da sobretensão correspondente; e a utilização de dispositivos capazes de limitar as sobretensões a valores inferiores aos suportáveis pelo equipamento.

Uma vez que a DEA é interceptada pelos captosres da IPR, a corrente eléctrica veiculada por esta escoar-se para a terra através das descidas e do eléctrodo de terra, originando sobretensões transitórias que podem ser perigosas, quer para a segurança das pessoas, quer para a funcionalidade dos equipamentos.

Evidentemente que se deseja o menor valor possível para a resistência do eléctrodo de terra, de maneira que as sobretensões não atinjam valores susceptíveis de causar dano, mas as características do solo desempenham um importante papel no valor desta resistência e como não é possível alcançar o valor de zero Ohm, as sobretensões são inevitáveis.

A protecção do equipamento eléctrico contra as sobretensões transitórias pode ser conseguida pelo método do isolamento galvânico. Este método é eficaz na eliminação das sobretensões conduzidas e consiste na eliminação de qualquer ligação eléctrica entre a fonte de perturbação e o equipamento vítima. É exemplo deste tipo de protecção a prática de desligar o aparelho de utilização da tomada de corrente durante uma trovoadas. Infelizmente este procedimento nem sempre é possível por razões de operacionalidade.

Outra técnica de protecção consiste em estabelecer um curto-circuito entre a fonte de perturbação e o equipamento a proteger, o que se consegue com os Dispositivos de Protecção contra Sobretensões Transitórias (DPST), também conhecidos por descarregadores de sobretensão ou DST. Nenhuma tensão perigosa afectará o equipamento assim protegido uma vez que a tensão aos terminais de um curto-circuito é nula.

A coordenação energética entre DPST em série é necessária pois a tecnologia actual ainda não permite produzir um dispositivo capaz de limitar a tensão a níveis suficientemente baixos, que não causem a destruição do equipamento, e simultaneamente descarregar correntes impulsivas com muitas dezenas de kA, que não causem a destruição do DPST. Segundo a IEC 61643-1, os DPST são classificados em dois tipos básicos:

- Dispositivo de comutação;
- Limitador de tensão.

O princípio de funcionamento do dispositivo de comutação consiste em comutar de um estado de elevada resistência de isolamento galvânico, para um estado de baixa resistência denominado curto-circuito. Quando o dispositivo de comutação é submetido a uma tensão superior a um determinado valor limiar, estabelece-se um curto-circuito entre fases ou fase-terra.

A corrente que então flui no dispositivo de comutação em operação, deve ser cortada antes de atingir valores de corrente de curto-circuito (I_{CC}) e assim evitar o accionamento de outros dispositivos de protecção como fusíveis ou disjuntores.

É possível encontrar dois tipos de dispositivos de comutação em comercialização, baseados neste princípio de funcionamento:

- Explosor em tubo de gás, também conhecido por *Gas Discharge Tube (GDT)*;
- Díodo de disrupção, também conhecido por Breakover Diode (BOD).

O GDT é normalmente constituído por um par de eléctrodos no interior de um tubo de vidro, ou cerâmica, cheio com um determinado gás. O GDT ainda não é um dispositivo de protecção suficientemente eficaz para ser usado “per si” na protecção de equipamento com microelectrónica. O GDT reage lentamente ao aumento da tensão; por esta razão, quando em presença de sobretensões transitórias, o GDT pode deixar a tensão subir muito acima do valor máximo da tensão de alimentação, antes de ser activado. De modo a quantificar o que acabou de ser dito, digamos que um GDT com tensão estipulada de 240 V pode operar apenas quando a sobretensão transitória excede 1500 V, o que será inaceitável para muito do equipamento electrónico moderno.

Uma vez activado, o GDT comporta-se como um curto-circuito e torna-se então difícil desligá-lo. São normalmente utilizados em redes de distribuição ou instalações de potência.

No entanto, apresentam como vantagem a capacidade de suportarem correntes de elevado valor sem se destruírem e, por essa razão, são frequentemente aplicados no Quadro de Entrada (QE).

O BOD é um dispositivo semiconductor da família do t́ristor, cuja característica U/I está muito mais próxima da ideal, mas mantém a dificuldade de ser desligado e suporta correntes com menor valor de amplitude.

O dispositivo limitador de tensão, quando em presença de uma sobretensão transitória, irá manter a tensão, aos terminais do equipamento, num valor suportável por este. O aumento da intensidade de corrente através do dispositivo provoca a diminuição da sua resistência interna, o que faz com que a tensão não aumente. O dispositivo ideal seria aquele que, independentemente do valor assumido pela corrente, mantivesse a tensão sempre num valor constante e suportável pelo equipamento.

O mercado disponibiliza dois tipos de dispositivos limitadores de tensão que se aproximam destas características, com tecnologias de fabrico diferentes:

- Varistor de óxido metálico, também conhecido na literatura por *Metal Oxide Varistor* (MOV);
- Díodo supressor de sobretensões transitórias, também conhecido por *Tyristhor Surge Supressor* (TSS).

Os MOV's são resistências não-lineares constituídas por pequenas esferas de material, comprimidas umas contra as outras. A interface existente entre duas esferas forma uma junção semicondutora. A quantidade de junções existentes no dispositivo determina o valor da tensão à qual o dispositivo deverá funcionar.

As suas dimensões condicionam a intensidade de corrente que pode fluir através deste dispositivo. O dispositivo MOV é capaz de suportar uma elevada intensidade de corrente e operar muito rapidamente, mas apesar disso, a sua característica U/I afasta-se do dispositivo ideal. Ainda assim, os MOV representam um grande avanço tecnológico face aos dispositivos baseados no carboneto de silício.

O TSS é uma versão melhorada do díodo zener, possuindo uma junção semicondutora alargada. A sua característica U/I é bastante próxima da ideal mas suporta uma intensidade de corrente relativamente baixa. O TSS é testado e utilizado em circunstâncias idênticas ao MOV.

1.4 Organização do Texto

O texto da tese está organizado em seis capítulos. O Capítulo 2 é destinado à caracterização da DEA. O Capítulo 3 é destinado à caracterização da actividade cerâmica em Portugal continental. O Capítulo 4 é destinado à protecção dos parques eólicos contra efeitos indirectos das DEA. O Capítulo 5 é destinado à protecção dos parques eólicos contra efeitos directos das DEA. No Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais.

Seguidamente, é apresentada uma descrição mais detalhada do conteúdo de cada capítulo.

No Capítulo 2 é apresentada uma síntese sobre a importância das DEA nas diferentes culturas e religiões ao longo da história da humanidade. O processo da formação das nuvens bem como o processo de formação das DEA é revisto. Particularmente nesta revisão é abordada a formação das nuvens de trovoadas. Apresentam-se os diferentes tipos de DEA e as diferentes fases do processo de impacto de uma DEA. Finalmente, são apresentados justificadamente os parâmetros característicos das DEA usados nesta tese.

No Capítulo 3 é apresentado o estudo realizado à actividade cerâmica sobre o território de Portugal continental. Os dados experimentais foram recolhidos pelo Sistema de Localização Automática de DEA e cedidos para o propósito desta tese pelo IM. Após uma breve revisão sobre os diversos sistemas de detecção e localização, com especial enfoque para o sistema utilizado em Portugal, apresentam-se os resultados obtidos. Os resultados correspondem aos primeiros cinco anos de funcionamento deste sistema com quase quatro milhões de registos e incluem, entre outros, distribuição geográfica, sazonal e de polaridade, e probabilidade acumulada da corrente de pico das descargas eléctricas nuvem-solo.

No Capítulo 4 é apresentado o estudo realizado à protecção dos parques eólicos contra os efeitos indirectos das DEA. São obtidas as equações da linha de transmissão. As principais características do programa de computador EMTP-RV são realçadas. O programa EMTP-RV é utilizado no estudo da propagação das sobretensões causadas por DEA indirectas em dois casos de estudo. No primeiro caso de estudo considera-se apenas um aerogerador dotado do seu equipamento habitual, e no segundo são considerados dois aerogeradores interligados.

No Capítulo 5 é apresentado o estudo realizado à protecção dos parques eólicos contra os efeitos directos das DEA. É apresentada uma revisão sobre o método de análise de risco de danos causados por DEA proposto pela normalização internacional IEC 62305. É apresentado um novo programa de computador em Visual Basic, o LPS 2008, desenvolvido para o propósito desta tese. O LPS 2008 corre sobre o AutoCAD, efectua a análise de risco de danos de uma qualquer estrutura ou conjunto de estruturas baseado na IEC 62305 e permite ainda a simulação em 3D do RSM. O RSM permite identificar os pontos vulneráveis de uma estrutura em função do nível de protecção escolhido. O programa EMTP-RV é utilizado no estudo da propagação das sobretensões causadas por DEA directas em dois casos de estudo. No primeiro caso de estudo considera-se apenas um aerogerador dotado do seu equipamento habitual, e no segundo são considerados dois aerogeradores interligados.

No Capítulo 6 são apresentadas as contribuições originais desta tese sobre o tema da protecção de sistemas de energia eólica contra descargas eléctricas atmosféricas. Ainda, são indicadas as publicações científicas que resultaram no contexto de divulgação e validação do trabalho de investigação realizado. Por fim, são indicadas direcções para futuros desenvolvimentos.

1.5 Notação

Em cada um dos capítulos desta tese é utilizada a notação mais usual na literatura especializada, harmonizando, sempre que possível, aspectos comuns a todos os capítulos. Contudo, quando necessário, em cada um dos capítulos é utilizada uma notação apropriada. As expressões matemáticas, figuras e tabelas são identificadas com referência ao capítulo em que são apresentadas e são numeradas de forma sequencial no capítulo respectivo, sendo a numeração reiniciada quando se transita para o capítulo seguinte. A identificação de expressões matemáticas é efectuada através de parênteses curvos () e a identificação de referências bibliográficas é efectuada através de parênteses rectos [].

CAPÍTULO

2

Descarga Eléctrica Atmosférica

Neste capítulo é apresentada uma síntese sobre a importância das DEA nas diferentes culturas e religiões ao longo da história da humanidade. O processo da formação das nuvens bem como o processo de formação das DEA é revisto. Particularmente nesta revisão é abordada a formação das nuvens de trovoadas. Apresentam-se os diferentes tipos de DEA e as diferentes fases do processo de impacto de uma DEA. Finalmente, são apresentados justificadamente os parâmetros característicos das DEA usados nesta tese.

2.1 Introdução

Desde sempre os raios e os trovões infundiram medo e respeito ao ser humano e são ao mesmo tempo símbolo de poder. Isto torna-se evidente quando se conhece o importante papel que os raios desempenharam nas diferentes culturas e religiões.

No antigo Egipto, o deus Typhon era o responsável por lançar os raios do céu. Nos antigos livros de vedas da Índia, Indra é descrita como a deusa do céu, dos raios, da chuva, tempestades e trovões, e aparece representada no seu carro no qual carrega os raios. Os sumérios representam a deusa Zarpenik, em 2500 a.C., cavalgando pelo ar com um feixe de raios em cada mão. Os gregos acreditavam que os raios eram uma arma utilizada pelo deus Zeus e pela sua família. Na mitologia grega o raio foi criado por Minerva, deusa da sabedoria. Os raios eram por isso uma manifestação divina e onde quer que caíssem era solo sagrado. Por esta razão, muitos templos gregos e romanos foram erguidos nestes pontos de impacto de modo a que ficassem mais perto dos seus deuses. Os muçulmanos também atribuem a Alá o fenómeno do raio. Pode ler-se no Corão “Ele é quem te mostra a luz e lança o trovão”. A mitologia escandinava refere o deus Thor, deus do trovão, como o inimigo de todos os demónios e combatia-os com os raios que esculpia no seu carro. Para os romanos era Júpiter o dono dos raios e no livro que Séneca escreveu, provavelmente o primeiro livro sobre os raios, pode ler-se: “Júpiter atira os raios contra colunas, árvores e às vezes até contra as suas próprias estátuas”.

Efectivamente, as trovoadas continuam a proporcionar imagens tão fantásticas quanto perigosas (Fig. 2.1). Não é raro encontrarmos pessoas fascinadas pelo espectáculo da trovoadas. Alguns correm ao encontro das trovoadas só para as fotografar ou pelo prazer de as contemplar. Pelo contrário, outras pessoas sentem um medo terrível durante uma trovoadas, mas provavelmente ninguém fica indiferente.



Fig. 2.1 – DEA sobre o Parque das Nações em 09/09/2009

Contudo, as trovoadas e as suas DEA podem ser extremamente perigosas e todos os anos matam centenas de pessoas e ferem muitas mais, já para não falar dos avultados prejuízos materiais. Importa, pois, conhecer a sua natureza de modo a mitigar os seus efeitos nefastos e podermos apreciar a sua beleza com o máximo de segurança.

2.2 Formação das Nuvens de Trovoada

Os primeiros a desenvolver teorias sobre as nuvens foram os jónicos da Ásia Menor no séc. VIII a.C., que acreditavam ser as nuvens uma forma mais espessa de ar húmido. Esta ideia persistiu até quase metade do séc. XVII, quando René Descartes afirmou que o ar e o vapor de água eram dois elementos distintos.

Em 1751 o físico francês Charles Le Roy observou que se aprisionasse ar húmido num frasco de vidro e o deixasse arrefecer se produzia orvalho no interior do frasco. Mas, quando se aquecia o frasco a uma temperatura específica, chamada ponto de orvalho, a condensação desaparecia. Verificou também que o ar quente pode conter mais vapor de água e parecer mais seco que o ar frio, ou seja, a humidade é relativa e depende da temperatura do ar.

Em 1802 o químico inglês John Dalton propôs a teoria que o vapor de água era um gás que se comportava no ar como qualquer outro gás, mas não se combinava quimicamente em solução. As moléculas de água no ar exercem uma pressão de vapor de água que é independente dos outros gases. Quando esta é alta o ar satura-se de vapor de água e qualquer aumento do mesmo traduz-se em precipitação. A humidade relativa é a relação entre a pressão do vapor de água existente e a máxima pressão possível de vapor de água e expressa-se em percentagem.

A formação das nuvens depende da instabilidade atmosférica e do movimento do ar: as nuvens formam-se quando uma massa de ar carregada de humidade é aquecida e se eleva na atmosfera. O ar quente e húmido pode ser elevado segundo diversos mecanismos (Fig. 2.2).

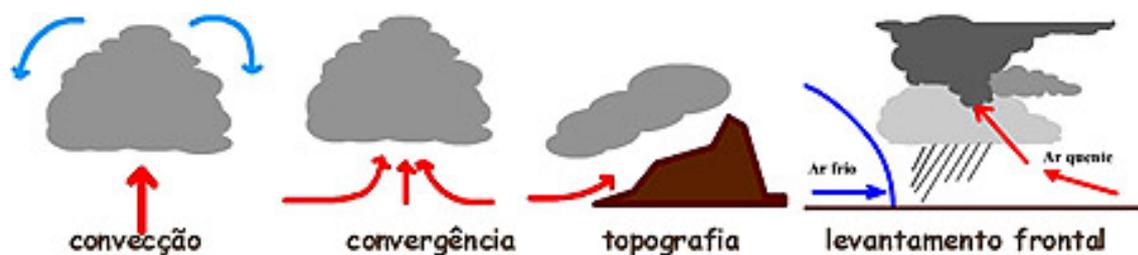


Fig. 2.2 – Mecanismos de elevação do ar quente e húmido na atmosfera (Fonte: IM)

Enquanto o ar húmido sobe lentamente, a pressão atmosférica diminui, permitindo que a massa de ar húmido se expanda. A energia necessária para esta expansão procede do calor próprio da massa de ar em ascensão e a sua expansão provoca uma queda da temperatura no seu interior.

Se a massa de ar húmido continuar a elevar-se, pode arrefecer o suficiente para atingir o ponto de orvalho e o vapor de água condensa em torno de núcleos higroscópicos formando as nuvens. Os núcleos higroscópicos podem ser partículas de pó, fumo, sais ou substâncias microscópicas. Quando o vapor de água atinge o ponto de orvalho liberta o calor latente, característico da mudança do estado gasoso para o estado líquido e do líquido para o sólido. Esta libertação de calor torna mais lento o arrefecimento da massa de ar húmido, permitindo-lhe manter o seu poder ascensional e conseqüentemente o crescimento da nuvem.

Consoante as condições climatéricas as nuvens podem crescer segundo uma variedade de formas, tamanho e altitude. A Fig. 2.3 apresenta os diversos tipos de nuvens.

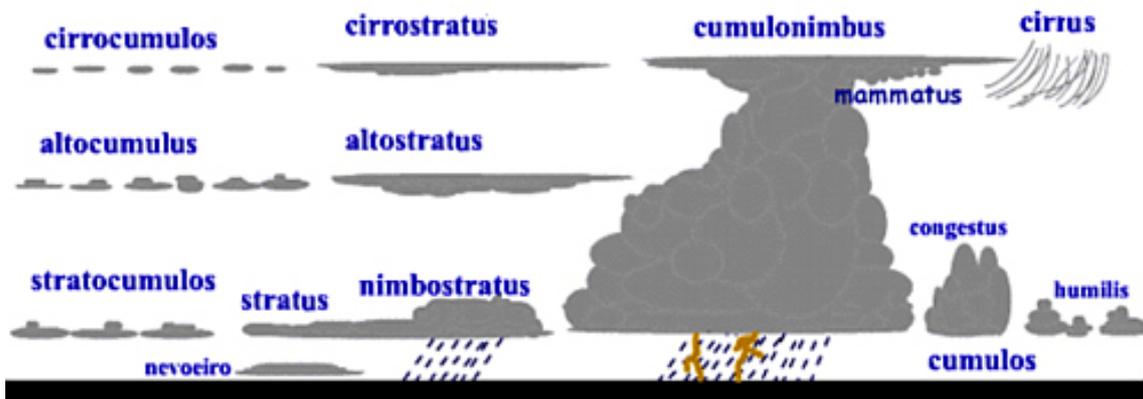


Fig. 2.3 – Classificação das nuvens (Fonte: IM)

As nuvens de trovoada são as Cumulonimbus, com a base entre 700 e 1500 m de altitude, e com os topos a atingir 24 a 35 km, sendo a média entre 9 e 12 km. São formadas por gotas de água, cristais de gelo, flocos de neve e granizo e o seu interior é agitado por fortes correntes de ar. Quando o topo alcança a troposfera este expande-se horizontalmente devido aos ventos superiores, adquirindo a forma de bigorna; são os Cumulonimbus Incus. Uma descrição mais detalhada sobre o assunto pode ser encontrada em [9].

2.3 Desenvolvimento da DEA

O planeta Terra encontra-se electricamente carregado e comporta-se como um condensador esférico. A Terra possui uma carga eléctrica negativa de 1×10^6 C enquanto a atmosfera possui idêntica carga mas positiva [10].

Observações realizadas indicam que em cada instante ocorrem na Terra entre 1000 e 2000 trovoadas [11]. Assume-se que a nuvem de trovoada se comporta como um gerador eléctrico que injecta cargas negativas na terra, de modo a compensar as trocas de carga com a ionosfera, mantendo assim o equilíbrio eléctrico.

DEA nuvem-nuvem

A DEA nuvem-nuvem actua de modo a equilibrar e neutralizar a carga eléctrica entre regiões da atmosfera ou entre nuvens. A DEA nuvem-nuvem ocorre, na maior parte das vezes, entre a principal região de carga negativa, localizada onde a temperatura do ar se situa entre -10 e -20 °C, e a região de carga positiva por cima da negativa [12].

A fase activa da DEA começa com a formação de uma canal disruptivo (*breakdown streamer*) movendo-se para cima desde a região negativa com uma velocidade aproximada de 100 m/s [13] e [14].

Quando o canal disruptivo alcança a região positiva torna-se um canal condutor através do qual flui a corrente. Frequentemente, são observados impulsos de corrente que acompanham o aumento do canal vertical devido ao processo disruptivo [15]. As maiores emissões em baixa-frequência, associadas aos processos de transporte de corrente, ocorrem logo após a fase inicial de uma descarga nuvem-nuvem [16] e [17].

Quando o canal vertical atinge o seu comprimento máximo, cerca de 20 a 50 ms após o início, descargas horizontais desenvolvem-se no topo do canal vertical. Seguidamente, aparecem também descargas horizontais em torno do canal na região negativa.

Durante a fase activa de uma DEA o processo disruptivo reinicia-se no canal vertical inicial, intervalado por impulsos de corrente [14]. O fluxo de corrente eventualmente pára após um intervalo de tempo da ordem das centenas de milisegundos, quando a região de carga negativa em torno da base do canal vertical se encontrar suficientemente empobrecida ou até com carga positiva acumulada. Nesta fase, a actividade localiza-se basicamente a baixa altitude, com descargas horizontais que transportam carga negativa para a região empobrecida.

DEA nuvem-solo

A maioria das DEA nuvem-solo começam com uma DEA nuvem-nuvem a qual é chamada descarga preliminar. Após cerca de 1/10 do segundo, aparece o canal guia descendente e denteado denominado traçador (*stepped-leader*) por baixo da nuvem, deslocando-se para baixo em saltos sucessivos. A maioria transporta carga negativa ao longo do canal mas alguns são positivos.

Após poucas dezenas de mili-segundos, quando a ponta do canal guia se encontra a algumas dezenas de metros acima do solo ou de objectos implantados no solo, o campo eléctrico por baixo da ponta torna-se suficiente para iniciar um ou mais canais disruptivos ascendentes (*streamers*), habitualmente a partir dos objectos mais altos na vizinhança do canal guia descendente.

Quando um dos canais disruptivos ascendentes contacta o canal guia descendente dá-se o primeiro arco-de-retorno (*return stroke*). O arco-de-retorno é basicamente uma onda de corrente positiva intensa que se propaga para cima, a cerca de metade da velocidade da luz, e descarrega o canal. Após uma pausa de 40 a 80 ms, outro canal guia (*dart-leader*) pode restabelecer o canal e propiciar um arco-de-retorno subsequente.

Uma DEA nuvem-solo típica contem diversos arcos-de-retorno e tem uma duração aproximada de meio segundo. Em cerca de 30–50 % das DEA nuvem-solo o canal ao restabelecer-se não toma o mesmo caminho, e conseqüentemente a DEA atinge dois ou mais pontos [18].

Características das DEA nos domínios do tempo e da frequência

Da apresentação anterior acerca das DEA nuvem-nuvem e nuvem-solo, é claro que ambos os tipos de DEA emitem energia num largo espectro de rádio frequências.

Durante os processos de ionização e disrupção observam-se fortes emissões em muito alta frequência (VHF – *Very High Frequency*). Mas quando ocorrem fluxos de corrente em canais previamente ionizados, como nos casos dos arcos-de-retorno e na fase activa das DEA nuvem-nuvem, a maior parte das emissões verifica-se em baixa e muito baixa frequência (LF e VLF – *Low and Very Low Frequency*).

A Fig. 2.4, apresentada pela primeira vez por Malan [19], mostra a relação entre a frequência emitida e o método de localização das DEA. Pierce [20] também contém um excelente resumo acerca da radiação emitida pelas DEA nestas bandas de frequência.

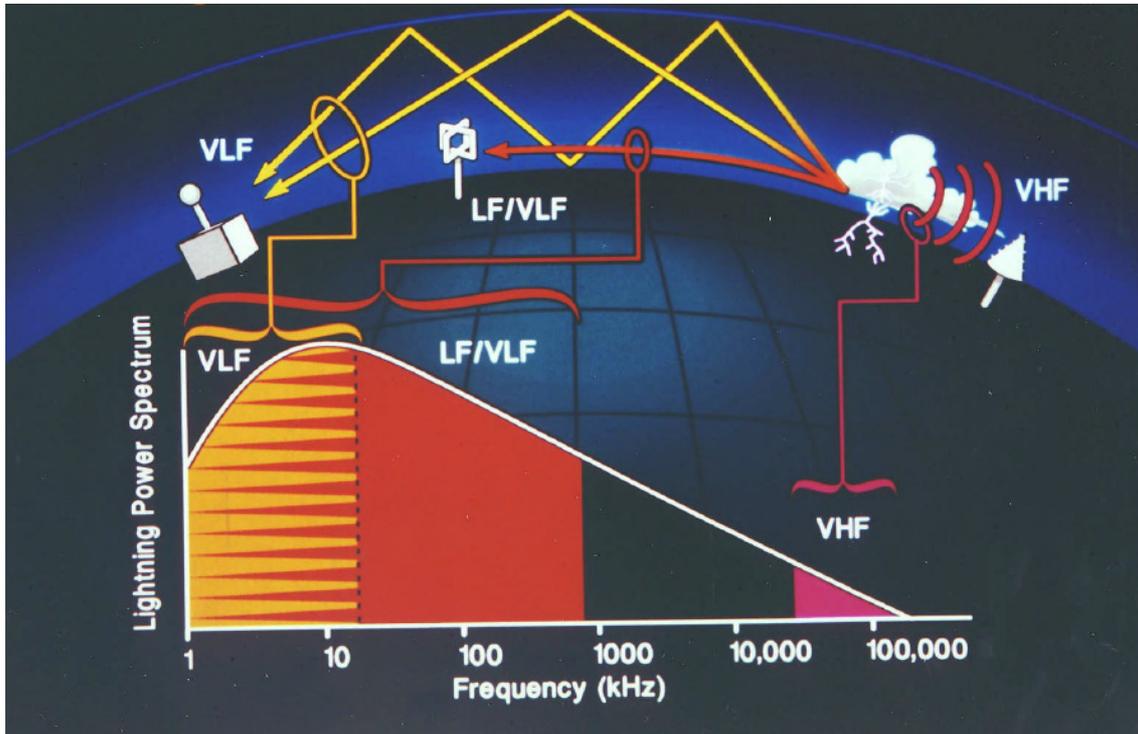


Fig. 2.4 – Relação entre a frequência e o método de localização das DEA [19]

Nas DEA nuvem-solo as emissões VLF e LF estão relacionadas com o comprimento do canal condutor e com a elevada intensidade da corrente [18]. Consequentemente, existem apenas uns poucos impulsos de grande magnitude por DEA.

As DEA nuvem-nuvem produzem desde dezenas a centenas de pequenos impulsos em LF, mas apenas ocasionalmente produzem impulsos de grande magnitude [21] e [22]. Na banda do VHF, pelo contrário, há aproximadamente 100 vezes mais impulsos que em LF e VLF, e as amplitudes alcançadas são comparáveis às registadas nas DEA nuvem-solo.

A radiação VHF é produzida pelos processos de disrupção com dimensões da ordem das dezenas a centenas de metros e pequenas correntes [23].

Devido às diferentes características dos impulsos emitidos pelas DEA, em frequência e amplitude, diferentes técnicas são usadas para melhor se adequarem à detecção das DEA.

Detectores de sinais em LF e VLF, que se propagam ao longo da superfície terrestre, têm sido usados para detectar os arcos-de-retorno das DEA nuvem-solo desde há muitos anos. Os detectores que operam em LF também podem ser usados para detectar DEA nuvem-nuvem; no entanto a amplitude destes sinais é consideravelmente menor e exige maior sensibilidade da parte do detector.

A mesma tecnologia pode ainda ser usada para detecção de sinais puramente VLF, os quais se propagam milhares de quilómetros devido às reflexões entre a ionosfera e o solo, emitidos por arcos-de-retorno de DEA nuvem-solo. Isto permite localizar DEA nuvem-solo em locais distantes nos quais não é possível colocar detectores.

Os sistemas que operam em VHF são igualmente sensíveis à maioria dos processos das DEA nuvem-nuvem e nuvem-solo mas, uma vez que só operam em linha de vista, o seu alcance é bastante limitado.

No entanto, conciliando esta característica com o facto dos sinais VHF serem de curta duração, é possível modelar as fontes de sinais VHF como fontes pontuais localizáveis em 3D. O elevado número de impulsos por DEA permite que sejam mapeados com maior detalhe.

2.4 Processo de Impacto

Duas imagens de uma DEA negativa podem ser observadas na Fig. 2.5 [24]. Nesta figura é possível observar-se a imagem de uma DEA negativa obtida com uma câmara em repouso e outra imagem da mesma DEA com a câmara em movimento horizontal.

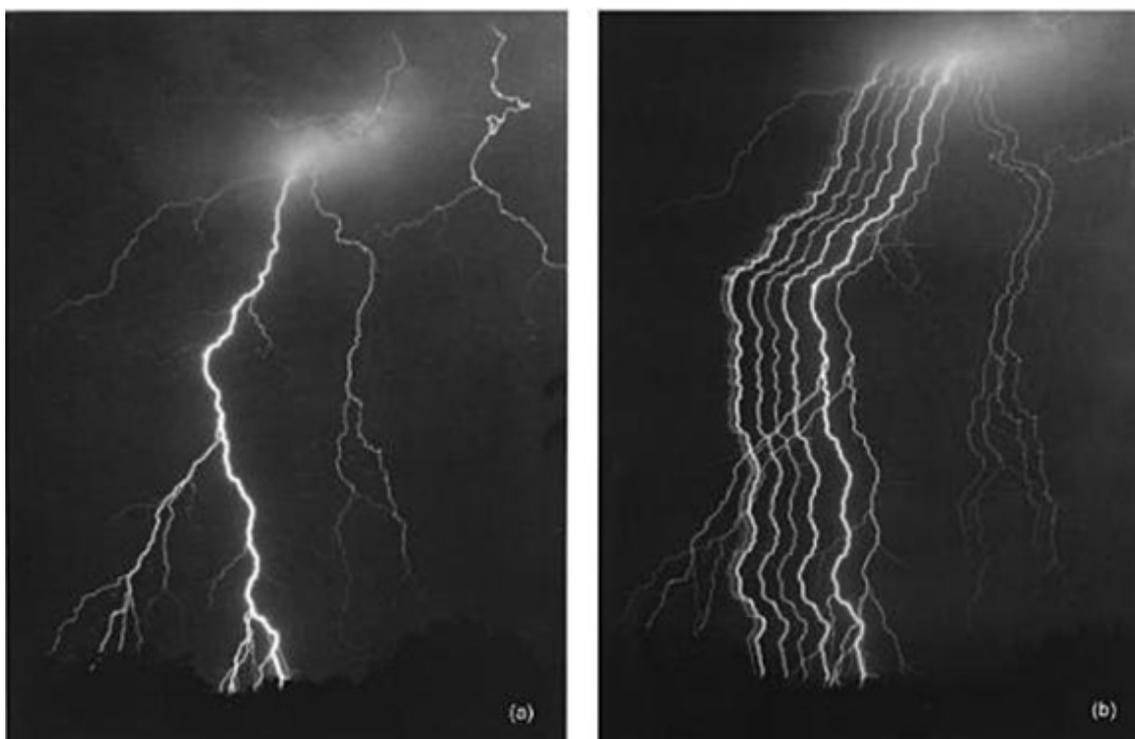


Fig. 2.5 – a) DEA fotografada com uma câmara em repouso; b) DEA fotografada com uma câmara em movimento [24]

A imagem com a câmara em movimento revela a existência de sete canais luminosos entre a nuvem e o solo. Cada canal luminoso corresponde a um arco-de-retorno. O primeiro arco-de-retorno situa-se à direita dos demais uma vez que o tempo cresce da direita para a esquerda. Cada canal é composto por um traçador descendente (*Stepped Leader*) e uma descarga de corrente ascendente chamada arco-de-retorno.

A Fig. 2.6 apresenta uma sequência mais completa das diversas fases de uma DEA nuvem-solo. A primeira fase passa pela distribuição da carga eléctrica no interior de uma nuvem do tipo Cumulus Nimbus.

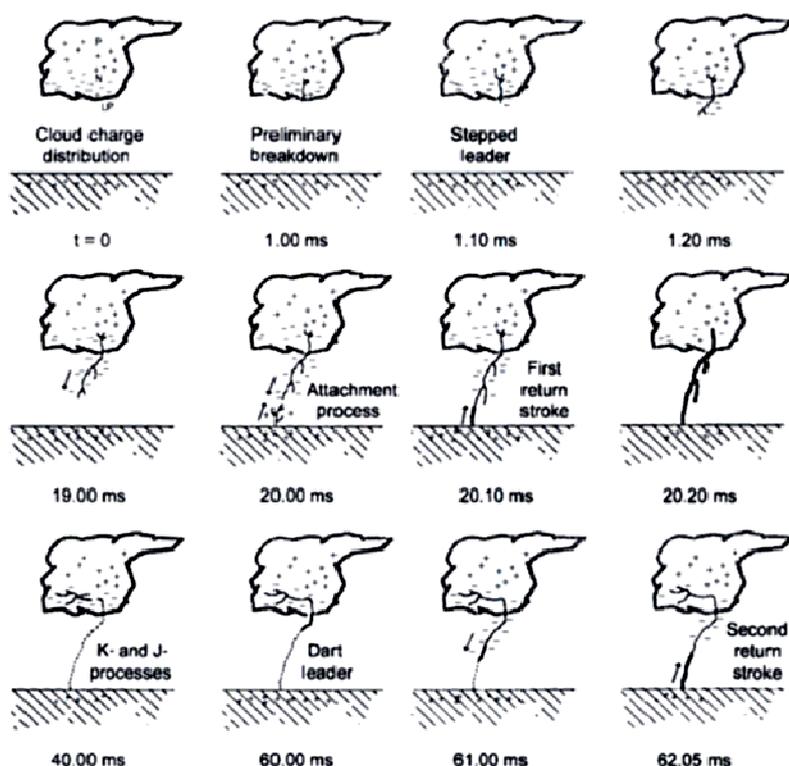


Fig. 2.6 – Processos envolvidos numa DEA nuvem-solo negativa [24]

Não se reúne ainda consenso sobre o modo como a carga eléctrica é originada nem o porquê da sua distribuição. Tão pouco reúne consenso o processo de disrupção preliminar (*Preliminary Breakdown*). No entanto sabe-se que quando o campo eléctrico atinge valores da ordem dos 10 kV/m dá-se início ao processo.

Durante a fase do traçador descendente gera-se um canal de plasma carregado normalmente negativamente que se propaga em direcção ao solo à velocidade de $2 \times 10^5 \text{ ms}^{-1}$. O traçador descendente propaga-se por saltos com uma duração aproximada de 1 μs e intervalos entre saltos de 20-50 μs .

Julga-se que a forma denteada e errónea do canal ionizado se deve à existência de bolsas ionizadas, as quais são arrastadas ao sabor de fortes ventos, no percurso do traçador descendente.

Com a aproximação ao solo do traçador descendente criam-se condições para se iniciar o traçador ascendente com carga contrária à do traçador descendente. Diversos traçadores ascendentes têm início, mas apenas um terá sucesso e se reunirá com o traçador descendente formando assim o canal de descarga.

Com a junção dos traçadores descendente e ascendente dá-se a primeira descarga de corrente do solo para a nuvem, no caso das DEA negativas, à qual se chama primeiro arco-de-retorno.

O arco-de-retorno serve para neutralizar a carga do canal ionizado e enquanto dura brilha intensamente, tornando-se visível a olho nu. As principais características da corrente do arco-de-retorno serão descritas em 2.5.

Com a passagem da corrente no canal ionizado a temperatura aumenta para uns incríveis 30000 K e cria uma pressão superior a 10 atm. Esta enorme pressão faz expandir o canal e origina uma onda sonora a que chamamos trovão.

Com o fim do primeiro arco-de-retorno iniciam-se os processos J e K os quais correspondem à reorganização de carga na base da nuvem após o aporte de carga positiva. Quando a carga na base da nuvem não pode ser equilibrada com a carga transportada pela corrente do primeiro arco-de-retorno, segue-se uma fase em que o canal ionizado é novamente atravessado no sentido descendente por um novo traçador, o qual difere do primeiro por correr continuamente pelo canal ionizado. A este traçador que se propaga em direcção ao solo à velocidade de $1 \times 10^7 \text{ ms}^{-1}$ dá-se o nome de traçador dardo (*Dart Leader*).

Quando o traçador dardo se aproxima do solo repete-se um processo semelhante ao observado para o primeiro arco-de-retorno e originam-se subsequentes arcos-de-retorno, até que a carga eléctrica entre a nuvem e o solo se equilibrem.

2.5 Parâmetros da DEA

Os parâmetros característicos da DEA nuvem-solo utilizados nesta tese são os considerados pela IEC [5] e o *Conseil International des Grands Réseaux Électriques* CIGRE (Electra N.º 41 ou N.º 69).

Existem dois tipos básicos de DEA nuvem-solo:

- DEA descendentes com início num traçador descendente da nuvem em direcção ao solo;
- DEA ascendente com início num traçador ascendente a partir de uma estrutura ligada ao solo em direcção à nuvem.

Com o aumento efectivo da altura da estrutura, a probabilidade desta ser atingida directamente pela DEA aumenta.

A corrente da DEA consiste num ou mais arcos-de-retorno:

- Arcos-de-retorno curtos, com duração inferior a 2 ms (Fig. 2.7);
- Arcos-de-retorno longos, com duração superior a 2 ms (Fig. 2.8).

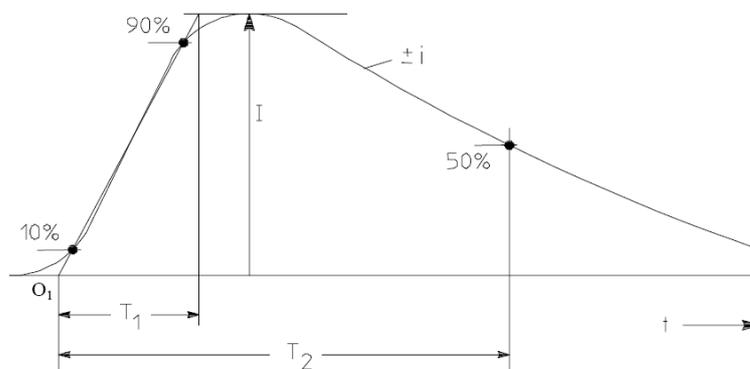


Fig. 2.7 – Definição dos parâmetros do arco-de-retorno curto ($T_2 < 2$ ms) [5]

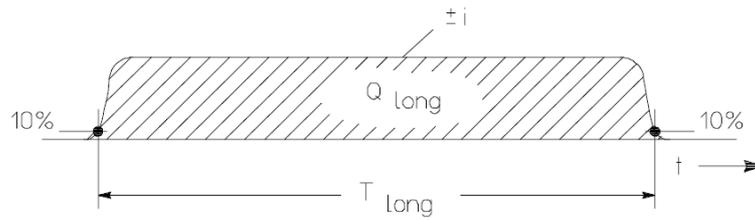


Fig. 2.8 – Definição dos parâmetros do arco-de-retorno longo ($2 \text{ ms} < T_{\text{long}} < 1 \text{ s}$) [5]

O_1 é a origem virtual; I é a corrente de pico da DEA; T_1 é o tempo de frente da onda; e T_2 é o tempo de cauda correspondente a 50 % da duração total do impulso.

Os arcos-de-retorno podem ainda diferenciar-se pela sua polaridade positiva ou negativa e pela sua ordem durante a DEA: primeiro, subsequente, sobreposto. Algumas combinações possíveis são apresentadas na Fig. 2.9.

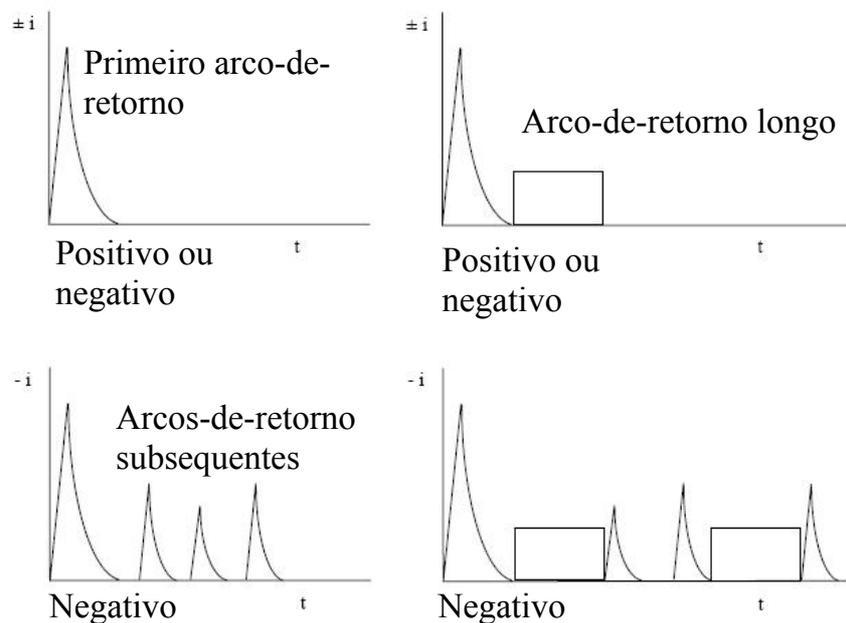


Fig. 2.9 – Possíveis combinações de arcos-de-retorno em DEA descendentes (típicas em terrenos planos e estruturas baixas) [5]

As normas IEC consideram que i representa a corrente da DEA, sendo uma variável aleatória tal que todo o valor $i > 0$ tem probabilidade de ocorrência maior que zero. Assim, $W(i)=P(i>I_a)$ será a distribuição de probabilidade acumulada de i , dada pela expressão (2.1), quer para linhas aéreas quer para cabos subterrâneos.

$$W(i) = K e^{(a-bi)} \quad \text{se } i > 0 \quad (2.1)$$

onde:

$$a = 4,617 \quad b = 0,0117 \quad \text{se } i < 20 \text{ kA}$$

$$a = 5,075 \quad b = 0,0346 \quad \text{se } i \geq 20 \text{ kA}$$

$$K = 10^{-2}$$

No entanto, Sunde [25], em cujos estudos se baseiam diversos modelos utilizados pela IEC, considerava duas curvas para a distribuição de probabilidade acumulada de i , uma para linhas aéreas, baseada em medições efectuadas nos EUA e na Europa, e outra para cabos subterrâneos, derivada da primeira.

A densidade de probabilidade $w(i)$, referida na IEC 61663-1, relaciona-se com a distribuição de probabilidade acumulada $W(i)$ segundo: $W(i) = \int_i^{+\infty} w(i) di$, o que nos conduz à expressão (2.2) apresentada na referida norma:

$$w(i) = K c e^{(a-bi)} \quad \text{se } i > 0 \quad (2.2)$$

onde:

$$a = 4,617 \quad b = 0,0117 \quad c = 0,012 \quad \text{se } i < 20 \text{ kA}$$

$$a = 5,075 \quad b = 0,0346 \quad c = 0,035 \quad \text{se } i \geq 20 \text{ kA}$$

$$K = 10^{-2}$$

A Fig. 2.10 mostra que a função $w(i)$ apresenta um comportamento diferente do resultado obtido com a função log-normal de densidade de probabilidade (2.3) considerada pela CIGRE [26]. Os valores de M e β foram obtidos experimentalmente e são os mesmos para todos os valores de i .

$$w'(i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \beta \cdot i} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln\left(\frac{i}{M}\right)}{\beta} \right)^2} \quad \text{se } i > 0 \quad (2.3)$$

onde:

$M = 31,1$ é o valor médio

$\beta = 0,484$ é o desvio padrão logarítmico

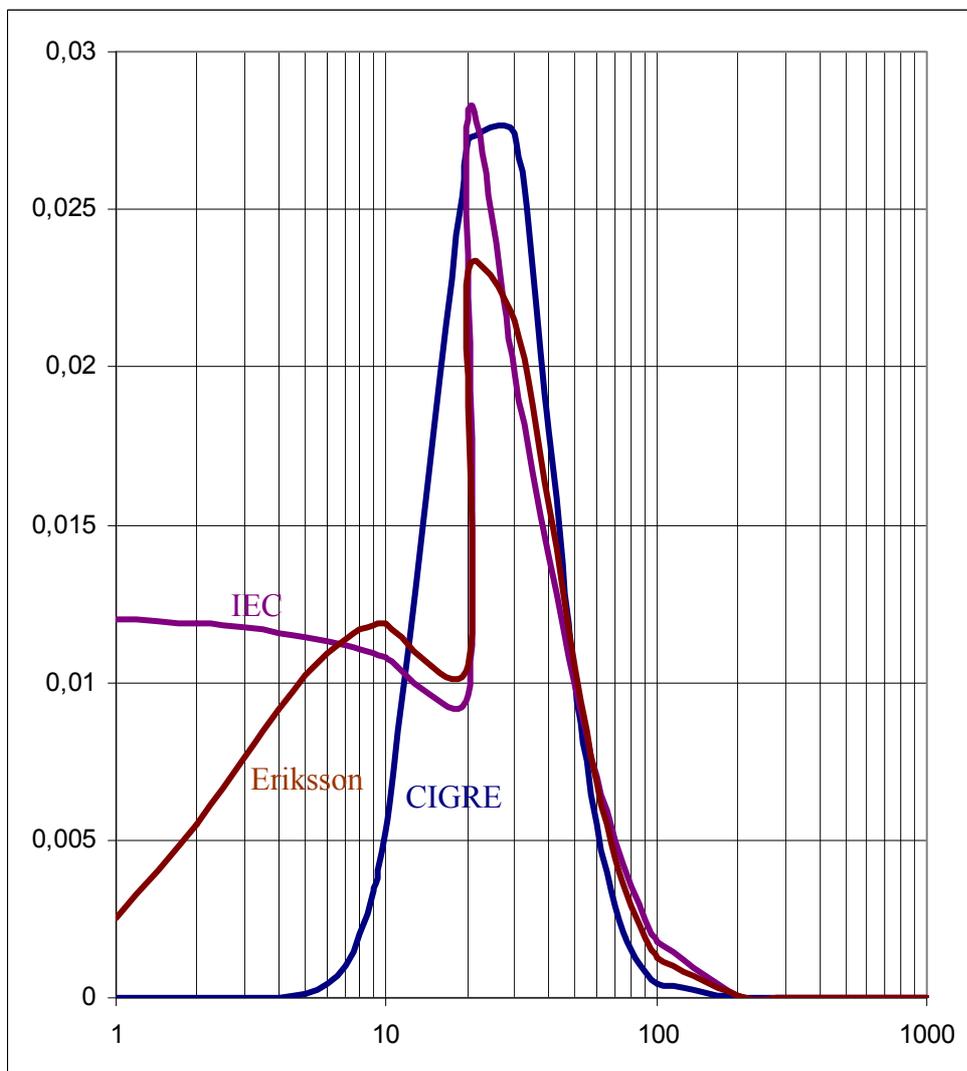


Fig. 2.10 – Densidade de probabilidade de i segundo IEC 61663-1, CIGRE e Eriksson [27]

E, segundo Andersen e Eriksson [28], o primeiro arco-de-retorno não segue a distribuição log-normal para todos os valores de i , pelo que, experimentalmente consideram a seguinte atribuição:

$$M=61,1 \quad e \quad \beta=1,33 \quad \text{para } I \leq 20 \text{ kA};$$

$$M=33,3 \quad e \quad \beta=0,61 \quad \text{para } I > 20 \text{ kA}.$$

Importa ainda realizar uma classificação das sobretensões originadas pelas DEA, a qual está ligada ao facto dos materiais isolantes serem sensíveis à forma de onda incidente.

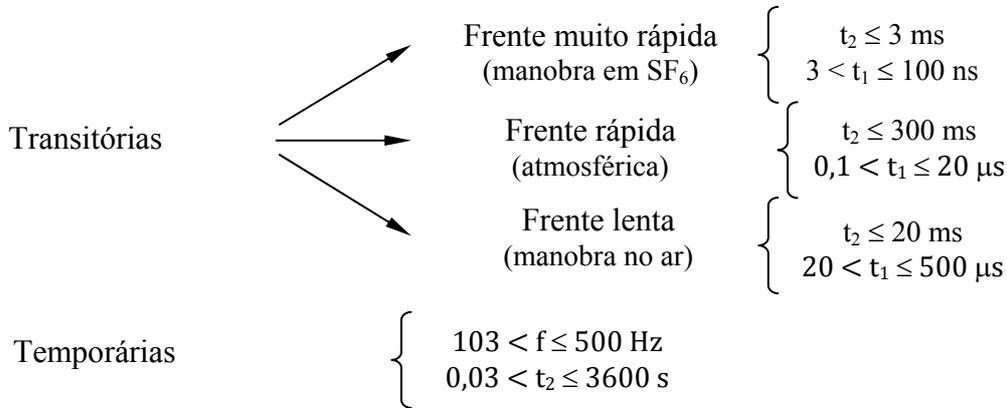
Até 1993, as sobretensões eram classificadas como tendo uma origem externa ou interna, relativamente ao sistema de energia eléctrica, conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Classificação oficial das sobretensões até 1993, segundo a IEC

Origem das sobretensões	Classificação das sobretensões	Forma de onda
Externa	Atmosférica	Transitória impulsiva
Interna	Manobra	Transitória impulsiva
Interna	Temporária	À frequência industrial

A introdução do hexafluoreto de enxofre (SF_6) como meio isolante gasoso, nos equipamentos de Alta Tensão (AT), veio reduzir as distâncias de isolamento, originando sobretensões de manobra com frentes mais rápidas que as atmosféricas, devido à sobreposição das ondas reflectidas.

Assim, a classificação das sobretensões segundo a IEC 61071-1, desde 1993, é a seguinte:



Os parâmetros da corrente da DEA utilizados nesta tese são os que constam da Tabela 2.2. A distribuição estatística considerada em [5] tem uma distribuição log-normal.

O correspondente valor médio μ e a dispersão σ_{\log} são dados na Tabela 2.3, e a função de distribuição é apresentada na Fig. 2.11.

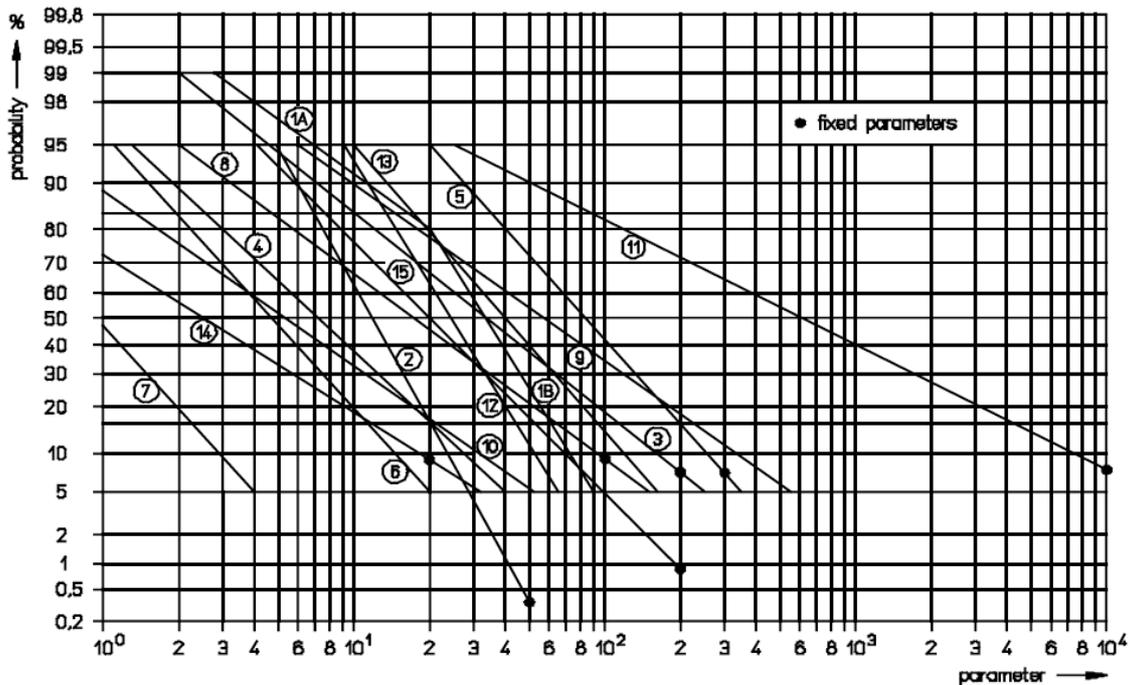


Fig. 2.11 – Distribuição da frequência acumulada dos parâmetros da DEA [5]

Tabela 2.2 - Valores dos parâmetros da DEA de CIGRE (Electra N.º 41 ou N.º 69) e [5]

Parâmetro	Valores para o Nível de protecção	Valores			Tipo de arco-de-retorno	Curva na Fig. 2.11
		95%	50%	5%		
I (kA)	50	4	20	90	1.º negativo curto	1A e 1B
		4,9	11,8	28,6	Subsequente negativo curto	2
	200	4,6	35	250	1.º positivo curto (único)	3
Q _{DEA} (C)		1,3	7,5	40	Negativa	4
	300	20	80	350	Positiva	5
Q _{curto} (C)	100	1,1	4,5	20	1.º negativo curto	6
		0,22	0,95	4	Subsequente negativo curto	7
		2	16	150	1.º positivo curto (único)	8
W/R (kJ/Ω)	10000	6	55	550	1.º negativo curto	9
		0,55	6	52	Subsequente negativo curto	10
		25	650	15000	1.º positivo curto	11
di/dt _{máx} (kA/μs)	20	9,1	24,3	65	1.º negativo curto	12
		9,9	39,9	162	Subsequente negativo curto	13
		0,2	2,4	32	1.º positivo curto	14
di/dt _{30/90%} (kA/μs)	200	4,1	20,1	98,5	Subsequente negativo curto	15
Q _{longo} (C)					Longo	
T _{longo} (s)					Longo	
Duração da frente (μs)		1,8	5,5	18	1.º negativo curto	
		0,22	1,1	4,5	Subsequente negativo curto	
		3,5	22	200	1.º positivo curto (único)	
Duração do arco (μs)		30	75	200	1.º negativo curto	
		6,5	32	140	Subsequente negativo curto	
		25	230	2000	1.º positivo curto (único)	
Intervalo de tempo (ms)		7	33	150	Múltiplos arcos-de-retorno negativos	
Duração total da DEA (ms)		0,15	13	1100	DEA negativa (todos)	
		31	180	900	DEA negativa (sem unitário)	
		14	85	500	DEA positiva	

Tabela 2.3 - Valores de μ e σ_{\log} de CIGRE (Electra N.º 41 ou N.º 69) e [5]

Parâmetro	Média μ	Dispersão σ_{\log}	Tipo de arco-de-retorno	Curva na Fig. 2.11
I (kA)	61,1	0,576	1.º negativo curto (>80%)	1A
	33,1	0,263	1.º negativo curto (<80%)	1B
	11,8	0,233	Subsequente negativo curto	2
	33,9	0,527	1.º positivo curto (único)	3
Q _{DEA} (C)	7,21	0,452	Negativa	4
	83,7	0,378	Positiva	5
Q _{curto} (C)	4,69	0,383	1.º negativo curto	6
	0,938	0,383	Subsequente negativo curto	7
	17,3	0,57	1.º positivo curto (único)	8
W/R (kJ/ Ω)	57,4	0,596	1.º negativo curto	9
	5,35	0,6	Subsequente negativo curto	10
	612	0,844	1.º positivo curto	11
di/dt _{máx} (kA/ μ s)	24,3	0,26	1.º negativo curto	12
	40	0,369	Subsequente negativo curto	13
	2,53	0,67	1.º positivo curto	14
di/dt _{30/90%} (kA/ μ s)	20,1	0,42	Subsequente negativo curto	15
Q _{longo} (C)			Longo	
T _{longo} (s)			Longo	
Duração da frente (μ s)	5,69	0,304	1.º negativo curto	
	0,995	0,398	Subsequente negativo curto	
	26,5	0,534	1.º positivo curto (único)	
Duração do arco (μ s)	77,5	0,26	1.º negativo curto	
	30,2	0,405	Subsequente negativo curto	
	224	0,578	1.º positivo curto (único)	
Intervalo de tempo (ms)	32,4	0,405	Múltiplos arcos-de-retorno negativos	
Duração total da DEA (ms)	12,8	1,175	DEA negativa (todos)	
	167	0,445	DEA negativa (sem unitário)	
	83,7	0,472	DEA positiva	

Com base nesses valores é assim possível calcular a probabilidade de ocorrência de qualquer parâmetro. Para as regiões onde não é conhecido o rácio de DEA positivas/negativas, assume-se 10 % de DEA positivas e 90 % de negativas. Todos os valores indicados na Tabela 2.2 [5] são válidos, quer para as DEA descendentes, quer para as ascendentes.

Os valores indicados nas Tabelas 2.2 e 2.3 [5] foram, regra geral, obtidos por medições em torres altas instrumentadas e o chamado “efeito torre” não é considerado na correcção dos valores medidos da corrente de pico, os quais tendem a ser mais elevados.

CAPÍTULO

3

Caracterização da Actividade Ceráunica em Portugal Continental

Neste capítulo é apresentado o estudo realizado à actividade ceráunica sobre o território de Portugal continental. Os dados experimentais foram recolhidos pelo Sistema de Localização Automática de DEA e cedidos para o propósito desta tese pelo IM. Após uma breve revisão sobre os diversos sistemas de detecção e localização, com especial enfoque para o sistema utilizado em Portugal, apresentam-se os resultados obtidos. Os resultados correspondem aos primeiros cinco anos de funcionamento deste sistema com quase quatro milhões de registos e incluem, entre outros, distribuição geográfica, sazonal e de polaridade, e probabilidade acumulada da corrente de pico das descargas eléctricas nuvem-solo.

3.1 Introdução

Antes do desenvolvimento dos radares meteorológicos diversos sistemas foram utilizados para identificar e mapear trovoadas a médias e longas distâncias.

De acordo com Norinder [29], as primeiras medições efectuadas de modo a compreender os campos electromagnéticos produzidos por DEA distantes foram levadas a cabo pelo físico russo Popoff em 1895. Popoff utilizou um receptor de ondas da telegrafia sem fios inventado por Brandley em 1890.

O tubo de vácuo de DeForest's e o detector de direcção de raios catódicos, *Cathode Ray Direction Finder* (CRDF) de Watson-Watt e Herd [30], que utiliza duas antenas ortogonais sintonizadas para a frequência de 10 kHz, permitiram detectar com bastante precisão o campo magnético horizontal emitido pelas DEA.

A determinação do azimute do ângulo permite traçar um vector que aponta para a DEA e é obtido cruzando a informação da antena NS com a da antena WE e visualizando o resultado num osciloscópio [31]. Dois ou mais CRDFs localizados em posições conhecidas eram suficientes para determinar a localização da DEA a partir da intersecção dos vectores de direcção fornecidos por cada CRDF. Estes sistemas foram usados até ao final da II Guerra Mundial.

3.2 Sistemas de Localização de DEA

As DEA nuvem-solo são tipicamente detectadas em VLF/LF e os detectores encontram-se espaçados entre 50 a 400 km. As DEA nuvem-solo são localizadas em função do seu ponto de impacto no solo ou em objectos implantados no solo. Estes sistemas utilizam diversos métodos de detecção da direcção, tempo de chegada (TOA – *Time of Arrival*) e combinações destes.

Método de detecção da direcção magnética

Em 1976 um sistema melhorado de detecção de direcção magnética, *Direction Finders* (DF), foi desenvolvido para detectar DEA nuvem-solo com um alcance de 500 km [32] e [33].

Este sistema era operado de modo a cobrir as bandas VLF e LF desde 1 a 500 kHz, tendo sido desenhado para responder às ondas de campo características dos arcos-de-retorno das DEA nuvem-solo [33].

O campo eléctrico também é detectado para determinar a polaridade da DEA. Numa rede de DFs, a localização da DEA pode ser obtida por triangulação (Fig. 3.1) e o pico da corrente pode ser estimado através da medição da amplitude do campo magnético.

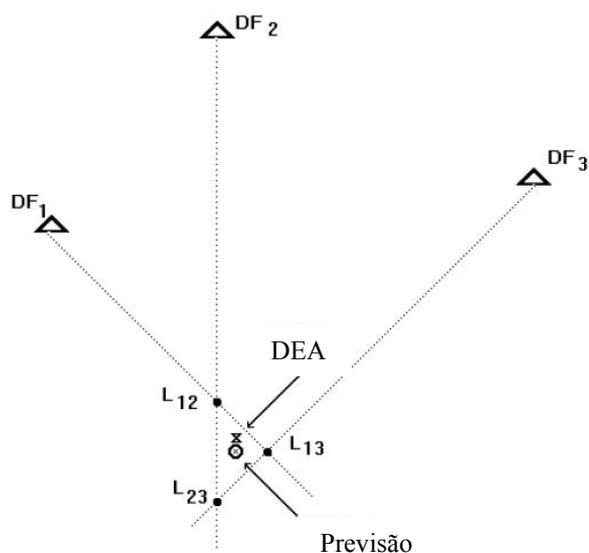


Fig. 3.1 – Situação óptima para o método DF [33]

Este método encontra dificuldades quando a DEA ocorre ao longo da linha imaginária que une dois DFs e estes são os únicos a detectarem a DEA. Por esta razão, na prática, os sistemas de localização de DEA usam sempre pelo menos três DFs.

Os três pontos L12, L13 e L23 mostram as possíveis localizações se apenas dois DFs forem considerados. Com mais de dois DFs fica definido um polígono no centro do qual se situa a localização mais provável.

Método do instante de detecção

Lewis et al. [34] descreveram um método para localizar DEA baseado no instante de detecção, TOA, de um impulso rádio. Para tal é necessário que as diversas estações possuam relógios sincronizados com elevada precisão.

Sendo conhecida a velocidade de propagação da onda electromagnética no ar, calcula-se a diferença entre as distâncias (Δd) a que a DEA ocorreu de cada detector. A curva que contém todos os pontos que são Δd mais próximos de um detector que do outro corresponde ao ramo de uma hipérbole.

Múltiplos detectores definem múltiplas hipérbolas que ao intersectarem-se identificam a localização da fonte da perturbação, isto é, a DEA. No entanto, em determinadas circunstâncias as hipérbolas originadas por três detectores podem provocar duas intersecções criando uma localização ambígua.

Lewis *et al.* propuseram que se considerassem apenas as DEA suficientemente afastadas dos detectores de modo a que as hipérbolas associadas apontassem aproximadamente na mesma direcção. Este método ficou conhecido por método da direcção hiperbólica (*hyperbolic direction finding*) e é apresentado na Fig. 3.2.

O método TOA proporciona localizações precisas a longas distâncias [35]. Casper e Bent [36] desenvolveram um receptor TOA de banda larga designado por *Lightning Position and Tracking System* (LPATS) adequado para detecção de DEA a médias e longas distâncias que se baseia no método da direcção hiperbólica [37].

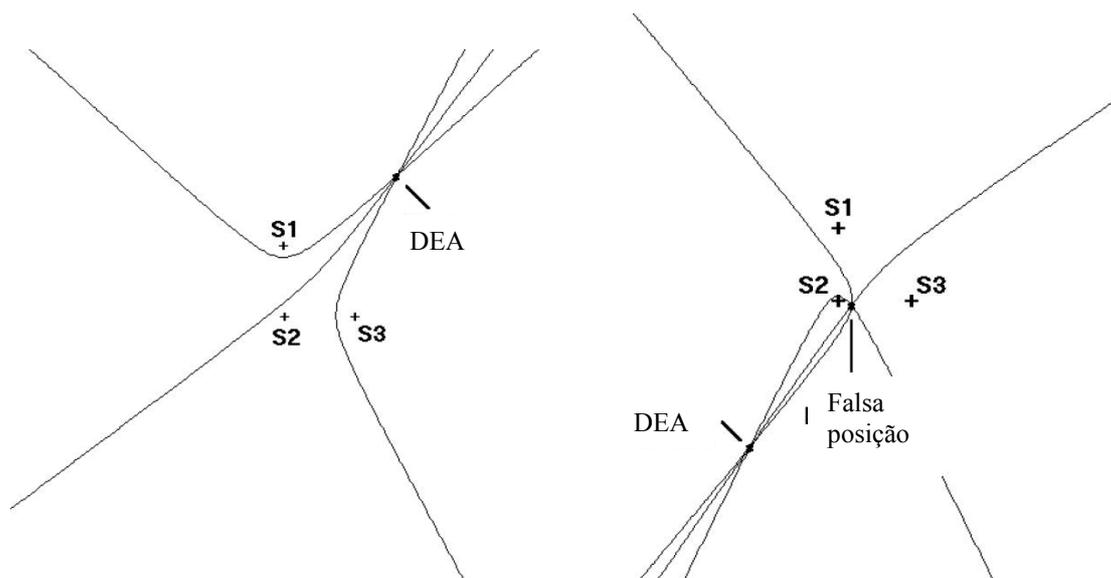


Fig. 3.2 – a) Método TOA da direcção hiperbólica. b) Exemplo de ambiguidade [34]

Método combinado (IMPACT)

No início da década de noventa a *Global Atmospheric Inc. (GAI)* desenvolveu um novo sistema de localização de DEA combinando as técnicas DF e TOA, o qual ficou conhecido por *Improved Accuracy Using Combined Technology (IMPACT)*.

Este sistema possui assim informação redundante, o que lhe permite localizar DEA mesmo em situações de geometria adversa como seja a ocorrência de uma DEA na linha de vista entre dois detectores. O algoritmo IMPACT pode utilizar informação de qualquer detector DF, TOA ou combinados.

A Fig. 3.3 apresenta um exemplo de uma localização com cinco detectores dos quais três são IMPACT e dois são LPATS TOA. As medidas de direcção são representadas por vectores de direcção (IMPACT), e os círculos em redor de cada detector representam a contribuição dos detectores LPATS TOA.



Fig. 3.3 – Exemplo de localização do algoritmo IMPACT [34]

As DEA nuvem-nuvem também podem ser detectadas e localizadas com alguma precisão usando os mesmos sinais VLF/LF. Estes sistemas incorporam detectores modificados mas utilizam toda a demais tecnologia tornando-os economicamente vantajosos. Os sinais em VLF/LF propagam-se muito bem em terrenos montanhosos o que representa outra das suas vantagens.

Método da detecção a longa distância VLF

Desde que os detectores sejam sensíveis aos campos electromagnéticos em VLF e LF, eles serão capazes de detectar sinais “esféricos” em VLF, produzidos por DEA nuvem-solo a muito longas distâncias. Estes sinais propagam-se milhares de quilómetros por reflexão na ionosfera, como foi apresentado na Fig. 2.4.

Assim, os detectores VLF/LF podem ser simultaneamente utilizados para a sua função convencional, mas também para esta detecção a longa distância. No entanto, a informação recolhida pelos detectores terá de ser processada de um modo que discrimine as ocorrências a muito longa distância das restantes relativamente próximas.

Um estudo sobre este tipo de detecção a longa distância desenvolvido pela GAI foi efectuado por Cramer e Cummins [38].

Um sistema alternativo de detecção de sinais “esféricos” em VLF, baseado nas diferenças do instante de detecção, foi descrito por Lee [35] e exemplificado na Fig. 3.3.

Apesar desta técnica apenas ser capaz de detectar uma fracção das DEA que ocorrem durante uma trovoadas, é suficiente para informar sobre a formação de trovoadas em áreas onde não é possível instalar detectores como sejam os oceanos.

Método da detecção 2D e 3D em VHF

A utilização das componentes de alta frequência das DEA nuvem-nuvem (UHF/VHF), seja pelos métodos TOA ou DF, permite mapear as DEA em duas ou 3 dimensões (2D/3D).

Estes sistemas conseguem mapear detalhadamente as DEA mas perde-se a informação sobre a polaridade, carga, intensidade da corrente e a área coberta é muito mais limitada.

Ainda assim estes sistemas representam hoje uma forte promessa na recolha de enormes quantidades de informação, a qual permitirá caracterizar com muito mais rigor a evolução das trovoadas e a sua gravidade.

Método da detecção DF baseada na Interferometria VHF

Hayenga e Warwick [39] mostraram que o interferómetro podia ser utilizado para medir os ângulos do azimute e da elevação de DEA em VHF. O interferómetro é um aparelho utilizado para efectuar medidas de ângulos e distâncias aproveitando a interferência de ondas electromagnéticas que ocorre quando estas interactuam entre si.

Um exemplo de interferência que pode ocorrer numa onda é comum nas transmissões radiofónicas em ondas curtas. O sinal transmitido pode vir do transmissor para o receptor por dois caminhos. Por onda directa, quando a radiofrequência se propaga próxima ao solo, e por onda reflectida, quando o mesmo sinal vai do transmissor para o receptor por via ionosférica, isto é, o sinal de rádio reflecte na ionosfera.

Quando isto ocorre há uma divisão da emissão original. O total do sinal recebido pelo receptor é representado pela subtracção ou soma da onda reflectida em relação à onda directa. Isto é notado como uma oscilação constante do volume de áudio que aumenta e diminui constantemente.

Rhodes [40] e Shao [41] desenvolveram e usaram um sistema de estações individuais, baseado na interferometria, capaz de projectar num plano a actividade ceráunica e aumentar o conhecimento que temos das DEA nuvem-nuvem e nuvem-solo.

Richard et al. [42] e [43] desenvolveram redes de estações de interferómetros capazes de localizar e mapear fontes de radiação VHF em 2D e 3D com elevada resolução temporal. Este método encontra-se já comercializado para detecção de DEA nuvem-nuvem e nuvem-solo, conforme é referido em [44] e [45].

Tal como nos sistemas DF em VLF/LF a precisão de localização é limitada e dependente do espaçamento entre estações, principalmente em 3D.

Método TOA a operar em VHF

Proctor [23] mostrou que, com as diferenças medidas entre os instantes de detecção de pelo menos quatro estações rigorosamente sincronizadas, é possível mapear em 3D as fontes destas radiofrequências. Este método de localização não é mais que uma extensão do método TOA a 2D de intersecções hiperbólicas discutido anteriormente. Mais recentemente o *NASA Kennedy Space Center* desenvolveu o *Lightning Detection and Ranging System*, capaz de proporcionar localizações 3D, com processamento de mais de 1000 impulsos por DEA, em tempo real [46] e [47]. A Fig. 3.4 [18] apresenta uma DEA nuvem-solo onde se podem observar centenas de impulsos VHF, representados por pontos coloridos. A mudança de cor denota a sequência temporal. A Fig. 3.4 permite-nos observar que o rearranjo da carga eléctrica se dá ao longo de aproximadamente 20 km entre os 5 e os 8 km de altitude.

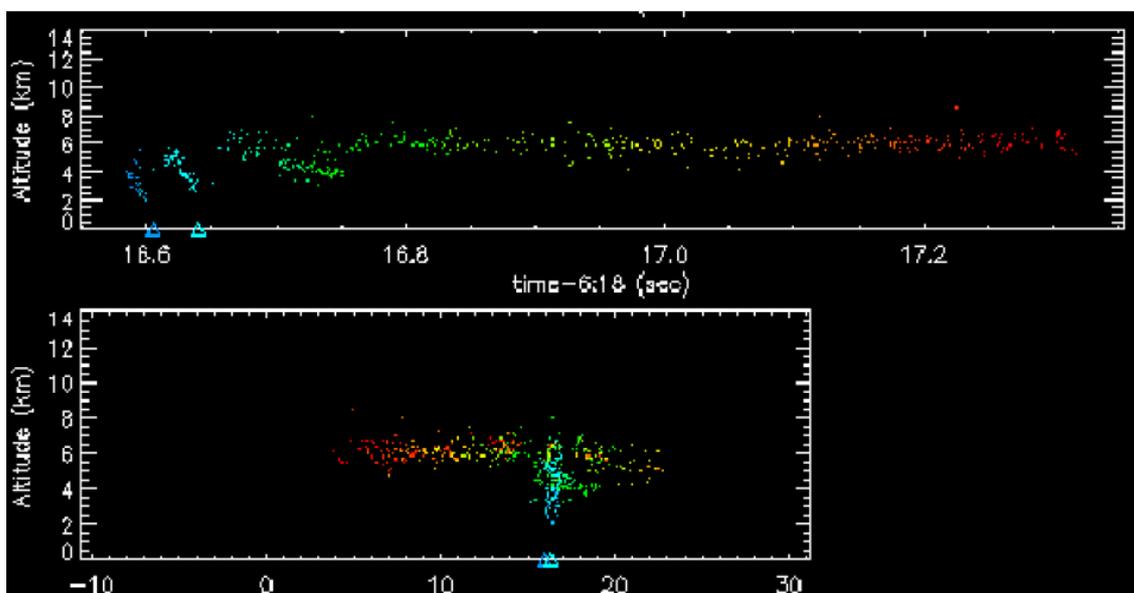


Fig. 3.4 – Em cima: representação altitude/tempo de DEA nuvem-solo; em baixo: representação altitude/distância horizontal em direcção a norte de DEA [18]

A Fig. 3.5 [18] mostra duas DEA nuvem-nuvem. Ambas as DEA são típicas DEA nuvem-nuvem onde ocorrem entre uma zona negativa a cerca de 6 km de altitude e uma zona positiva a cerca de 10 km, conforme previsto por Shao e Krehbiel [14].

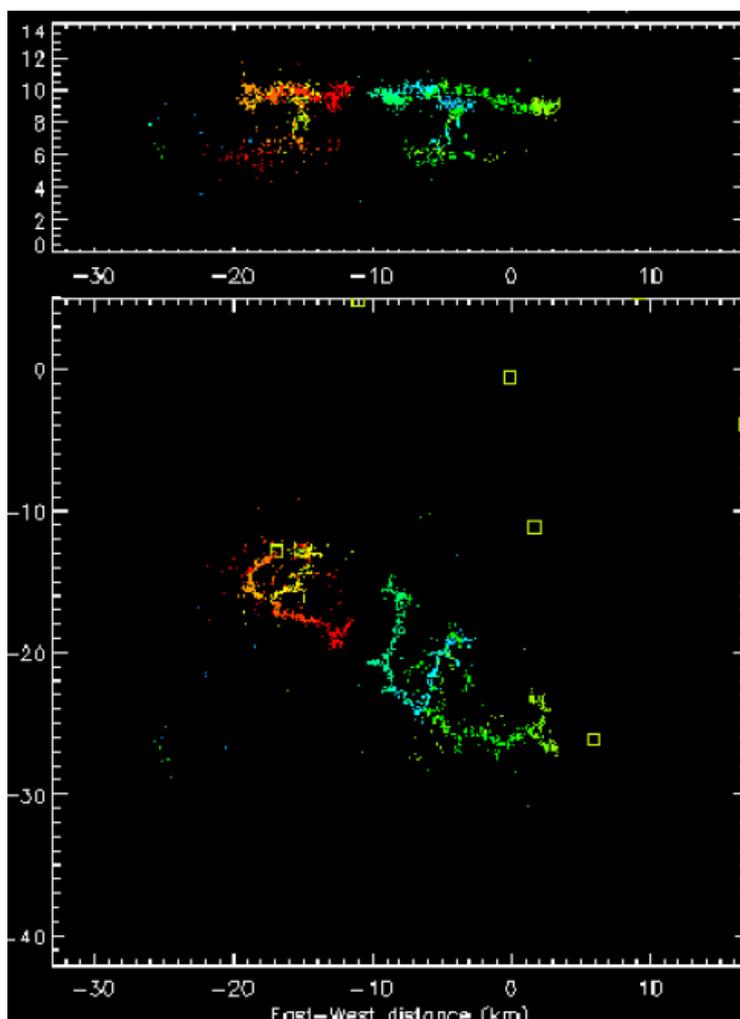


Fig. 3.5 – Em cima: representação altitude/distância horizontal em direcção a norte de DEA nuvem-nuvem; em baixo: representação XY de DEA [18]

O desenvolvimento dos modernos LLS foi sem dúvida impulsionado pelo interesse científico mas também por uma variedade de necessidades de ordem prática.

Os LLS têm sido instalados por todo o planeta de modo a monitorizar e registar a actividade ceráunica.

Estes sistemas encontram-se activos em muitos países tais como os Estados Unidos [48], Reino Unido [49], Japão [50] e [51], Canada [52], Áustria [53], Itália [54], Guang-Dong na China [55] e [56], e Arábia Saudita [57]. Os Estados Unidos possuem a maior rede de detectores os quais registaram mais de 216 milhões de DEA nuvem-solo durante a primeira década de operação (1989–1998).

3.3 Sistema de Localização de DEA em Portugal

Na maioria dos países do mundo, e até 2002 também em Portugal, a actividade ceráunica era estudada recorrendo a observadores, espalhados pelo território, que registavam o número de dias de trovoada. Com estas indicações os meteorologistas construíam mapas de nível isoceraunico T_d (*Thunderstorm Days Map*). O mapa da Fig. 3.6 foi construído com a média dos resultados de 30 anos de registos.

Este método de estudo possui diversas desvantagens, tais como: a baixa confiabilidade nos observadores humanos; a impossibilidade de se contabilizar o número de DEA durante uma trovoada; a impossibilidade de se distinguir entre DEA nuvem-solo ou nuvem-nuvem; a impossibilidade de se efectuar uma localização precisa do ponto de impacto, entre outras medições impossíveis de realizar sem o auxílio de equipamento especializado.

Mapas isoceraunicos construídos com médias de resultados, como o da Fig. 3.6, não reflectem a variabilidade da actividade ceráunica ao longo do ano nem ao longo dos anos.

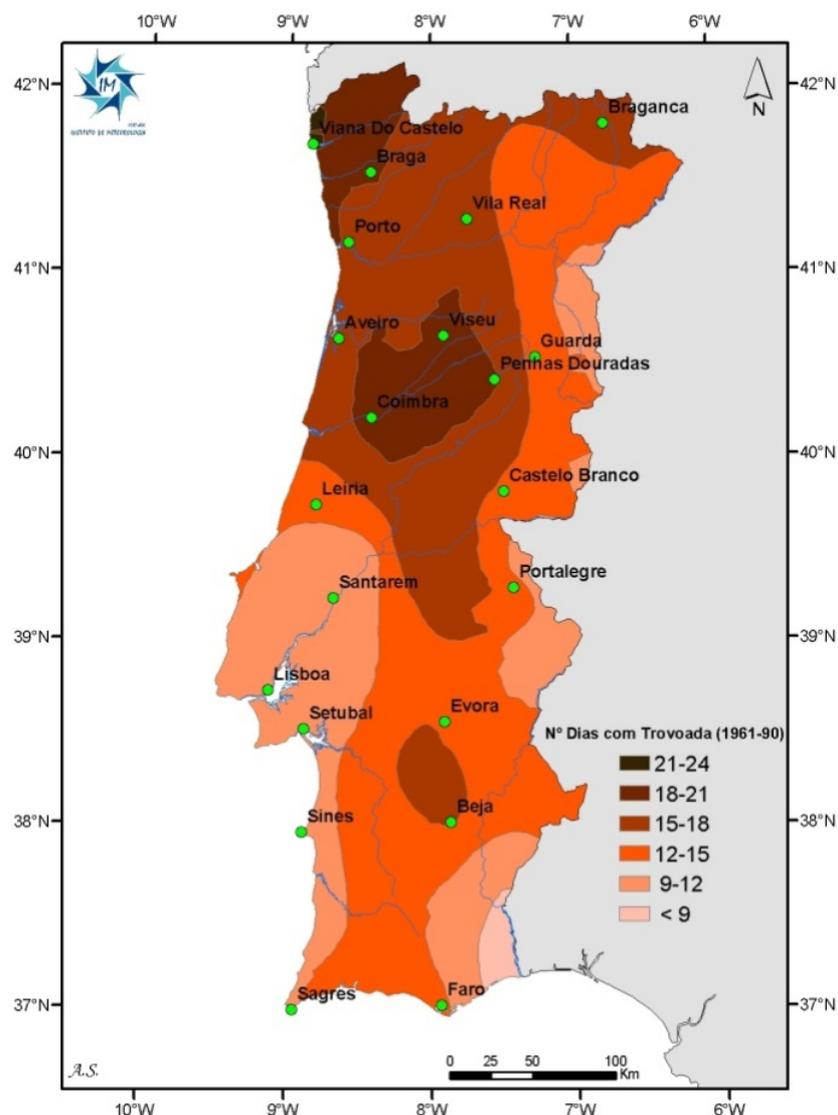


Fig. 3.6 – Mapa de nível isoceraunico de Portugal continental, desde 1961 até 1990

(Fonte: IM)

Com o objectivo de melhorar a vigilância meteorológica e apoiar as previsões do estado do tempo e, em particular, a ocorrência de trovoadas e de precipitação muito intensa que frequentemente lhes está associada, o IM tem em funcionamento, desde Junho de 2002, um LLS no território continental e áreas oceânicas adjacentes, o qual é essencialmente constituído por 4 detectores IMPACT 141T-ESP, 1 sistema LP2000 e software CATS.

Os detectores que se encontram instalados em Braga, no Aeródromo, Fig. 3.7, em Castelo Branco, no Centro Coordenador do IM, em Alverca, no Aeródromo e em Olhão, na Quinta de Marim, utilizam o método combinado IMPACT descrito anteriormente. A transmissão destas variações é feita através de linhas telefónicas dedicadas a um concentrador/processador de localização LP2000, instalado na sede do IM, em Lisboa. Ao concentrador estão ligados terminais remotos onde é possível a visualização da informação disponibilizada pelo sistema-rede e acessibilidade a sistema de alarmes.

No âmbito deste sistema-rede (Fig. 3.8) está a ser efectuado o intercâmbio de dados dos 4 detectores instalados em Portugal com o Instituto Nacional de Meteorologia de Espanha, relativamente a 4 detectores localizados em Santiago de Compostela, em Salamanca, em Córdoba e em Jerez de la Frontera, o que permite melhorar em ambos os países a eficiência dos sistemas-rede e o rigor na detecção e localização de DEA (Fig. 3.9). Relativamente a cada DEA nuvem-nuvem e nuvem-solo, é disponibilizada pelo sistema rede de detectores de trovoadas a seguinte informação (Fig. 3.10):

- Data e hora;
- Latitude e longitude;
- Intensidade da corrente de pico e polaridade;
- Multiplicidade do raio;
- Quantidade de detectores que intervêm na localização;
- Precisão da localização.

O sistema-rede de detectores de DEA (Fig. 3.9) permite:

- No território de Portugal continental: erro na localização de DEA inferior a 0,5 km; eficiência na detecção de DEA da ordem de 90 %;
- Na faixa costeira de 50 milhas marítimas, i.e., 92,6 km, de Portugal continental: erro na localização de DEA entre 0,5 e 2,0 km; eficiência na detecção de DEA entre 80 e 90 %.



Fig. 3.7 – Detector instalado em Braga e aspecto das antenas electromagnéticas
(Fonte: IM)

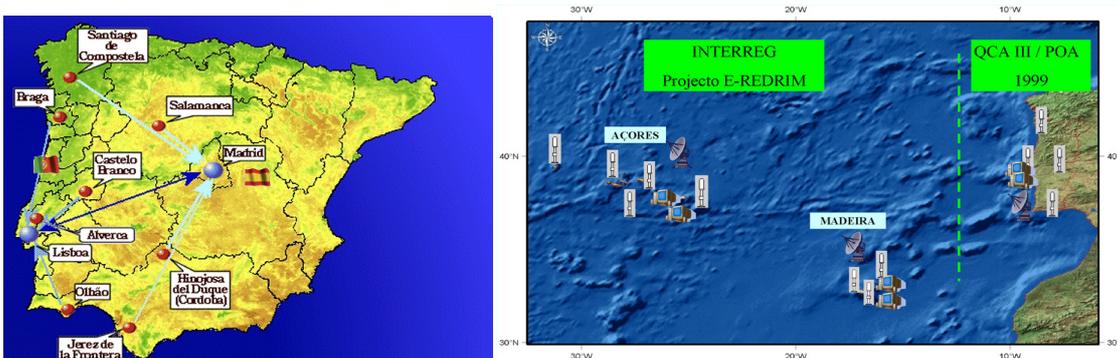


Fig. 3.8 – Localização actual dos detectores IMPACT e expansão prevista ao território insular (Fonte: IM)

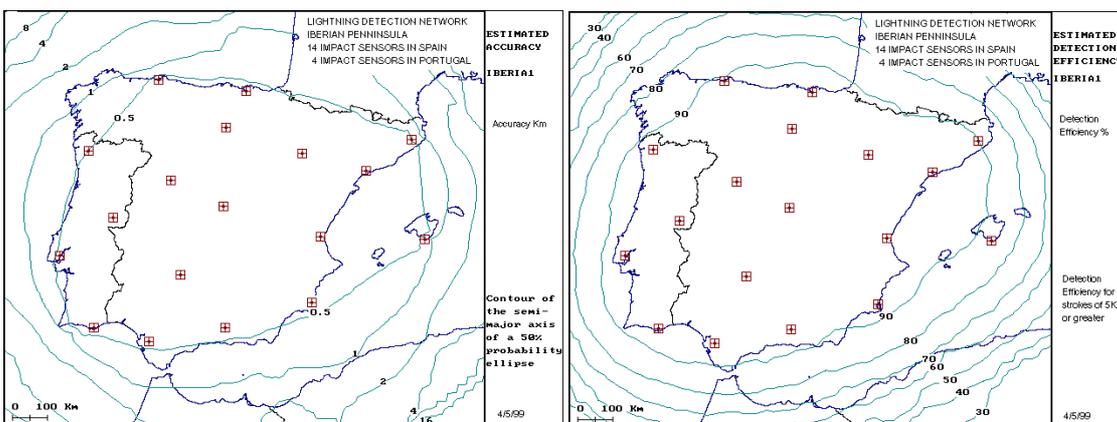


Fig. 3.9 – Precisão de localização e eficiência de detecção para DEA maiores que 5 kA
(Fonte: IM)

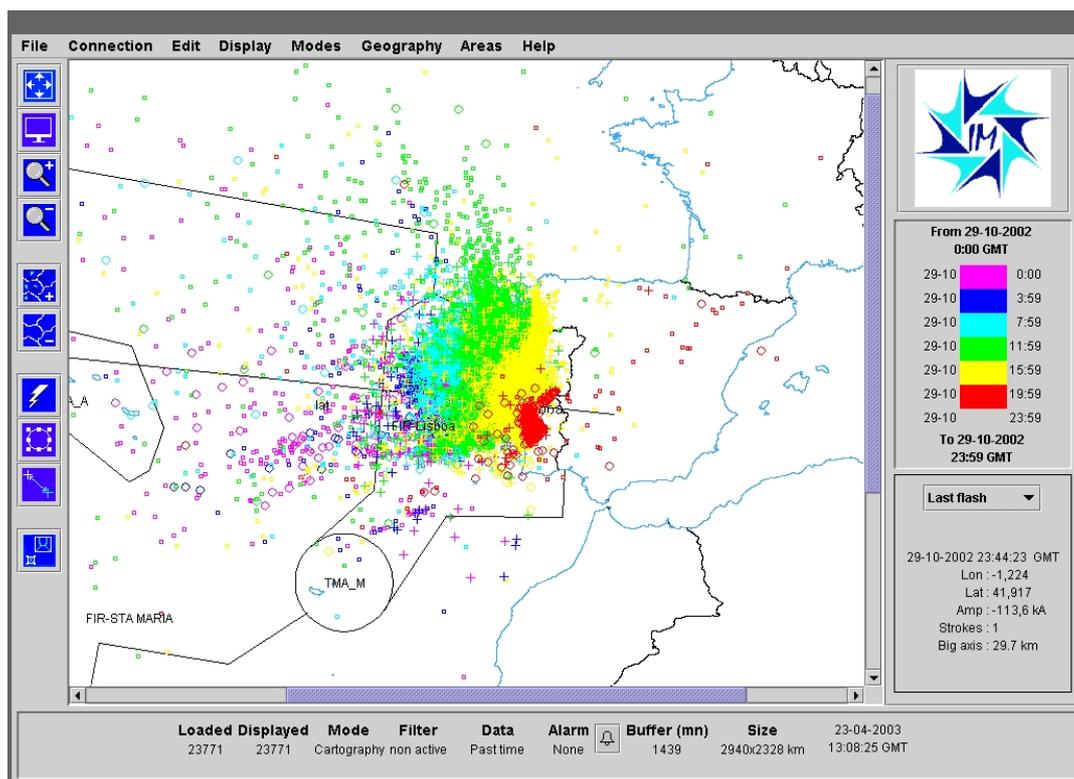


Fig. 3.10 – Aspecto da visualização obtida em 29/10/2002 (Fonte: IM)

3.4 Método de Análise

Os dados utilizados nesta tese abrangem o período entre Junho de 2002 e Dezembro de 2007 e foram gentilmente cedidos pelo IM. O sistema de localização de DEA em operação em Portugal continental regista ocorrências em lugares tão distantes como os Açores, Suíça, Argélia e Reino Unido. Tais ocorrências não interessam ao estudo presente, limitado ao território continental Português e, em consequência, a imprecisão associada a esses registos é de tal forma elevada que os torna inúteis. Verifica-se que em ocorrências muito afastadas de Portugal o campo de informação da corrente de pico pode apresentar o valor zero. O algoritmo de validação do sistema regista o modo de cálculo utilizado na detecção e marca com “N” todos os registos com menor fiabilidade. Nesta tese utilizam-se apenas os dados que merecem maior fiabilidade.

A Tabela 3.1 apresenta o universo dos registos disponíveis classificados em “I = 0”, “Calc = N” e “Útil”, sendo este último grupo o que contém a informação utilizável. Para além do grupo de registos “Calc = N” já referido anteriormente, o grupo de registos “I = 0” corresponde a detecções longínquas e sem precisão.

Tabela 3.1

Agrupamento dos registos segundo critérios de validação

Ano	I=0	Calc=N	+	-	Útil	Total
2002	35185	191296	5423	11475	16898	243379
	14,5%	78,6%	2,2%	4,7%	6,9%	100,0%
2003	158145	272138	36838	179079	215917	646200
	24,5%	42,1%	5,7%	27,7%	33,4%	100,0%
2004	119141	235381	27191	173826	201017	555539
	21,4%	42,4%	4,9%	31,3%	36,2%	100,0%
2005	137921	249807	31089	211483	242572	630300
	21,9%	39,6%	4,9%	33,6%	38,5%	100,0%
2006	152783	334427	56271	289416	345687	832897
	18,3%	40,2%	6,8%	34,7%	41,5%	100,0%
2007	197,786	474,101	66,047	309125	375172	1047059
	18,9%	45,3%	6,3%	29,5%	35,8%	100,0%
Total	800961	1757150	222859	1174404	1397263	3955374
	20,2%	44,4%	5,6%	29,7%	35,3%	100,0%

A Fig. 3.11 apresenta sob a forma gráfica a informação anterior.

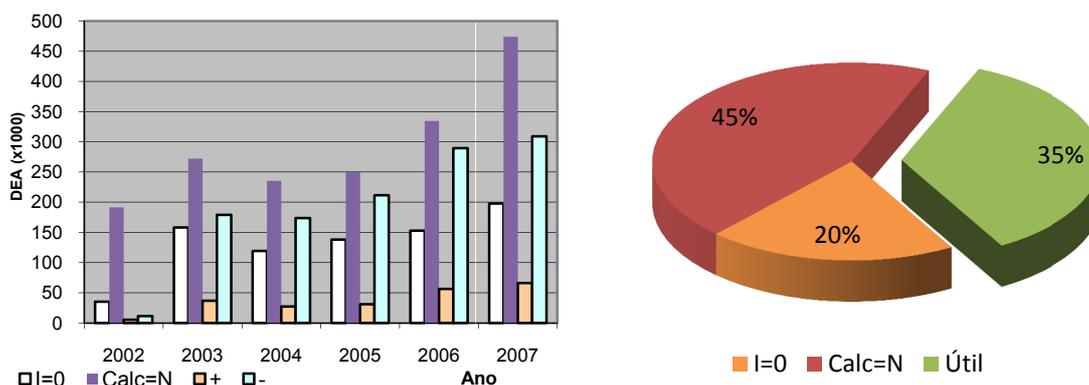


Fig. 3.11 – Agrupamento dos registos segundo critérios de validação

Conforme se pode observar na Fig. 3.11, os registos de 2002 são muito pouco representativos face aos restantes anos. Isso deve-se porventura ao facto de 2002 ser o ano de arranque do LLS e este se encontrar em fase de ensaios e afinações.

Por estas razões os registos de 2002 serão tratados com alguma reserva no âmbito desta tese.

Assim, o território continental Português foi enquadrado num rectângulo limitado em longitude por $-9.6^{\circ} \leq \text{long.} \leq -6.1^{\circ}$ e em latitude em $36.9^{\circ} \leq \text{lat.} \leq 42.2^{\circ}$. Mais dois rectângulos com a mesma área foram estabelecidos. Um sobre o território Espanhol, contíguo ao rectângulo que enquadra Portugal e limitado em longitude por $-6.1^{\circ} \leq \text{long.} \leq -2.6^{\circ}$, outro sobre o oceano Atlântico e limitado em longitude por $-13.1^{\circ} \leq \text{long.} \leq -9.6^{\circ}$. O facto de Portugal continental se encontrar na fronteira entre o continente Europeu e o oceano Atlântico não foi alheio à decisão de se considerarem também estas duas regiões. Apesar da precisão e da eficiência do LLS ser menor que o observado nas áreas B e C, entendeu-se que ainda assim seria interessante apresentar estes resultados de modo a permitir antever a tendência existente. A situação geográfica de Portugal continental é comparável à do Japão [58].

A Fig. 3.12 apresenta as áreas de trabalho consideradas. Na Fig. 3.12 a linha de fronteira de Portugal continental corresponde ao limite oficial do Instituto Geográfico Português [59], o qual gentilmente cedeu esta informação para este efeito. No entanto, a informação sobre a fronteira de Espanha teve como fonte [60] e é pouco mais que um esboço.

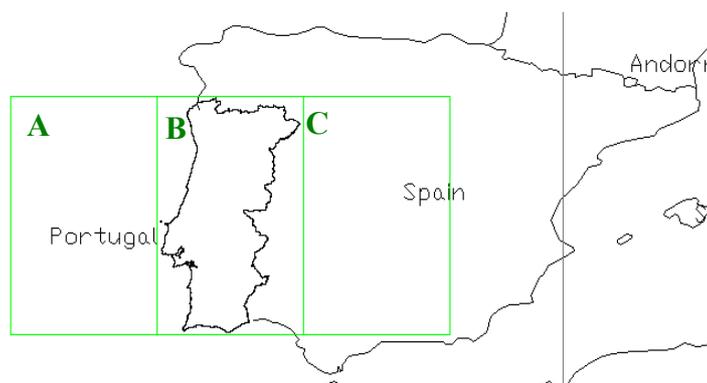


Fig. 3.12 – Áreas de trabalho consideradas

Os dados recolhidos pelo LLS são, após processamento e validação, armazenados em ficheiros ASCII. Foi neste formato que o IM disponibilizou os dados para a presente tese.

Os ficheiros ASCII com os dados em bruto são constituídos por linhas de dados cada uma correspondendo a uma ocorrência de DEA. A Fig. 3.13 apresenta um excerto de um desses ficheiros. Todos os ficheiros, à razão de um por mês, foram convertidos de modo a tratar os dados na base de dados Access.

```

2007·01·01·00·02·19·290·38.9569·-27.8869·0·01·01·N·
.0·99.0·1.4·087·003·02·00¶
2007·01·01·00·04·17·299·39.0568·-15.5166·35.9·01·01·N·
.0·99.0·1.4·097·006·02·00¶
2007·01·01·00·08·45·864·45.5753·-14.8586·0·01·01·N·
.0·99.0·.8·139·006·04·00¶
2007·01·01·00·09·41·608·44.1680·-13.7561·0·01·01·N·
.8·99.0·.6·138·003·03·00¶
2007·01·01·00·11·40·859·46.0535·-6.7757·-32.6·01·01·N·
.0·59.0·.7·010·002·04·00¶
2007·01·01·00·13·11·452·42.9261·-6.3212·-31.3·01·01·N·
.0·99.0·.7·022·005·03·00¶
2007·01·01·00·14·06·204·36.1077·-27.0203·0·01·01·N·
.0·15.0·.9·070·002·05·00¶
2007·01·01·00·14·45·380·40.1784·-16.3428·0·01·01·N·
.1·99.0·1.0·100·005·03·00¶
2007·01·01·00·16·18·519·41.1626·-28.3341·0·01·01·N·
.0·99.0·1.6·095·003·03·00¶
2007·01·01·00·16·26·492·45.5916·-7.2798·-23.6·01·01·N·

```

Fig. 3.13 – Aspecto de um ficheiro de dados ASCII do IM

Para a obtenção dos resultados os quase quatro milhões de registos foram filtrados, com as ferramentas próprias do Access, por exemplo segundo: localização geográfica, polaridade e intensidade da corrente.

3.5 Resultados e Discussão

Os resultados aqui apresentados e publicados em [61] e [62] baseiam-se nos registos das DEA nuvem-solo recolhidos pelo LLS operado pelo IM entre Julho de 2002 e Dezembro de 2007. A Tabela 3.2 apresenta o valor absoluto e relativo de DEA por ano e polaridade, detectadas no interior das regiões A, B e C, durante o período de tempo em análise. A incidência média de DEA positivas e negativas na região B é 3,8 vezes maior que na região A e mais 17 % que na região C.

Considerando a polaridade, a incidência média de DEA positivas na região B é 265 % maior que na região A e 244 % maior que na região C. As DEA positivas representam, em média, 34 % da totalidade de DEA nuvem-solo sobre a região A, 24 % sobre a região B e 11 % sobre a região C.

Tabela 3.2

Valor absoluto e relativo de DEA por ano e por polaridade

Ano	A			B			C		
	+	-	Total	+	-	Total	+	-	Total
2002	1415	962	2377	3195	7154	10349	231	1042	1273
	59,53%	40,47%		30,87%	69,13%		18,15%	81,85%	
2003	4900	10437	15337	10053	36000	46053	4880	36085	40965
	31,95%	68,05%		21,83%	78,17%		11,91%	88,09%	
2004	3579	4833	8412	7114	37704	44818	3778	36529	40307
	42,55%	57,45%		15,87%	84,13%		9,37%	90,63%	
2005	3813	8211	12024	6400	24496	30896	3727	36179	39906
	31,71%	68,29%		20,71%	79,29%		9,34%	90,66%	
2006	8652	16551	25203	20677	62950	83627	8558	62378	70936
	34,33%	65,67%		24,73%	75,27%		12,06%	87,94%	
2007	7050	15956	23006	30490	84445	114935	10692	78926	89618
	30,64%	69,36%		26,53%	73,47%		11,93%	88,07%	
Total	29409	56950	86359	77929	252749	330678	31866	251139	283005
	34,05%	65,95%		23,57%	76,43%		11,26%	88,74%	

A IEC, na sua norma IEC 62305-1 indica que, na ausência de melhor informação local, o rácio a considerar de DEA positivas versus negativas seja de 1/10. Contudo, os resultados anteriores mostram que a região B, na qual se insere completamente o território continental Português, apresenta uma incidência de DEA positivas 2,4 vezes superior ao rácio normalmente observado no interior dos continentes.

A condição de fronteira geográfica que Portugal ocupa entre o continente Europeu e o oceano Atlântico poderá ser uma das causas prováveis para esta situação. Outra causa poderá ser a classificação errada de pequenas DEA positivas nuvem-nuvem como DEA positivas nuvem-solo [63]. Uma análise efectuada ao LLS austríaco [64] revelou um aumento no número de DEA positivas nuvem-solo após um melhoramento efectuada ao sistema que incluiu novos detectores e novo software, ficando idêntico ao utilizado pelo IM.

A Tabela 3.3 apresenta os valores da densidade de DEA nuvem-solo, parâmetro N_g , segundo a nomenclatura utilizada pela IEC ou GFD (*Ground Flash Density*), segundo o IEEE. A mesma tabela apresenta ainda o número de dias de trovoada, parâmetro T_d (*Thunderstorm Days*).

Tabela 3.3

Valores de GFD e T_d

Ano	A		B		C	
	GFD	Td	GFD	Td	GFD	Td
2002	0,01	0,4	0,06	1,4	0,01	0,3
2003	0,09	1,9	0,26	4,5	0,23	4,1
2004	0,05	1,1	0,25	4,4	0,23	4,0
2005	0,07	1,5	0,17	3,3	0,23	4,0
2006	0,14	2,8	0,47	7,2	0,40	6,3
2007	0,13	2,6	0,65	9,3	0,51	7,6

Mesmo não considerando os registos de 2002, pelas razões anteriormente expostas, é possível observar uma grande variação da GFD, na região B, ao longo dos anos entre 2003 e 2007. O rácio max./min. para a GFD é de 3,0 na região A, é de 3,7 na região B e 2,2 na região C. Estes valores demonstram uma maior variabilidade na região de Portugal continental quando comparada com as outras duas regiões. A grande variação observada nos anos 2005, 2006 e 2007 pode dever-se a um mal-funcionamento do LLS, o que deverá ser apurado pelo IM ou, ser resultado de alteração climática, o que também carece de confirmação.

A Fig. 3.14 apresenta as DEA nuvem-solo nas três regiões, em valor absoluto e em valor relativo, em função da latitude durante o ano de 2007. As figuras correspondentes aos registos para os anos 2003 a 2006 foram remetidas para o Apêndice A desta tese de modo a não sobrecarregar o documento. Nestas figuras podemos observar a tendência de diminuição das DEA nuvem-solo positivas com o aumento da latitude, o que está de acordo com a conhecida maior ocorrência destas DEA junto ao equador e quase ausência nos pólos.

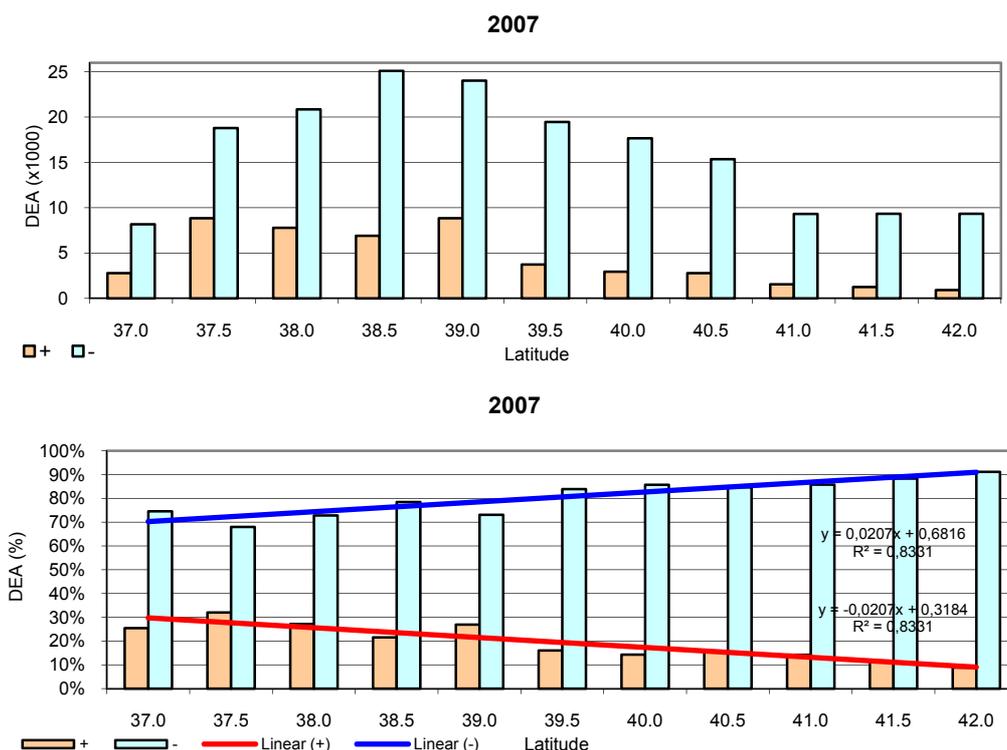


Fig. 3.14 – DEA em função da latitude em 2007

As Figs. 3.15 apresentam as DEA nuvem-solo nas três regiões, em valor absoluto e em valor relativo, em função da longitude durante o ano de 2007. As figuras correspondentes aos registos para os anos 2003 a 2006 foram remetidas para o Apêndice A desta tese de modo a não sobrecarregar o documento. Nestas figuras podemos observar a tendência de diminuição das DEA nuvem-solo positivas com a diminuição da longitude, isto é, mais DEA nuvem-solo positivas no oceano e menos no interior do continente Europeu.

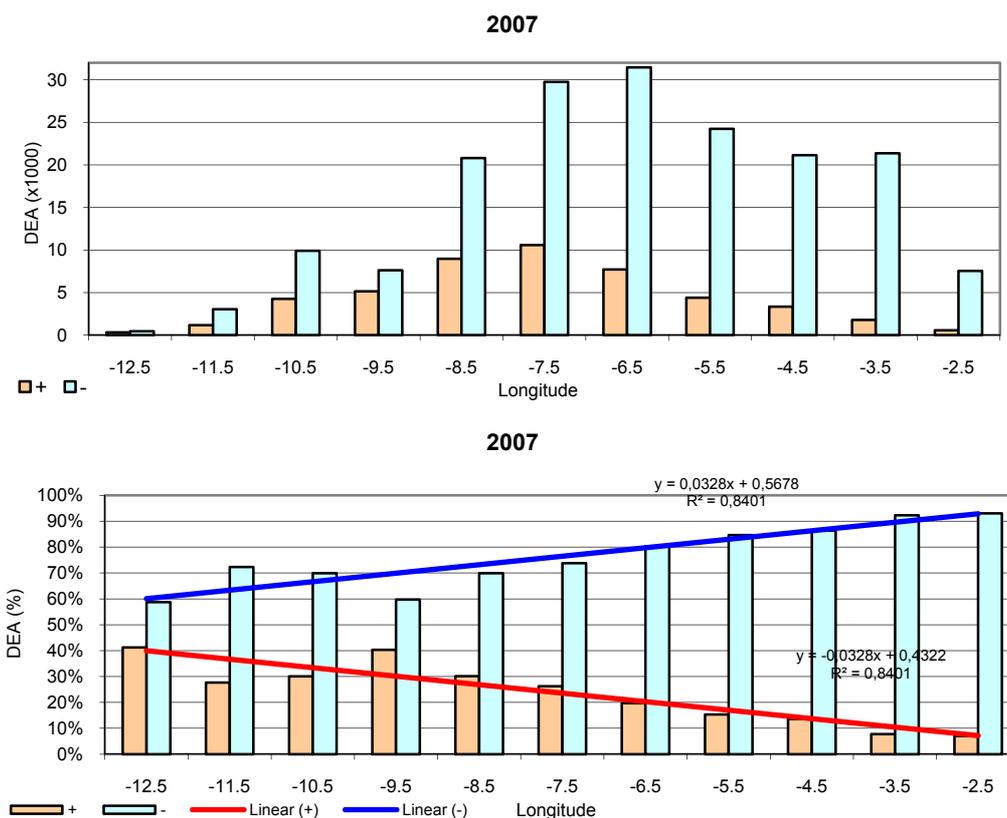


Fig. 3.15 – DEA em função da longitude em 2007

As Figs. 3.16 apresentam as DEA nuvem-solo na região B – Portugal continental, em valor absoluto e em valor relativo, em função do mês durante o ano de 2007. As figuras correspondentes aos registos para os anos 2003 a 2006 foram remetidas para o Apêndice A desta tese de modo a não sobrecarregar o documento. Podemos observar uma maior tendência de ocorrência de DEA nuvem-solo positivas durante os meses de inverno (Outubro a Março). Sobre o território de Portugal continental, a percentagem de DEA positivas pode atingir 50 % das DEA registadas sendo a média 28 % e a mediana 26 %. Também aqui o número de DEA nuvem-solo sofre grandes variações ao longo dos meses e dos anos. Não foi possível encontrar um padrão com os registos disponíveis que permita prever qual o mês ou meses com maior incidência de DEA nos anos futuros.

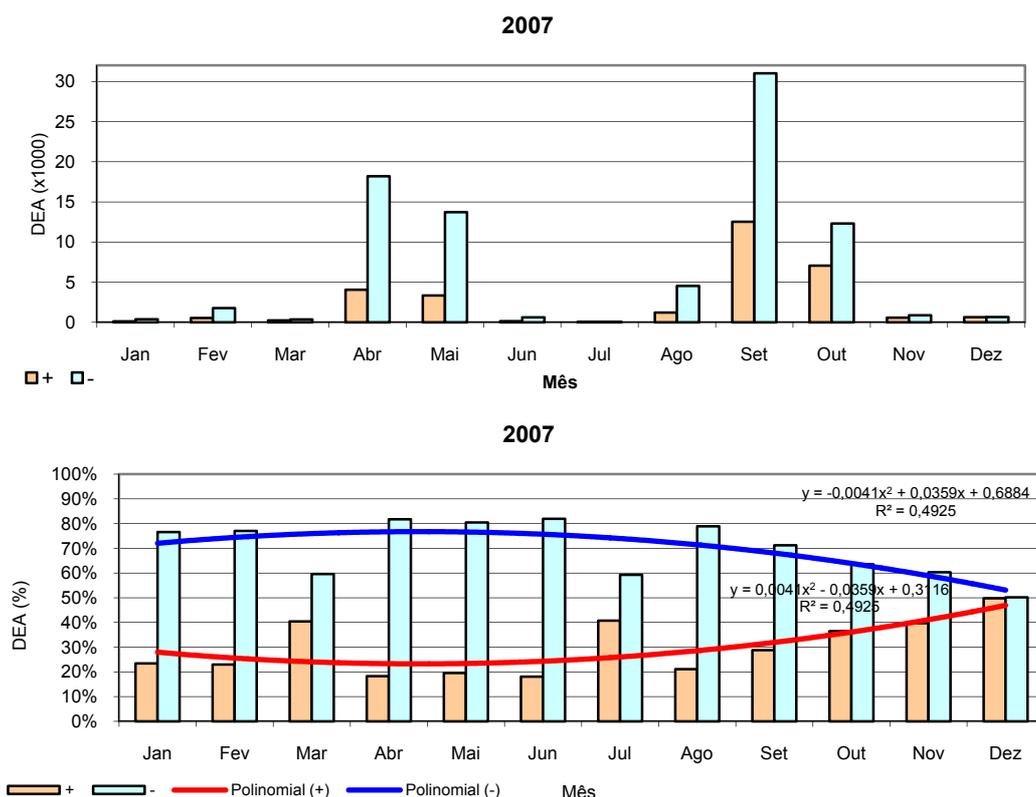


Fig. 3.16 – DEA em função do mês na região B em 2007

As figuras correspondentes aos registos para os anos 2003 a 2007 na região C – Espanha e na região A – Oceano Atlântico, foram remetidas para o Apêndice A desta tese de modo a não sobrecarregar o documento. Sobre o Oceano Atlântico a percentagem de DEA positivas pode ultrapassar 80 % das DEA registadas, sendo a média de 46 % e a mediana de 40 %. O número de DEA nuvem-solo sofre grandes variações ao longo dos meses e dos anos. Não foi possível encontrar um padrão com os registos disponíveis, pelo que, não será possível prever qual o mês ou meses que terão uma maior incidência de DEA nuvem-solo senão com um grau de precisão grosseiro. Sobre o território de Espanha a percentagem de DEA positivas pode atingir 67 % das DEA registadas, sendo a média 17 % e a mediana 14 %. Também aqui o número de DEA nuvem-solo sofre grandes variações ao longo dos meses e dos anos. Não foi possível encontrar um padrão com os registos disponíveis que permita prever qual o mês ou meses com maior incidência de DEA nos anos futuros.

A distribuição da probabilidade acumulada da intensidade do pico de corrente sobre a região B (Portugal) foi calculada e comparada com a indicada pela norma IEC [65], conforme se apresenta na Fig. 3.17.

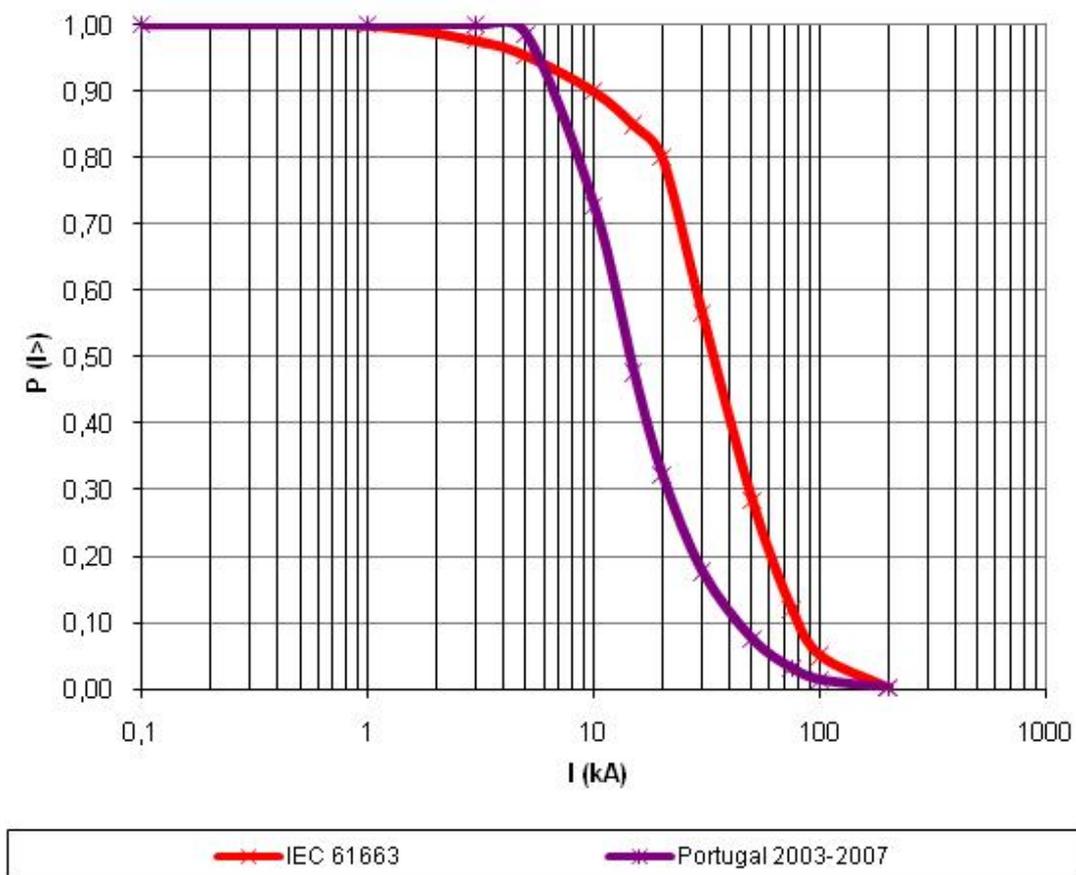


Fig. 3.17 – Probabilidade acumulada do pico de corrente sobre a região B

Toda a informação utilizada para a construção da distribuição referente a Portugal, na Fig. 3.17, diz respeito ao primeiro arco-de-retorno.

Os valores obtidos para a intensidade do pico de corrente não foram corrigidos de possíveis erros causados por avarias que afectem a eficiência de detecção do LLS, ou por erros derivados dos modelos de propagação embebidos no algoritmo do LLS [64].

A distribuição de cinco anos da probabilidade acumulada do pico de corrente para Portugal não coincide com a indicada pela IEC.

De acordo com a IEC, apenas 20 % das DEA nuvem-solo, para o primeiro arco-de-retorno, possuem um valor menor que 20 kA. Na situação Portuguesa, 20 % das DEA nuvem-solo, para o primeiro arco-de-retorno, possuem um valor menor que 8 a 10 kA.

A comparação efectuada na Fig. 3.17 deve ser entendida com alguma reserva. Note-se que o sistema LLS calcula o valor do pico de corrente com algumas incertezas associadas:

- O LLS calcula o valor do pico de corrente a partir da medição de campos magnéticos e utiliza uma expressão empírica que relaciona o campo magnético com a corrente eléctrica. Dois arcos-de-retorno com o mesmo valor de pico de corrente mas diferentes velocidades de retorno deviam ter o mesmo valor de corrente calculado pelo LLS, mas sabe-se que não é assim [66];
- A probabilidade acumulada do pico de corrente depende do menor valor que o LLS é capaz de detectar;
- Os efeitos do solo na propagação do campo e os erros de calibração do equipamento podem ter também grande influência;
- A distribuição IEC é baseada em medidas efectuadas em torres altas instrumentadas. É conhecido que nestas condições se verifica o chamado “efeito torre”, o qual tende a aumentar o valor medido da corrente de pico [67] e [68]. Um excelente trabalho pode ser encontrado em [69] para melhor se entender e validar os registos do LLS.

De modo a obter um mapa GFD de Portugal o território foi dividido em quadrados com 10 km de lado. O parâmetro GFD obtém-se contando as DEA registadas pelo LLS no interior de cada quadrado e dividindo pela área e pelo número de anos em análise.

A Fig. 3.18 apresenta o mapa GFD global de Portugal. O mapa GFD caracteriza a actividade cerâmica global do país ou de uma região.

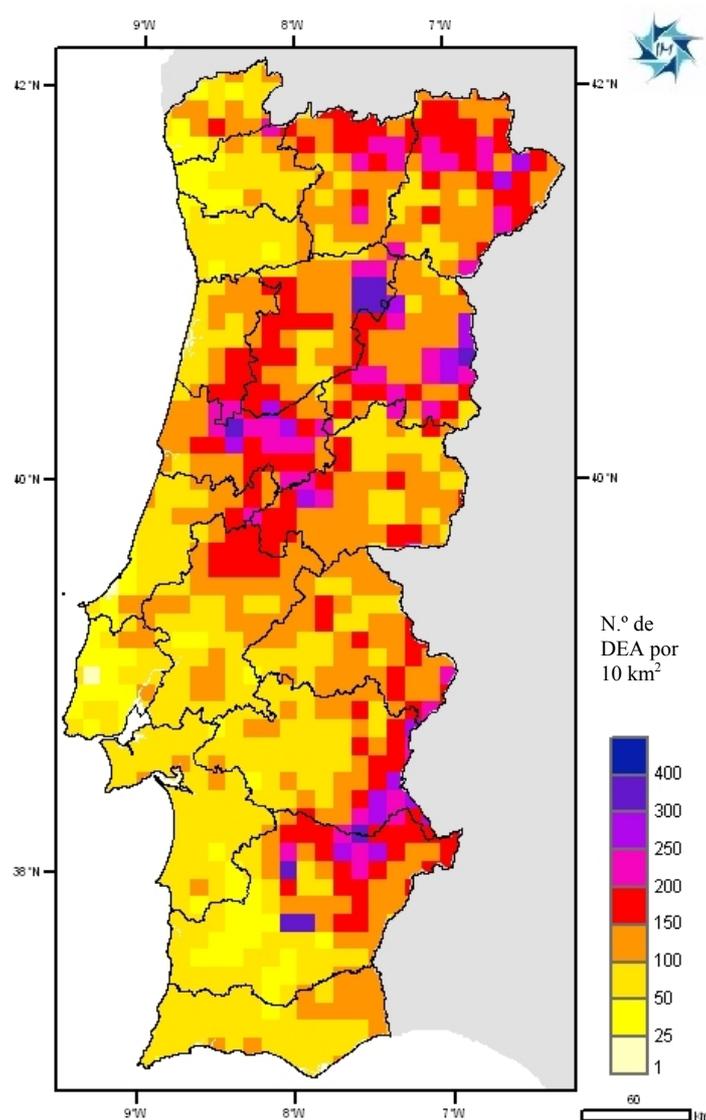


Fig. 3.18 – Mapa GFD global de Portugal de 2003 a 2006 (Fonte: IM)

Para a rede de distribuição eléctrica esta informação é crítica, uma vez que permite perceber o quanto uma instalação se encontra exposta aos efeitos destrutivos das DEA, e o risco de danos a que uma linha ou equipamento está sujeito. Assim, o mapa GFD desempenha um papel fundamental no cálculo do risco de danos para uma possível localização de uma qualquer estrutura.

Em complemento do mapa GFD global, as Figs. 3.19 e 3.20 apresentam os mapas GFD para DEA positivas e negativas, respectivamente.

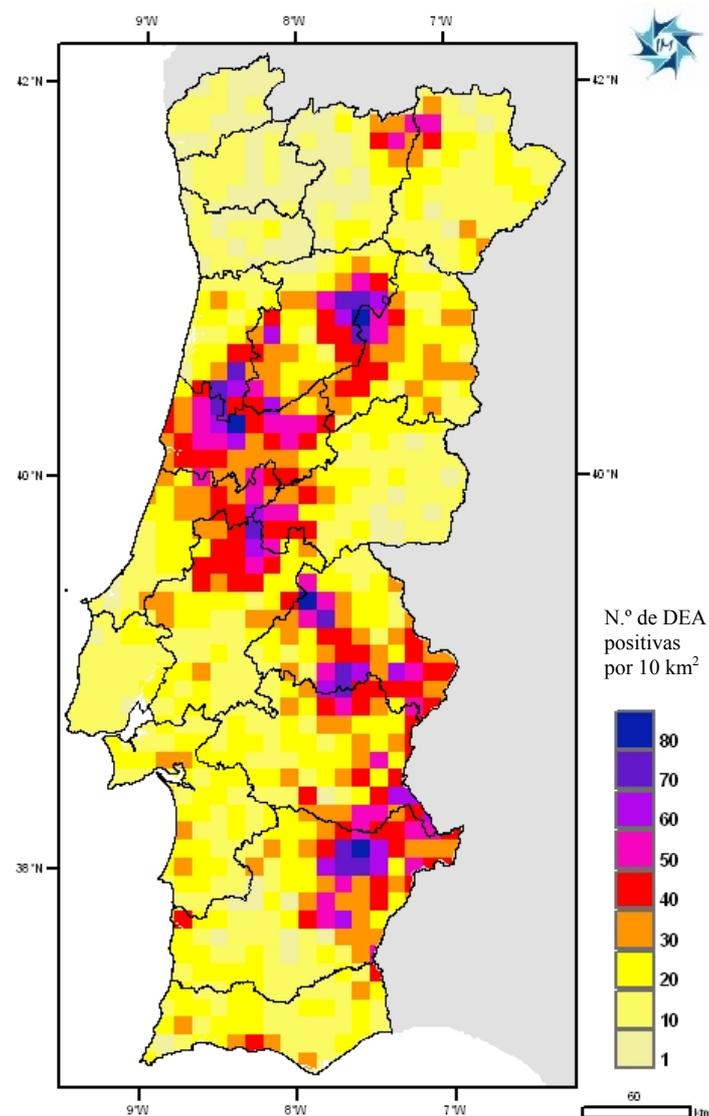


Fig. 3.19 – Mapas GFD de Portugal com DEA positivas de 2003 a 2006 (Fonte: IM)

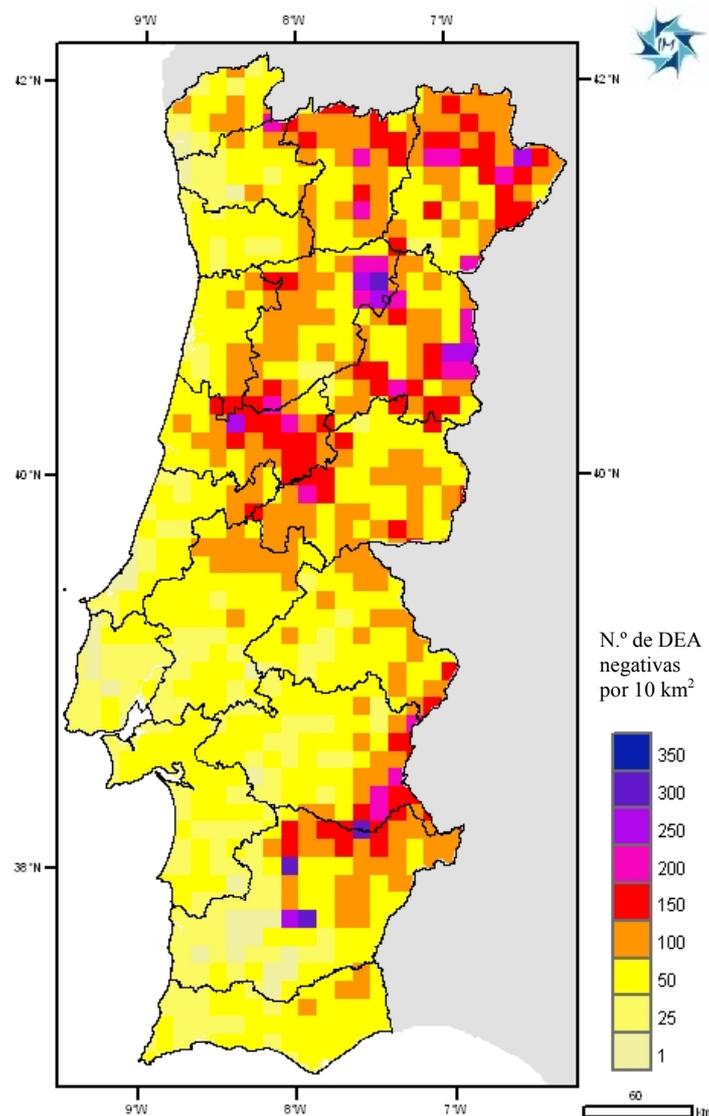


Fig. 3.20 – Mapas GFD de Portugal com DEA negativas de 2003 a 2006 (Fonte: IM)

Da Tabela 3.3 o valor médio para GFD entre 2003 e 2007 na região B é $0,17 \leq \text{GFD} \leq 0,65$. Estes valores permitem classificar Portugal como um país de baixo risco de danos causados por DEA. No entanto, em algumas regiões montanhosas o valor de GFD pode ser superior a 1 DEA/(km²ano).

De modo a ilustrar as grandes diferenças entre um mapa T_d e um mapa GFD, apresenta-se de seguida uma comparação entre o mapa da Fig. 3.6 e o da Fig. 3.18.

Segundo o mapa T_d o distrito de Viana do Castelo é uma das regiões mais atingidas por DEA. No entanto, o mapa GFD da Fig. 3.18 mostra esta região como uma das que apresenta menor incidência de DEA. Da Fig. 3.6 percebe-se que o distrito de Viana do Castelo é caracterizado por $18 < T_d < 21$ o que corresponde a $1,5 < GFD < 1,8$. Para a mesma região com 2200 km^2 contamos 1869 DEA durante quatro anos, o que permite calcular GFD em $0,2 \text{ DEA}/(\text{km}^2\text{ano})$. Este valor é nove vezes menor que o sugerido pelo mapa T_d .

Procurou-se ainda relacionar a actividade cerâmica com a orografia do país. A Fig. 3.21 apresenta o mapa orográfico de Portugal.

Pode observar-se que o mapa GFD global de Portugal, apresentado na Fig. 3.18, se compara bastante bem com o mapa orográfico da Fig. 3.21. Tal como esperado, as regiões de maior actividade cerâmica correspondem às regiões mais altas e montanhosas do país.

Ainda, procurou-se comparar estes resultados com os de um país idêntico do ponto de vista das condições geográficas onde se insere. O Japão encontra-se também no hemisfério norte do planeta entre latitudes semelhantes às de Portugal. Este é também um país que faz fronteira entre o continente e o oceano. Podemos pois dizer que o GFD é menor em Portugal do que no Japão, onde varia entre 0,5 e 5,0 [58]. A corrente de pico encontrada para Portugal é também menor que no Japão, onde os valores se situam entre 20 a 35 kA, enquanto que em Portugal se fica pelos 15 kA para uma probabilidade acumulada de 50 %. No entanto, a percentagem de DEA positivas no Verão em ambos os países é de 20 a 21 %, e no Inverno é de 33 a 35 %.

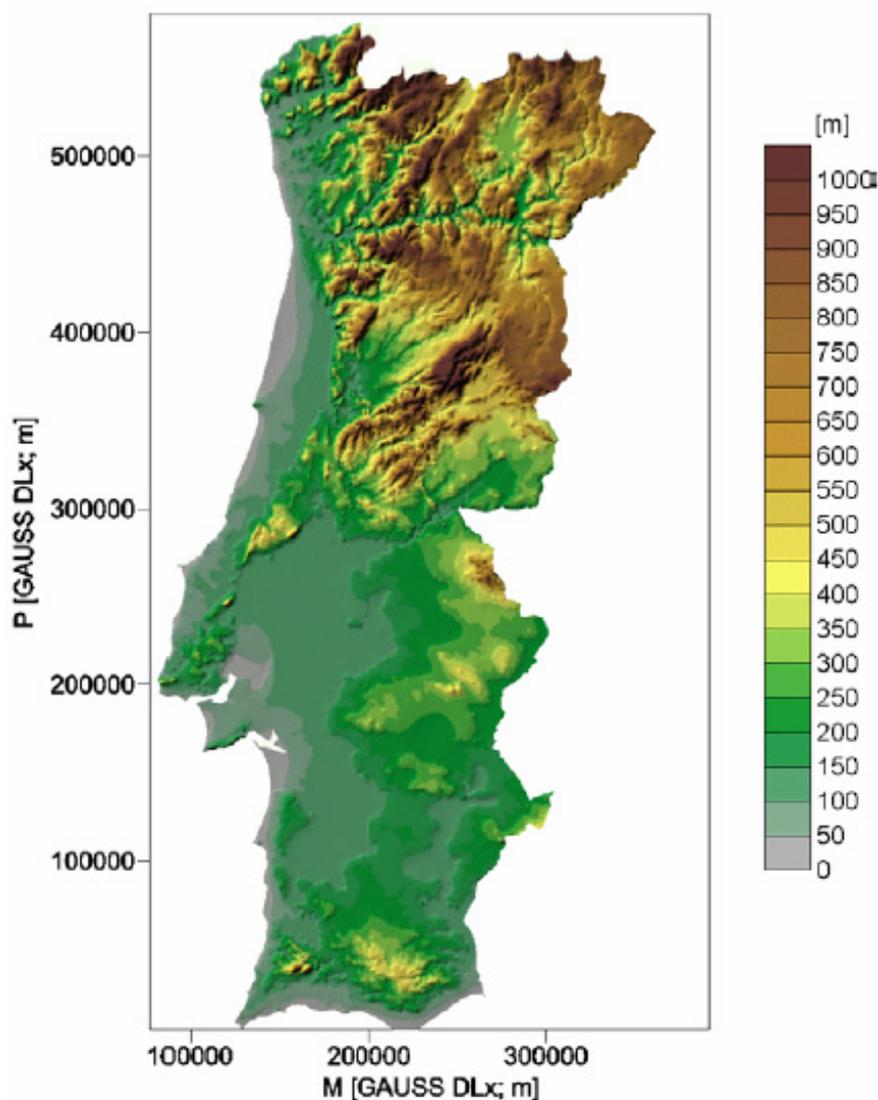


Fig. 3.21 – Mapa orográfico de Portugal (Fonte: IGP)

3.6 Conclusões

Foi apresentada uma revisão histórica e técnica sobre os diversos sistemas LLS, com especial enfoque para o sistema utilizado em Portugal. Conclui-se que o sistema português constituído por 4+5 detectores IMPACT 141T-ESP, 1 sistema LP2000 e software CATS, operado pelo IM, é um sistema moderno e preciso para o fim a que se destina.

Ficou clara a importância destes sistemas na actividade económica e social do país. A monitorização da actividade cerâmica complementa as informações dos radares meteorológicos permitindo melhores previsões do estado do clima e assim mitigar prejuízos em áreas tão diversas como a aviação, navegação, construções civil, e desportos de ar livre.

Uma caracterização precisa da actividade cerâmica permite aos projectistas melhor adequar as medidas de protecção de pessoas e bens a instalar nos edifícios e outras estruturas.

Neste capítulo apresentou-se um dos primeiros estudos, realizados em Portugal, com resultados publicados em revistas da especialidade, sobre a caracterização da sua actividade cerâmica, baseado em registos obtidos pelo primeiro LLS instalado em território continental. Os dados experimentais recolhidos pelo LLS Português foram gentilmente cedidos para o propósito desta tese pelo IM.

Os resultados correspondem aos primeiros cinco anos de actividade do LLS, desde Julho de 2002 a Dezembro de 2007, com quase quatro milhões de registos e incluem, entre outros, distribuição geográfica, sazonal e de polaridade, e probabilidade acumulada da corrente de pico das DEA nuvem-solo.

As contribuições deste estudo são:

- Verificou-se que Portugal apresenta uma percentagem média de DEA positivas que é superior em mais de duas vezes à considerada pela normalização internacional, nomeadamente pela IEC. Assim temos que a IEC assume uma percentagem de 10 % para as DEA positivas e em Portugal verificamos uma percentagem de 24 %, com 15,9 % de valor mínimo e 26,5 % de valor máximo;

- Verificou-se que, em Portugal, nos meses de Inverno (Outubro a Março) a percentagem mensal de DEA positivas pode atingir 50 % das DEA registadas, sendo a média 28 % e a mediana 26 %. Esta informação é importante para os projectistas na hora de escolherem os DPST, uma vez que as DEA positivas estão na origem de correntes de descarga com mais elevado valor de pico;
- Verificou-se a tendência de diminuição das DEA positivas com o aumento da latitude, o que está de acordo com a conhecida maior ocorrência destas DEA junto ao equador e quase ausência nos pólos;
- Verificou-se que o número de DEA nuvem-solo sofre grandes variações ao longo dos meses e dos anos. Não foi possível encontrar um padrão com os registos disponíveis que permita prever qual o mês ou meses com maior incidência de DEA nos anos futuros. No entanto, foi possível observar que o território português é o mais atingido por DEA, com 330678 DEA, quando comparado com áreas idênticas dos vizinhos Oceano Atlântico, com 86359, e Espanha, com 283005. A explicação para este facto talvez se encontre na condição geográfica e orográfica de Portugal enquanto região fronteira entre o continente Europeu e o Oceano Atlântico;
- Foi possível construir mapas de densidade de DEA, baseados nos registos do LLS e compará-los com o mapa dos dias de trovoadas do IM, baseado nos relatórios de observadores humanos ao serviço de IM. Verifica-se que os dois tipos de mapa não se comparam bem. Pelo facto do mapa baseado nos dias de trovoadas ser um resultado médio de 30 anos (1960 a 1990), não reflecte a grande variabilidade sazonal e anual da distribuição das DEA. Pelo contrário, o mapa GFD compara-se bem com o mapa orográfico de Portugal, comprovando assim uma relação de que regiões montanhosas possuem uma densidade maior de DEA relativamente a outras mais baixas;

- Ainda, verificou-se que a corrente de pico do primeiro arco-de-retorno em Portugal é menor do que a considerada pela IEC. Assim, enquanto que a IEC considera que 20 % das DEA possuem uma corrente de pico inferior a 20 kA, em Portugal encontramos para a mesma percentagem uma corrente de pico inferior a 8 a 10 kA.

CAPÍTULO

4

Protecção dos Parques Eólicos contra Efeitos Indirectos das DEA

Neste capítulo é apresentado o estudo realizado à protecção dos parques eólicos contra os efeitos indirectos das DEA. São obtidas as equações da linha de transmissão. As principais características do programa de computador EMTP-RV são realçadas. O programa EMTP-RV é utilizado no estudo da propagação das sobretensões causadas por DEA indirectas em dois casos de estudo. No primeiro caso de estudo considera-se apenas um aerogerador dotado do seu equipamento habitual e, no segundo são considerados dois aerogeradores interligados.

4.1 Introdução

A caracterização rigorosa das sobretensões que podem ocorrer num sistema de energia eléctrica é indispensável para o correcto dimensionamento do isolamento, da coordenação dos níveis de isolamento e da coordenação dos níveis de protecção nomeadamente contra sobretensões.

As consequências das sobretensões deverão ser avaliadas, não apenas nos pontos onde têm origem, mas também em pontos distantes. O modo como as sobretensões progridem pelos condutores eléctricos, bem como a deformação que sofrem durante essa mesma progressão, constitui um problema fulcral da coordenação de isolamentos num sistema de energia eléctrica. Em particular, quando uma DEA atinge um aerogerador a onda de sobretensão originada pode propagar-se pela linha eléctrica de interligação do parque eólico à rede do Distribuidor.

Uma perturbação com origem num ponto no interior de um dado meio, e propagando-se a velocidade finita através desse mesmo meio, é designada por onda. Por exemplo, uma onda de som produz uma alteração na densidade de um gás, líquido ou sólido, que se propaga pelo meio. Uma onda que se propague num corpo sólido elástico é designada por onda elástica. As ondas de superfície aparecem perto da superfície de um meio como a água ou a terra. Quando perturbações electromagnéticas se propagam num gás, líquido, sólido ou no vácuo, elas são designadas por ondas electromagnéticas. A luz é um tipo de onda electromagnética, bem como certo tipo de perturbações em linhas de transmissão.

Uma linha de transmissão consiste em dois ou mais condutores paralelos, usados para ligar uma fonte de energia com uma carga, ou para ligar um circuito ao outro. No estudo seguinte usa-se "linha de transmissão" para designar um par de condutores, em configuração coaxial, e operando em modo electromagnético transversal.

Em contraste com a teoria clássica de análise de circuitos onde a resistência, capacidade, condutância e indutância são considerados parâmetros concentrados, na linha de transmissão longa R, C, G e L são parâmetros distribuídos, sendo expressos na respectiva unidade por unidade de comprimento.

4.2 Modelação Matemática

Inicialmente, irão ser deduzidas as equações da linha de transmissão no domínio do tempo para o caso especial da linha de transmissão ser considerada sem perdas (R=G=0), ou considerando a propagação da onda plana no espaço livre.

Considere-se um meio envolvendo a linha de transmissão tal que:

$$\begin{cases} J_c = 0 \\ \nabla \cdot D = 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

Nestas circunstâncias tem-se que:

$$\nabla \times H = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (4.2)$$

$$\nabla \cdot D = \nabla \cdot E = 0 \quad (4.3)$$

Sendo:

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\mu \left(\nabla \times \frac{\partial H}{\partial t} \right) \quad (4.4)$$

e derivando em ordem ao tempo ambos os membros de (4.2) tem-se:

$$\nabla \times \frac{\partial H}{\partial t} = \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (4.5)$$

pelo que, substituindo (4.5) em (4.4) obtemos:

$$\nabla \times (\nabla \times E) = -\mu \left(\varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \right) \quad (4.6)$$

Decompondo os operadores do lado esquerdo da expressão anterior obtêm-se a expressão dada por:

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nabla \times E) &= \nabla \cdot (\nabla \cdot E) - \nabla^2 E = -\mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \\ \Leftrightarrow \nabla^2 E &= \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad \text{em } \text{V/m}^3 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Considere-se agora o caso do campo magnético H. Aplicando o operador rotacional a ambos os membros da equação (4.2) tem-se:

$$\nabla \times (\nabla \times H) = \varepsilon \left(\nabla \times \frac{\partial E}{\partial t} \right) \quad (4.8)$$

Neste caso obtêm-se a expressão dada por:

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nabla \times H) &= \nabla \cdot (\nabla \cdot H) - \nabla^2 H = -\mu \varepsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \\ \Leftrightarrow \nabla^2 H &= \mu \varepsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad \text{em } \text{A/m}^3 \end{aligned} \quad (4.9)$$

As equações (4.7) e (4.9), quando expressas em termos de coordenadas cartesianas, formam um conjunto de equações de onda das quais (4.10) é uma delas.

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} \quad (4.10)$$

Sabendo que a velocidade da luz pode ser obtida por (4.11)

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (4.11)$$

A velocidade de propagação de uma onda móvel numa linha de transmissão é dada por (4.12).

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.12)$$

Rescrevem-se as equações (4.7) e (4.9) na forma apresentada em (4.13) e (4.14), tendo em consideração (4.12) e o modo de propagação EMT segundo a direcção x:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \left(\frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \right) \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \left(\frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2} \right) \quad (4.14)$$

Em linhas de transmissão pode-se trabalhar com tensões e correntes, o que se torna mais fácil em vez de campos eléctricos e magnéticos; inferem-se as equações (4.15) e (4.16) a partir de (4.13) e (4.14).

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} = LC \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (4.16)$$

As equações (4.15) e (4.16) são as equações diferenciais, no domínio do tempo, da linha de transmissão, uniforme e homogénea, considerada sem perdas.

No caso de considerarmos a linha de transmissão com perdas ($R \neq 0$ e $G \neq 0$) então o circuito equivalente da Fig. 4.1 deve ser tomado em consideração.

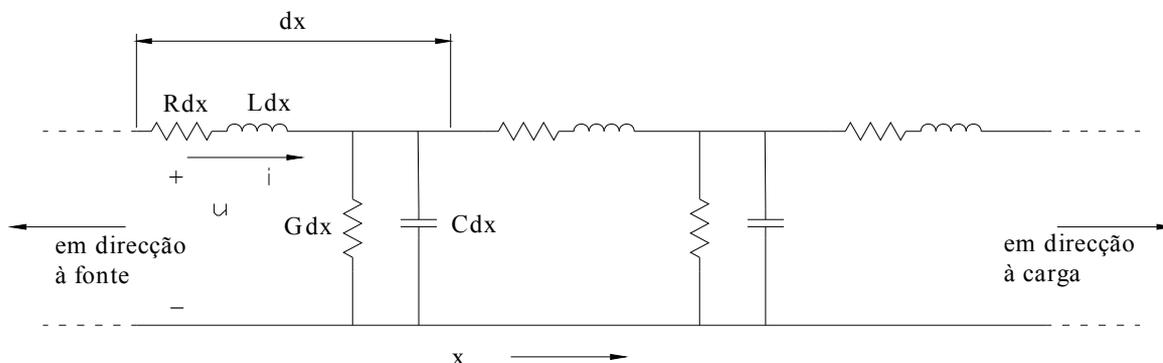


Fig. 4.1 – Circuito equivalente de uma linha de transmissão considerada com parâmetros distribuídos.

Considerando apenas a secção dx da Fig. 4.1 e usando derivadas parciais para distinguir as derivadas em ordem ao tempo e em ordem à distância, a tensão em dx é dada por (4.17):

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -R i - L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (4.17)$$

De modo análogo e por análise nodal, a corrente em dx é dada por (4.18):

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -G u - C \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4.18)$$

Derivando a equação (4.17) em ordem a x e a equação (4.18) em ordem a t , e fazendo as substituições apropriadas obtêm-se (4.19):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = RG u + (RC + LG) \frac{\partial u}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (4.19)$$

Note-se que no caso de considerarmos $R=G=0$ (linha de transmissão sem perdas) a equação (4.19) torna-se igual à equação (4.15), deduzida por via diversa.

Procedendo de modo análogo podemos deduzir (4.20):

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = RG i + (RC + LG) \frac{\partial i}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (4.20)$$

As equações (4.19) e (4.20) são as equações diferenciais no domínio do tempo da linha de transmissão, uniforme e homogénea, considerada com perdas. Os parâmetros C e L da linha de transmissão podem ser calculados considerando os condutores cilíndricos e concêntricos, com as superfícies A_1 e A_2 tal que $A_1 < A_2$.

Admite-se que a região entre os dois condutores está preenchida com um material de constante dieléctrica ϵ_r . Nestas condições a linha de transmissão possui a configuração de um cabo coaxial e o cálculo do potencial nessa região utiliza a solução da equação de Laplace (4.21):

$$\begin{aligned} V(r) &= \alpha \ln(A) + \beta \\ \Leftrightarrow V_{12} &= \alpha \ln(A_1) - \alpha \ln(A_2) = \alpha \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) \end{aligned} \quad (4.21)$$

A carga total do condutor no interior é:

$$\begin{aligned} Q_{12} &= -\epsilon_r \epsilon_0 \oint [\nabla V(r)] \, dS \\ \Leftrightarrow Q_{12} &= 2\pi \alpha \epsilon_r \epsilon_0 \end{aligned}$$

Logo, a capacidade do condutor por unidade de comprimento será:

$$C = \frac{Q_{12}}{V_{12}} = \frac{-2\pi \alpha \epsilon_r \epsilon_0}{\alpha \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)} = \frac{2\pi \epsilon}{\ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right)} \quad (4.22)$$

Também se demonstra que:

$$L_{\text{ext}} = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right) \quad (4.23)$$

Modos de acoplamento

As sobretensões podem ser transmitidas por acoplamento galvânico, que é o mais comum, acoplamento indutivo ou acoplamento capacitivo [27].

Acoplamento indutivo

A ligação da blindagem à terra nos dois extremos de um cabo causa perturbação na tensão que se deseja transmitir. Essa perturbação é devida à influência dos campos magnéticos parasitas nos quais o condutor fica mergulhado. Os campos magnéticos parasitas podem ser originados por correntes eléctricas de elevado valor, como sejam as correntes que circulam em sistemas de cabos de energia eléctrica ou por DEA na vizinhança do cabo. A melhor forma para se solucionar o problema da perturbação em causa é efectuar a ligação da blindagem à terra apenas num dos extremos do cabo, de preferência do lado da fonte de tensão.

No caso de acoplamento indutivo entre a descida do pára-raios e canalização eléctrica, quando uma DEA atinge uma casa, a corrente de descarga percorre as descidas da IPR. Onde quer que haja uma corrente eléctrica a fluir, haverá um campo electromagnético em torno do seu percurso. Se existirem outros condutores de energia eléctrica ou de dados no interior desse campo electromagnético, então surgirão tensões induzidas que podem ser nefastas.

Acoplamento capacitivo

Este tipo de acoplamento pode verificar-se onde existam linhas longas bem isoladas da terra via transformadores ou opto-acopladores. Os campos eléctricos aqui considerados são aqueles que se fazem sentir entre elementos em tensão e a terra. Assim, o espaço por baixo dos barramentos de subestações (SE) MAT-AT/MT, o espaço por baixo das linhas aéreas de MAT, AT e MT, bem como o espaço na vizinhança de cabos de distribuição de energia eléctrica, são espaços susceptíveis de serem influenciados por campos eléctricos.

Para o caso de campos eléctricos originados por nuvens de tempestade, no qual se verificam fenómenos transitórios a elevada frequência, a corrente que circula na blindagem do cabo, não só não pode ser desprezada, como pode atingir valores elevados. Esta corrente ao circular pela blindagem do cabo origina o aparecimento de tensões que irão perturbar o sinal de saída. Uma solução para este problema passa pela utilização de cabos com dupla blindagem. A corrente que circula na blindagem interna praticamente anula-se com a existência da blindagem externa.

Transferência de correntes por acoplamento galvânico

O acoplamento galvânico tanto afecta sistemas com linhas de transmissão aéreas como subterrâneas. De facto, quando uma DEA atinge o solo o potencial deste eleva-se por acção da passagem da corrente injectada. Um eléctrodo de terra na vizinhança ficará sujeito a um potencial que pode atingir alguns kV. O equipamento fica então sujeito a vários kV, resultantes da tensão entre o condutor de protecção e os condutores de fase.

Outra forma de dano por acoplamento galvânico deve-se à condução de uma parte da corrente de DEA entrar pelo eléctrodo de terra, passando por diversos equipamentos, por uma eventual linha de dados interligando equipamentos em edifícios distintos e destes para a terra novamente, através do eléctrodo de terra deste segundo edifício.

A ocorrência de uma DEA que atinja directamente o aerogerador proporciona a circulação de uma elevada intensidade de corrente eléctrica, primeiramente através da estrutura da torre, até à barra de terra ou até ao solo através do eléctrodo de terra. Em qualquer dos casos, uma porção importante da corrente injectada na malha de defeito, pela DEA ou por defeito, fase-terra, na instalação eléctrica, circulará pela malha formada pela blindagem e a terra.

Transferência de tensões por acoplamento galvânico

A ocorrência de uma DEA directamente no aerogerador ou a ocorrência de um defeito na instalação eléctrica, do tipo fase-terra, proporciona o aparecimento de uma tensão indesejável, prejudicial aos equipamentos electrónicos, pois em muitas situações não as suportam sem serem danificados ou destruídos.

4.3 Ferramenta Computacional EMTP-RV

O *Electro-Magnetic Transient Program* (EMTP) é conhecido por ser talvez o mais usado programa de computação no estudo de transitórios em sistemas e redes eléctricas de grande dimensão. A nova versão recebeu a designação de EMTP-RV, onde RV significa *Restructured Version*. O pacote completo é constituído pelo EMTP que é o motor de cálculo, pelo EMTPWorks que é o interface gráfico, e pelo ScopeView que é o visualizador de resultados do EMTP.

O grupo de trabalho responsável pelo desenvolvimento desta nova versão conta com a participação de: *American Electric Power Corporation, CEA Technologies, CRIEPI of Japan, Électricité de France, EPRI, Hydro One Networks, Hydro-Québec, US Bureau of Reclamation and Western Area Power Administration.*

O EMTP-RV utiliza um novo operador jacobiano não-linear que elimina as restrições topológicas do passado e permite resolver grandes sistemas não-lineares com um mínimo de iterações. O EMTP-RV possui uma grande biblioteca de modelos eléctricos e electrónicos e dispositivos usados em redes eléctricas de distribuição, permitindo ainda ao utilizador construir dispositivos próprios.

O EMTP-RV é uma referência nos seguintes domínios:

- Simulação de transitórios;
- Simulação de grandes redes eléctricas;
- Biblioteca de componentes lineares, não-lineares e de controlo;
- Arquitectura aberta que permite aos utilizadores criar novos modelos;
- Cálculo de harmónicas em regime permanente;
- Cálculo de fluxo de carga em redes trifásicas;
- Modelos detalhados de semicondutores;
- Simulação com manobras simultâneas.

As características do EMTP-RV tornam-no apropriado para simulações com o mais elevado rigor nas seguintes áreas:

- Sobretensões transitórias causadas por DEA;
- Sobretensões de manobra;
- Sobretensões temporárias;
- Coordenação de isolamento;
- Electrónica de potência;
- Controlo;
- Qualidade de energia;
- Manobras com bancos de condensadores;
- Ressonância série e paralelo;
- Ferroressonância;
- Arranque de motores;
- Redes desequilibradas;
- Redes de distribuição e geração distribuídas;
- Protecção de sistemas eléctricos.

O EMTP-RV permite obter soluções dos seguintes tipos:

- Fluxo de carga – As equações são resolvidas com fasores complexos. Nesta solução apenas se obtêm resultados à frequência fundamental. A rede usada para simulação de transitórios pode ser também usada para a análise do fluxo de carga. Podem ser usadas redes polifásicas e desequilibradas.
- Regime permanente – As equações são resolvidas com números complexos. Permite uma análise harmónica em regime permanente.
- Domínio do tempo – As equações são resolvidas por integração numérica. Todos os dispositivos não-lineares são resolvidos simultaneamente com as equações da rede. O método de Newton é utilizado quando existem dispositivos não lineares.
- Domínio da frequência – Esta opção funciona separadamente das duas anteriores. É obtida uma solução para cada frequência em regime permanente.

4.4 Resultados e Discussão

Como caso de estudo [70]-[71] considerou-se um aerogerador com características bastante comuns em parques eólicos Portugueses. Assim, o aerogerador em análise possui um gerador com 2 MW de potência nominal.

As pás do rotor são fabricadas por um processo de infusão a vácuo, utilizando o assim chamado método “sandwich“. Os tecidos de fibra de vidro posicionados no molde, são impregnados com resina, a vácuo, através de uma bomba. Este método elimina as bolhas de ar no laminado. O resultado é o apresentado na Fig. 4.2.



Fig. 4.2 – Pás do rotor do aerogerador (Fonte: Enercon)

O diâmetro do rotor deste aerogerador é de 82 m. O cubo do rotor e o gerador circular encontram-se ligados directamente entre si como unidade fixa sem sistema de engrenagem. O apoio da unidade do rotor é montado num eixo fixo, o chamado pivô do eixo. O sistema de accionamento tem apenas dois rolamentos de rolos, de funcionamento lento. O motivo para esta situação é a velocidade de rotação reduzida do accionamento directo.

A Fig. 4.3 representa o accionamento descrito o qual tem a vantagem de possuir o mínimo de componentes.



Fig. 4.3 – Sistema de accionamento do aerogerador (Fonte: Enercon)

O gerador circular utilizado é um gerador síncrono, de baixa rotação, sem acoplamento directo à rede.

A tensão e a frequência de saída variam de acordo com a velocidade de rotação e são convertidas para serem conduzidas para a rede através de um circuito intermédio de corrente contínua e um inversor electrónico.

A torre pode ter entre 70 e 138 m. É constituída por secções cilíndricas de aço ligadas entre si por falanges em L.

O Posto de Transformação (PT) é instalado na base da torre, possuindo um transformador com 2500 kVA de potência nominal e foi concebido pela Siemens especialmente para este tipo de utilização. Efectivamente, as reduzidas dimensões da base da torre obrigam a um projecto especial do transformador.

A Fig. 4.4 apresenta o diagrama de blocos da ligação e monitorização do aerogerador ao transformador. A Fig. 4.5 apresenta o esquema eléctrico da torre eólica.

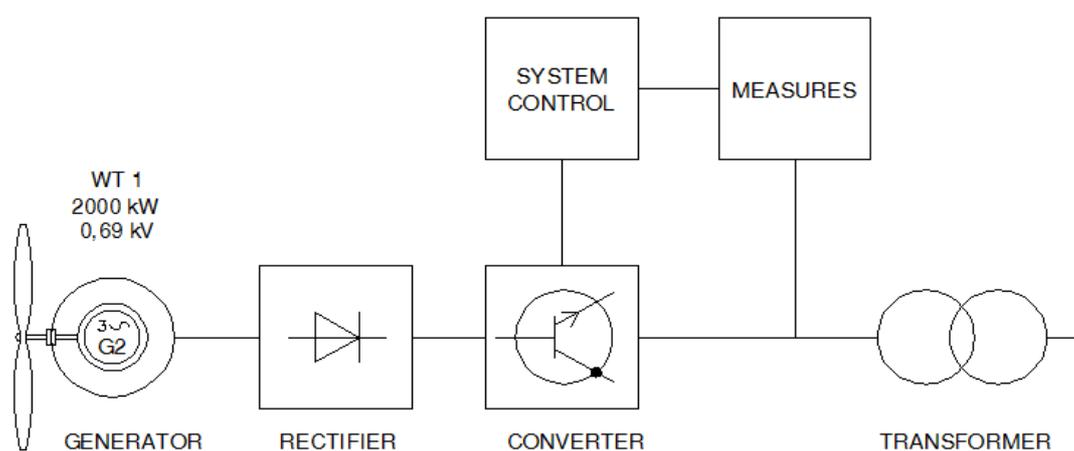


Fig. 4.4 – Ligação do aerogerador ao transformador (Fonte: Enercon)

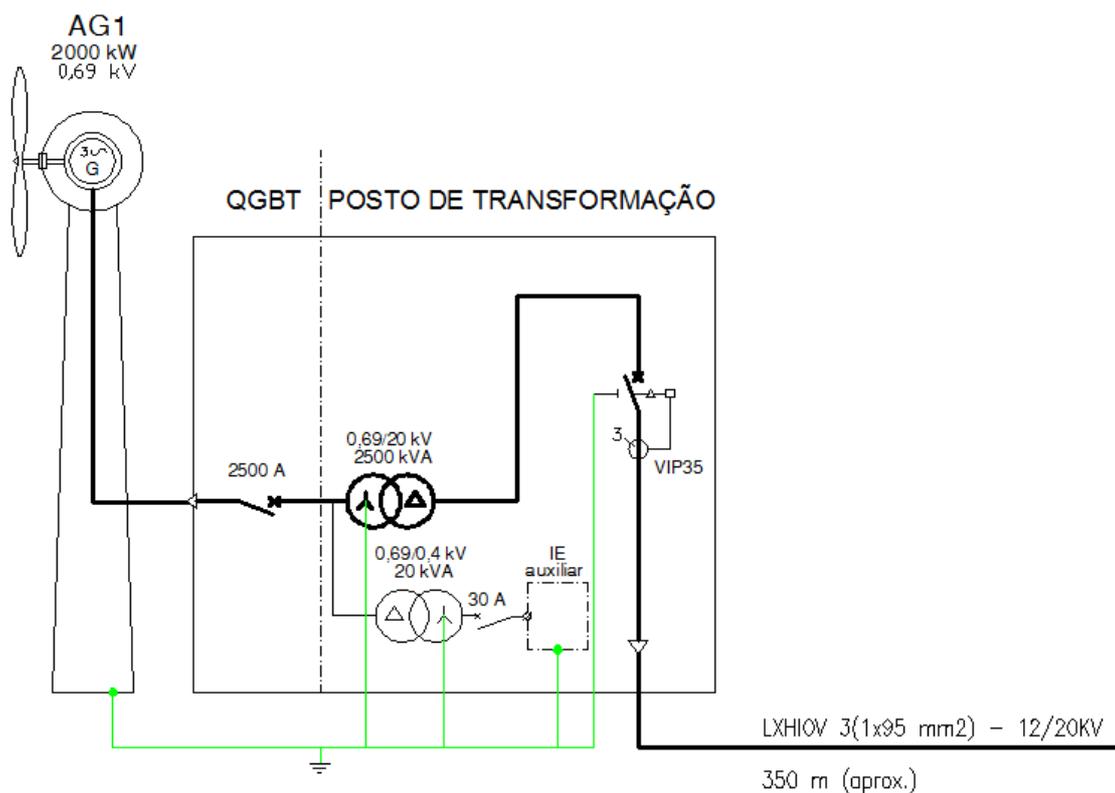


Fig. 4.5 – Esquema eléctrico da torre eólica (Fonte: Siemens)

No caso de estudo que segue, os seguintes pressupostos são assumidos:

- O gerador, o rectificador e o inversor são tratados como uma única unidade, mais concretamente como um gerador síncrono, suficientemente estável a 50 Hz e com uma tensão de saída de 690 V;
- O transformador elevador de tensão 690 V/20 kV é instalado no interior da torre;
- No modelo do transformador apenas se considera a transferência magnética;
- Numa primeira abordagem considera-se que nenhum DPST é colocado do lado primário (BT) ou do lado secundário (MT) do transformador; pretende-se deste modo avaliar a sua real necessidade;

- A ligação à rede do Distribuidor é realizada através de uma Sub-Estação (SE) 20/60 kV;
- A resistência de terra do eléctrodo de terra, na ausência de DEA, é 1Ω , conforme estipulado na regulamentação portuguesa quando na presença de um eléctrodo de terra único.
- A forma de onda da corrente da DEA é a 10/350 μ s, usada para efeitos de ensaios laboratoriais na Europa e com corrente de pico de 10 kA. O valor da corrente de pico recomendado em normas internacionais para projecto e simulação é 200 kA, o qual corresponde a cerca de 2 % das DEA. No entanto, escolheu-se o valor de pico de 10 kA por se ter concluído em [61] que cerca de 80% das DEA no território continental Português tinha uma corrente de pico, no primeiro arco-de-retorno, de pelo menos 10 kA. Pretende-se com esta opção perceber se valores de corrente de pico bastante inferiores ao recomendado para projecto podem causar danos significativos no equipamento eléctrico/electrónico;
- A DEA atinge o solo na proximidade da torre a uma distância tal que apenas se dá acoplamento galvânico através do eléctrodo de terra.

O esquema eléctrico equivalente em EMTP-RV da Fig. 4.6 pretende representar o aerogerador da Fig. 4.5. Em seguida apresenta-se a justificação para a escolha dos diversos modelos e respectiva parametrização.

Fonte de corrente I_{CIGRE}

O modelo I_{CIGRE} é uma das fontes de corrente da biblioteca do EMTP-RV e foi escolhido para simular a corrente injectada pela DEA. Este componente é usado para cálculos rigorosos no estudo do comportamento de aparelhos eléctricos face às DEA. Uma descrição completa deste modelo e as razões que suportam a forma de onda da corrente da DEA para o primeiro arco-de-retorno pode ser encontrada em [26].

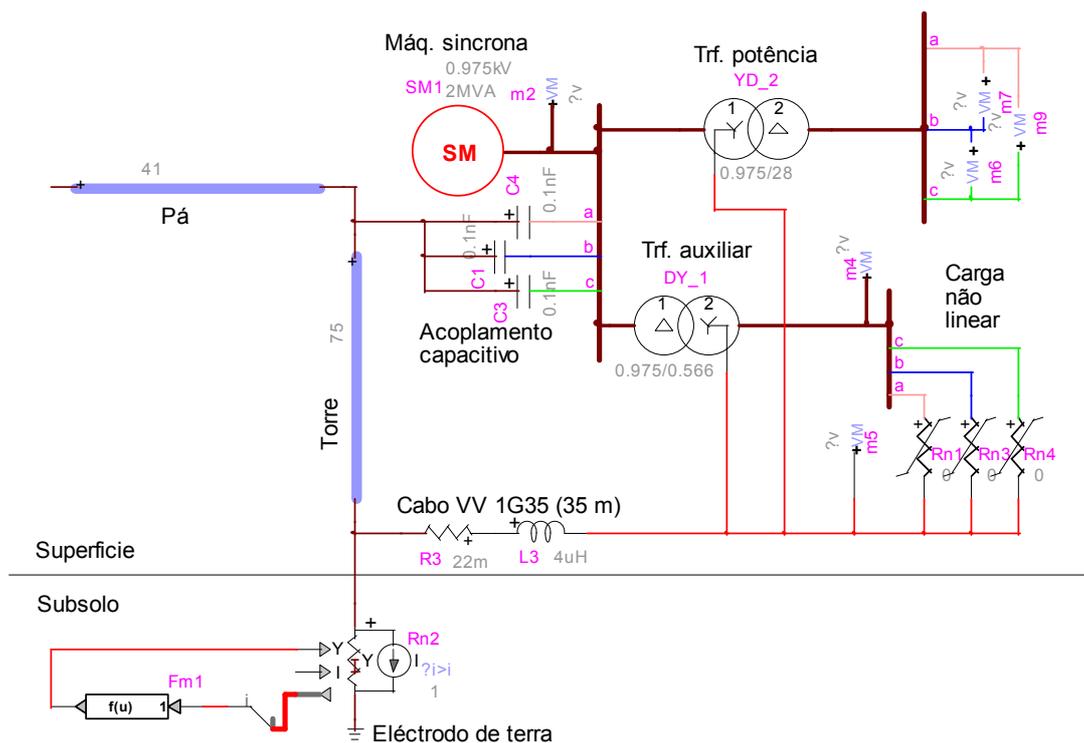


Fig. 4.6 – Esquema eléctrico equivalente em EMTP-RV da Fig.4.5 em funcionamento normal

A equação representativa da frente de onda da corrente do primeiro arco-de-retorno é dada por:

$$I = At + Bt^n \quad (4.24)$$

onde:

$$A = \frac{1}{n-1} \left(0,9n \frac{I_{\max}}{t_n} - S_m \right)$$

$$B = \frac{1}{t_n^n (n-1)} (S_m t_n - 0,9I_{\max})$$

A equação representativa da cauda de onda da corrente do primeiro arco-de-retorno é dada por:

$$I = I_1 e^{-\frac{(t-t_n)}{t_1}} - I_2 e^{-\frac{(t-t_n)}{t_2}} \quad (4.25)$$

No circuito da Fig. 4.6, Icigre2 foi parametrizado para gerar uma corrente do tipo impulsivo com a forma 10/350 μs ($t_{\text{frente}}/t_{1/2\text{cauda}}$) e uma corrente de pico de 10 kA. Escolheu-se a forma 10/350 μs por ser usada na Europa para simular o 1.º arco de retorno em ensaios laboratoriais aplicados a DPST.

Modelos da torre e pá TLM1 e TLM2

A torre e a pá do rotor são modeladas com o modelo CP (Constant Parameter). O modelo CP é um modelo da linha de transmissão com parâmetros distribuídos e frequência fixa. Este modelo é comumente utilizado para simular as torres de alta tensão sujeitas a DEA.

Se o tempo de observação for inferior a dez vezes o tempo gasto pela corrente a percorrer a torre, isto é, $T_{\text{máx}} < 10 \cdot \tau$, com $\tau = h/v = 75\text{m}/300\text{m}/\mu\text{s} = 0,25\mu\text{s}$, donde resulta $T_{\text{máx}} < 2,5\mu\text{s}$, o CP é um modelo conveniente. Esta situação acontece quando apenas a torre é tida em consideração. Quando um sistema de distribuição, cabo, também é considerado, o CP é substituído com vantagem pelo modelo FD de EMTP-RV (parâmetros distribuídos dependente da frequência) ou melhor ainda por um modelo baseado no método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD).

No esquema da Fig. 4.6 o cabo de ligação entre o gerador e os transformadores é considerado com resistência, indutância e capacidade nulas, e o modelo CP aplica-se. A frequência de 100 kHz é característica do 1.º arco de retorno das DEA nuvem-solo, e é utilizada nos modelos da torre e da pá.

As equações básicas do modelo CP no domínio da frequência são as seguintes:

$$\frac{dV(x,t)}{dx} = -R'I(x,t) - L' \frac{dI(x,t)}{dt} \quad (4.26)$$

$$\frac{dI(x,t)}{dx} = -G'V(x,t) - C' \frac{dV(x,t)}{dt} \quad (4.27)$$

O circuito eléctrico representativo do modelo é o apresentado na Fig. 4.7.

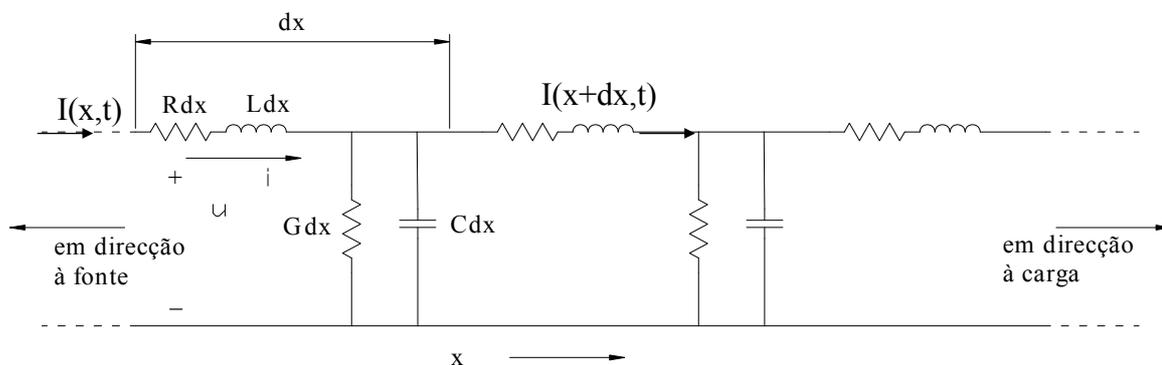


Fig. 4.7 – Modelo da linha de parâmetros distribuídos CP

Modelo do eléctrodo de terra Rn2 e Fm1

Rn2 é um modelo de resistência não linear controlada por sinal externo do EMTP-RV e Fm1 é um bloco função de uma entrada que aplica um valor constante na entrada da admitância de Rn2. Em conjunto Rn2 e Fm1 modelam o eléctrodo de terra habitualmente aplicado em torres MAT. Numa torre eólica o eléctrodo de terra é único e por força da regulamentação nacional o máximo valor da resistência de terra é 1 Ω.

O valor de 1 Ω de resistência de terra só será possível alcançar, na maioria dos casos, estabelecendo o eléctrodo de terra no interior da fundação de betão e considerando a resistividade do betão e não a do solo circundante, habitualmente muito superior.

Uma modelação rigorosa do desempenho dinâmico de um eléctrodo de terra sujeito a correntes de DEA deve incluir, quer a ionização não-linear do solo em função do tempo, quer o comportamento da reactância indutiva em função da frequência. Estes efeitos actuam em oposição uma vez que a ionização do solo favorece a acção do eléctrodo de terra, enquanto que a reactância indutiva do eléctrodo aumenta com a elevada frequência da corrente da DEA, prejudicando a acção do eléctrodo de terra. Não foram considerados neste modelo do aerogerador para não se sobreponem ao efeito da resistência de terra não linear, destacando assim a acção de cada efeito.

O valor de 1Ω para a resistência de terra pode ser obtido com a expressão 4.28 dada em [25] e com os seguintes parâmetros:

$$R = \frac{\rho}{\pi \ell} \left[\ln \left(\frac{2 \ell}{\sqrt{2ad}} \right) - 1 \right] \quad (4.28)$$

onde:

$\rho = 50 \Omega.m$ é a resistividade do betão,

$\ell = 100 \text{ m}$ é o comprimento do eléctrodo de terra,

$a = 4.10^{-3} \text{ m}$ é o raio;

$d = 2 \text{ m}$ é a profundidade de enterramento do eléctrodo, assumindo que

$$\ell \gg a \text{ e } \ell \gg d.$$

Modelo do DPST ZnO1

O modelo ZnO usado para simular o DPST é um modelo da biblioteca do EMTP-RV e representa um DPST de óxidos metálicos. Este modelo consiste numa função não linear, cujo comportamento é dado pela equação (4.29) [72], e a solução se obtém por iteração:

$$i_a = k v_a^\alpha \quad (4.29)$$

onde i_a é a corrente do DPST e v_a é a tensão do DPST.

Para DPST com carbonato de silício (S_iC) o valor de α situa-se entre 2 e 6. Para DPST com óxidos metálicos $10 \leq \alpha \leq .60$. A constante k é usada para ajustar a característica do DPST.

Modelo do acoplamento capacitivo C1, C3 e C4

Estes condensadores simulam o efeito capacitivo entre a carcaça tubular da torre e o cabo de ligação entre o gerador e os transformadores de tensão. A torre ao ser atingida directa ou indirectamente verá o seu potencial eléctrico elevar-se. Nestas circunstâncias a diferença de potencial entre a carcaça da torre e o cabo pode ser de tal forma elevada que pode dar origem a disrupções do meio dieléctrico, o ar e, causar sobretensões por esta via no equipamento eléctrico. O acoplamento indutivo não foi considerado porque no caso de uma DEA directa a corrente irá fluir aproximadamente de forma homogénea pela superfície do tubo de aço e como tal não haverá lugar a campo magnético no seu interior. No caso de uma DEA indirecta o campo magnético gerado em torno do canal de descarga penetra o tubo de aço da torre eólica, mas a sua capacidade para causar sobretensões induzidas por esta via será tanto menor quanto maior o seu afastamento. A distância de ocorrência de uma DEA na vizinhança de uma torre eólica nunca é muito reduzida, pois se o for a DEA atinge a torre directamente.

Modelo do cabo de terra R3 e L3

O modelo de parâmetros concentrados constituído por uma resistência e uma indutância, representam o cabo de ligação do equipamento ao eléctrodo de terra, neste caso é o cabo VV 1G35 mm². Os valores indicados no esquema eléctrico derivam dos parâmetros lineicos do cabo e do seu comprimento.

Modelo máquina síncrona SM1

É um modelo EMTP-RV da máquina síncrona usada comumente como gerador de tensão trifásica em aerogeradores. Este modelo permite parametrização

eléctrica e mecânica, simular a saturação e a existência de diversas máquinas no mesmo barramento. O bloco rectificador-inversor não foi incluído neste modelo por uma questão de simplificação.

Modelo dos transformadores DY_1 e YD_2

Representam os transformadores adaptadores de tensão. YD_2 eleva a tensão para 20 kVRMS e DY_1 reduz a tensão para 400 VRMS. O nível de tensão 20 kV é usado para interligar os diversos aerogeradores à SE e transportar a energia gerada. A BT é utilizada para alimentar o equipamento electrónico de comando e controlo. Os modelos utilizados representam transformadores trifásicos com enrolamentos separados nos quais é considerada a corrente de magnetização. A utilização de transformadores com a estrela ligada à terra é conveniente porque: proporcionam um caminho de retorno à terra em caso de defeito fase-terra; mitiga a sobretensão nas fases que não estão em defeito; mitiga a ferro-ressonância. A utilização de transformadores de potência YD possui a vantagem de mitigar o valor das sobretensões propagadas para a rede MT. No caso do transformador auxiliar, importa que o enrolamento secundário seja em estrela para nos disponibilizar o condutor neutro necessário aos receptores monofásicos.

Modelo do equipamento electrónico Rn1, Rn3 e Rn4

São resistências não-lineares que representam o equipamento electrónico de comando e controlo.

Outros dispositivos m?

Representam os aparelhos de medida para visualização das formas de onda resultantes da simulação.

Nas condições particulares da Fig. 4.6 a simulação apresenta as formas de onda expectáveis em funcionamento com ausência de defeito. Os resultados obtidos no EMTP-RV podem ser observados na Fig. 4.8.

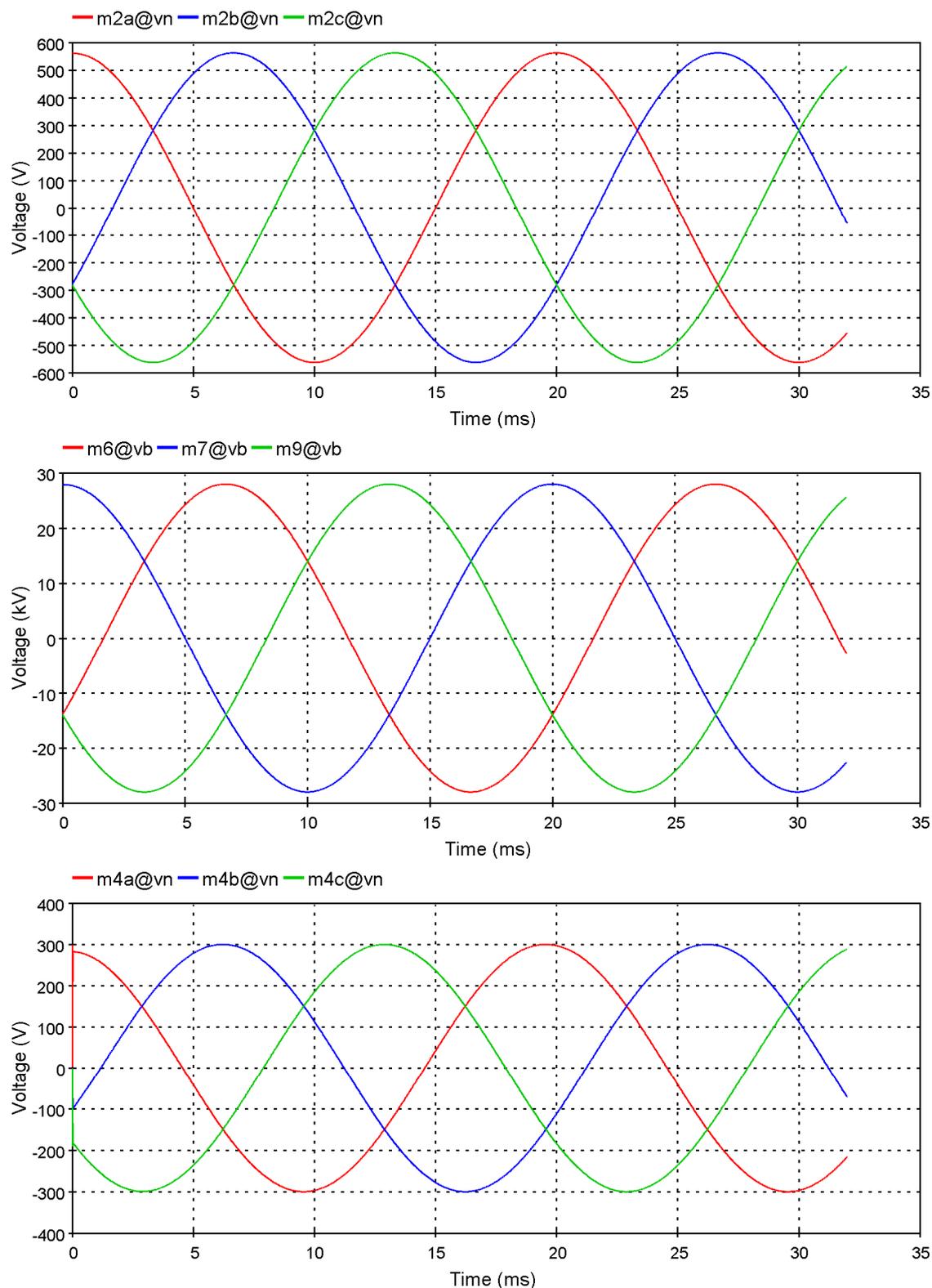


Fig. 4.8 – Formas de onda da tensão: a) à saída do gerador (m2); b) à saída do transformador elevador (m6, 7, 9); c) à saída do transformador auxiliar (m4)

A ocorrência de uma DEA na vizinhança da torre eólica (Fig. 4.9) revela sobretensões da ordem dos 10 kV. Apesar da não consideração do efeito indutivo no eléctrodo de terra e de se ter considerado uma resistência de terra favorável, a sobretensão é suficiente para destruir o equipamento eléctrico e electrónico no interior do aerogerador.

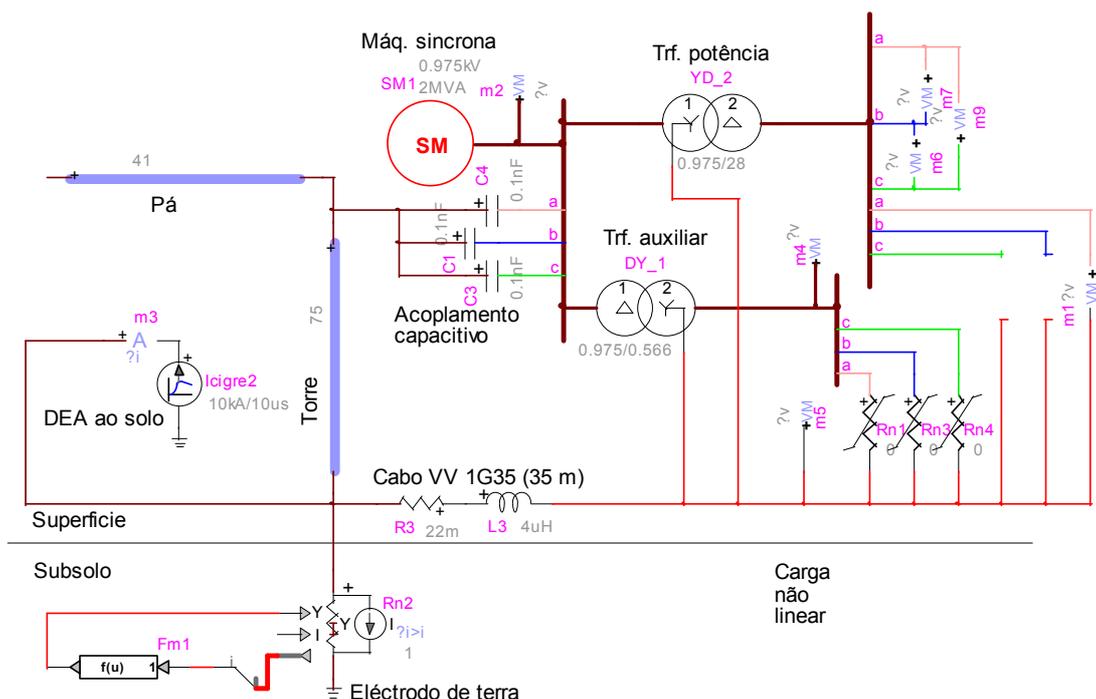


Fig. 4.9 – Esquema eléctrico equivalente em EMTP-RV da Fig.4.5 com DEA indirecta

Os resultados obtidos por simulação no EMTP-RV podem ser observados na Fig. 4.10. Pelo facto do transformador de potência ter o enrolamento secundário em triângulo, a visualização das tensões compostas não permite observar qualquer sobretensão uma vez que, sendo iguais em todas as fases, se anulam. Foi por isso necessário individualizar uma fase para se observar a perturbação causada pela DEA no secundário do transformador de potência.

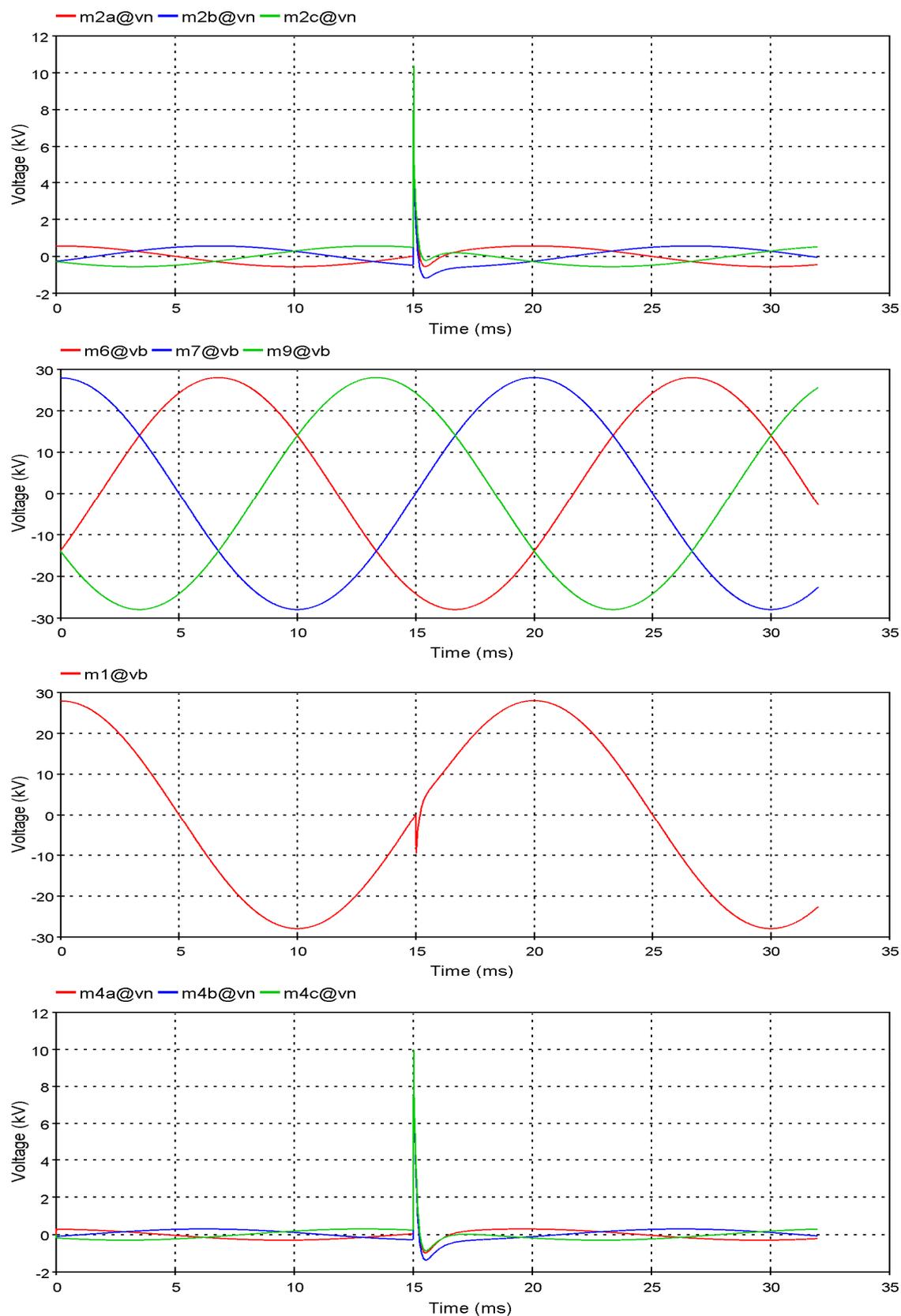


Fig. 4.10 – Formas de onda da sobretensão resultantes da simulação em EMTP-RV do esquema da Fig.4.9: a) à saída do gerador (m2); b) à saída do transformador elevador (m6, 7, 9); c) à saída do transformador elevador (m1); d) à saída do transformador auxiliar (m4)

A ocorrência de uma DEA na vizinhança da torre eólica (Fig. 4.11), mesmo com um DPST de 1 kV quase idealmente ligado, revela sobretensões da ordem dos 5 kV. Apesar de se ter verificado uma redução da sobretensão para metade, esta ainda é suficiente para destruir o equipamento electrónico no interior do aerogerador.

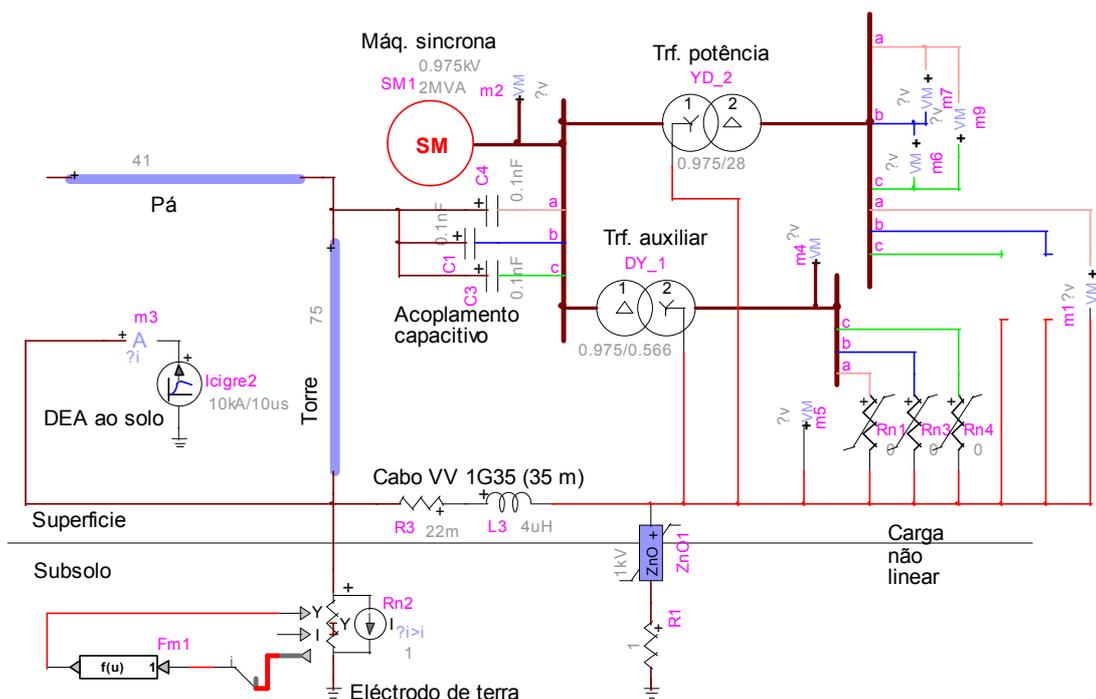


Fig. 4.11 – Esquema eléctrico equivalente em EMTP-RV da Fig.4.5 com DEA indirecta e DPST quase idealmente ligado

Os resultados obtidos por simulação no EMTP-RV podem ser observados na Fig. 4.12.

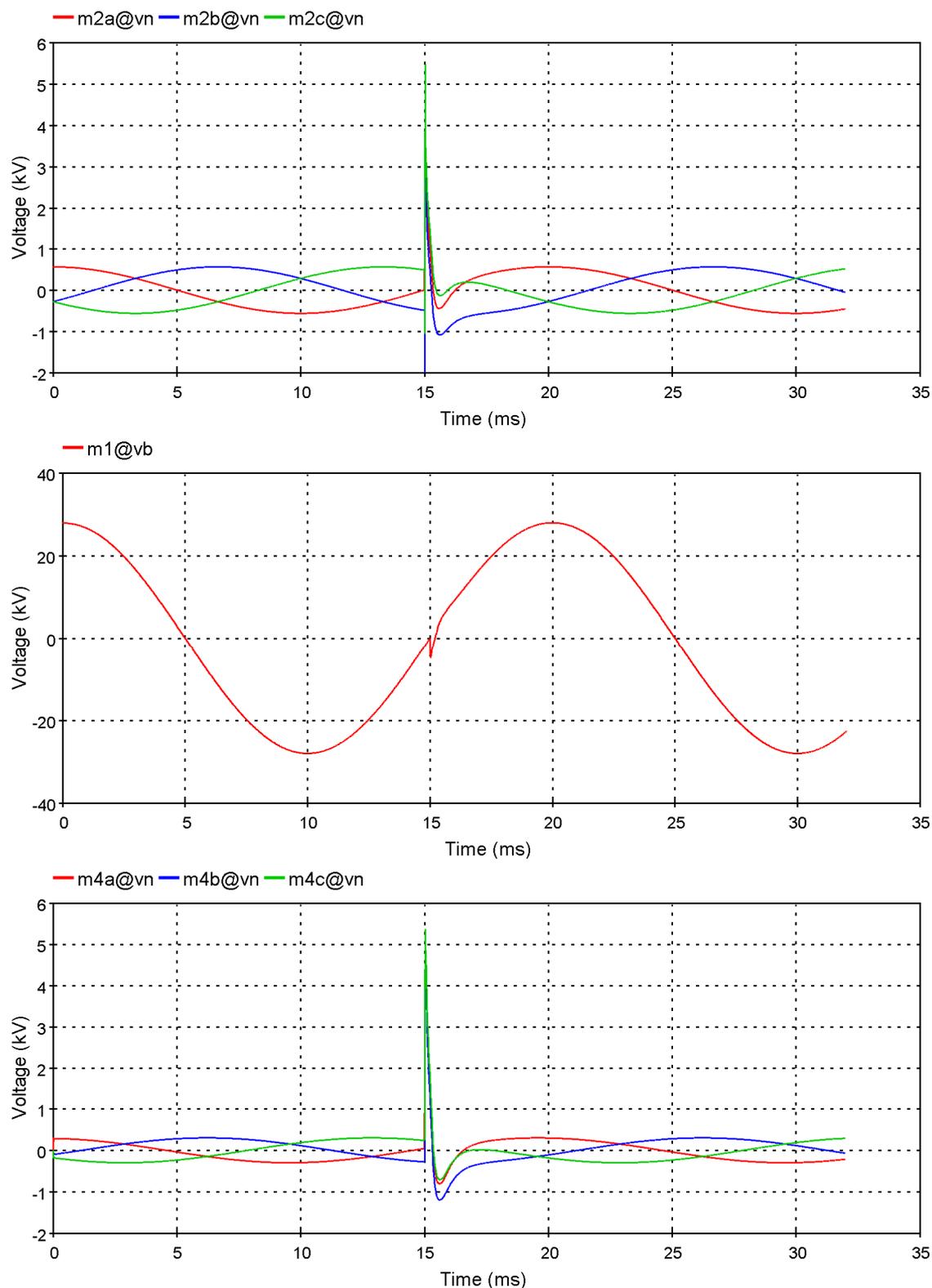


Fig. 4.12 – Formas de onda da sobretensão resultantes da simulação em EMTP-RV do esquema da Fig.4.11: a) á saída do gerador (m2); b) á saída do transformador elevador (m1); c) á saída do transformador auxiliar (m4)

A ocorrência de uma DEA na vizinhança da torre eólica (Fig. 4.13), apenas com um DPST de 1 kV idealmente ligado à terra, não revela sobretensões passíveis de causar dano ao equipamento eléctrico e electrónico.

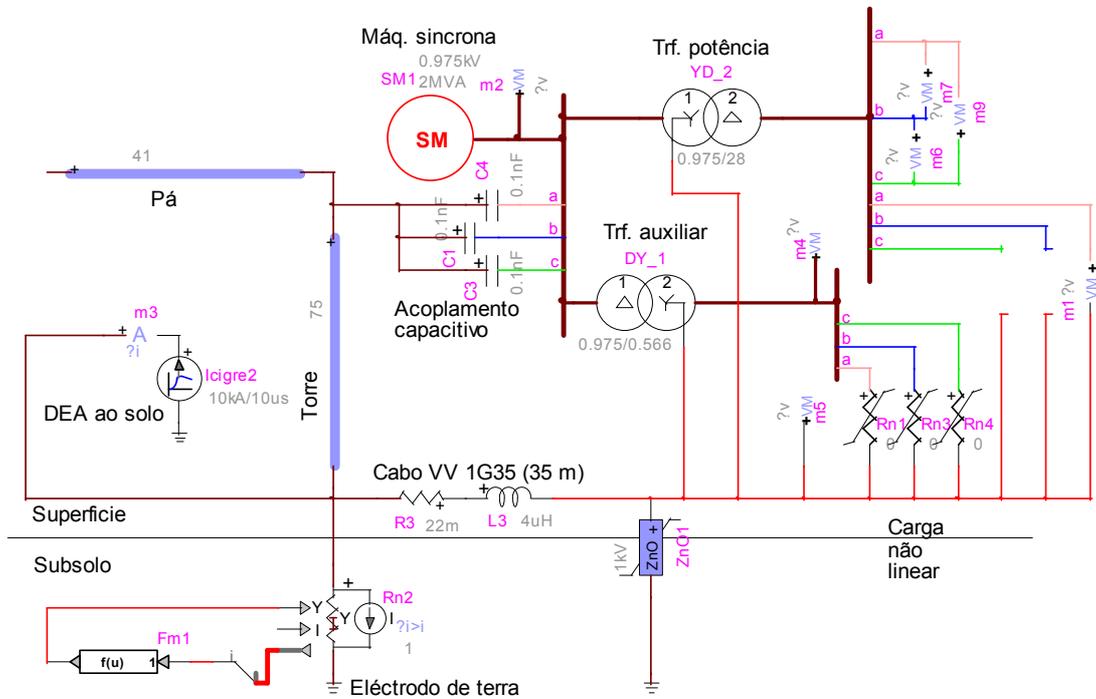


Fig. 4.13 – Esquema eléctrico equivalente em EMTP-RV da Fig.4.5 com DEA indirecta e DPST idealmente ligado

Os resultados obtidos por simulação no EMTP-RV podem ser observados na Fig. 4.14.

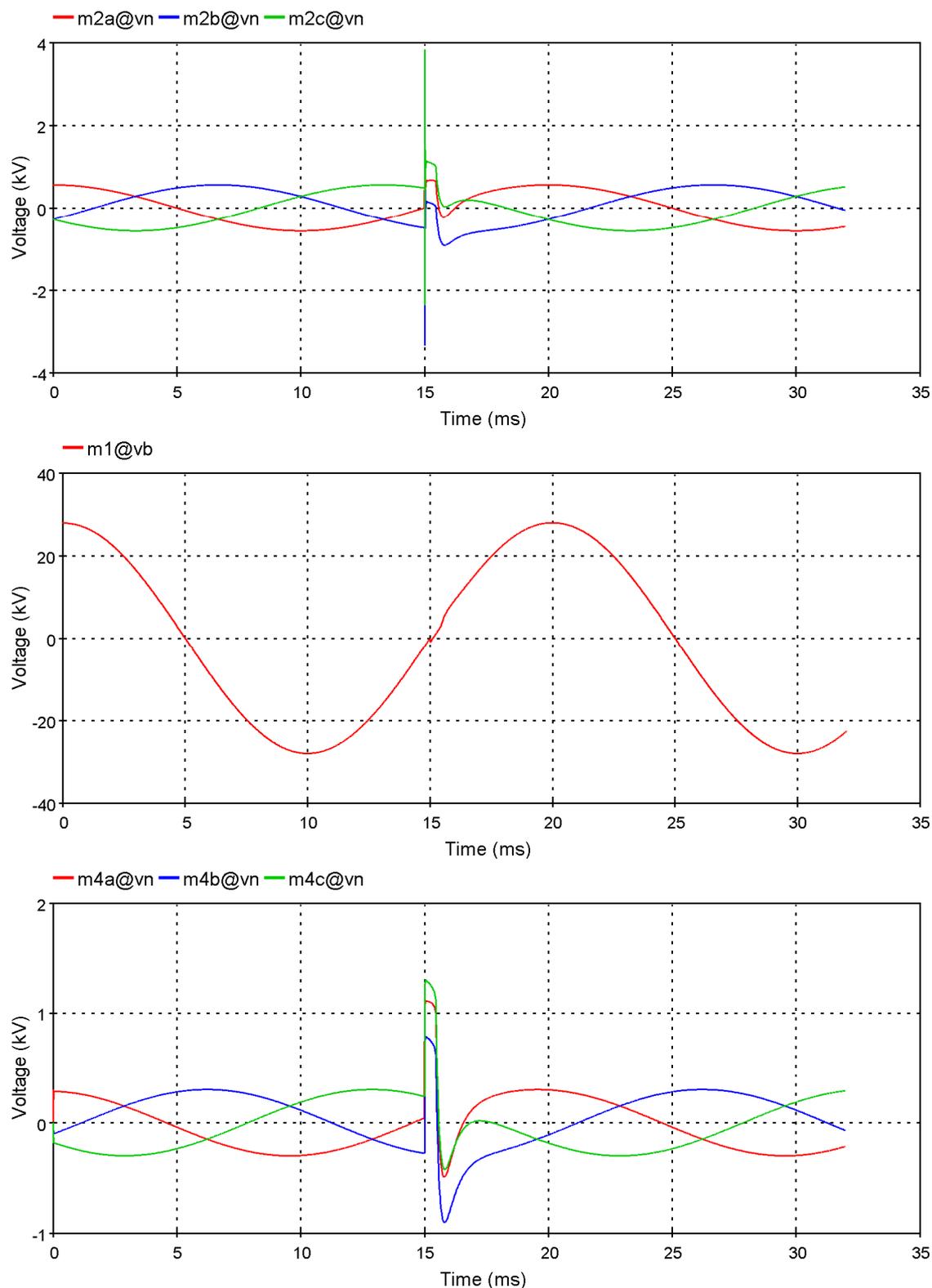


Fig. 4.14 – Formas de onda da sobretensão resultantes da simulação em EMTP-RV do esquema da Fig.4.13: a) à saída do gerador (m2); b) à saída do transformador elevador (m1); c) à saída do transformador auxiliar (m4)

A Fig. 4.15 apresenta o esquema eléctrico com dois aerogeradores.

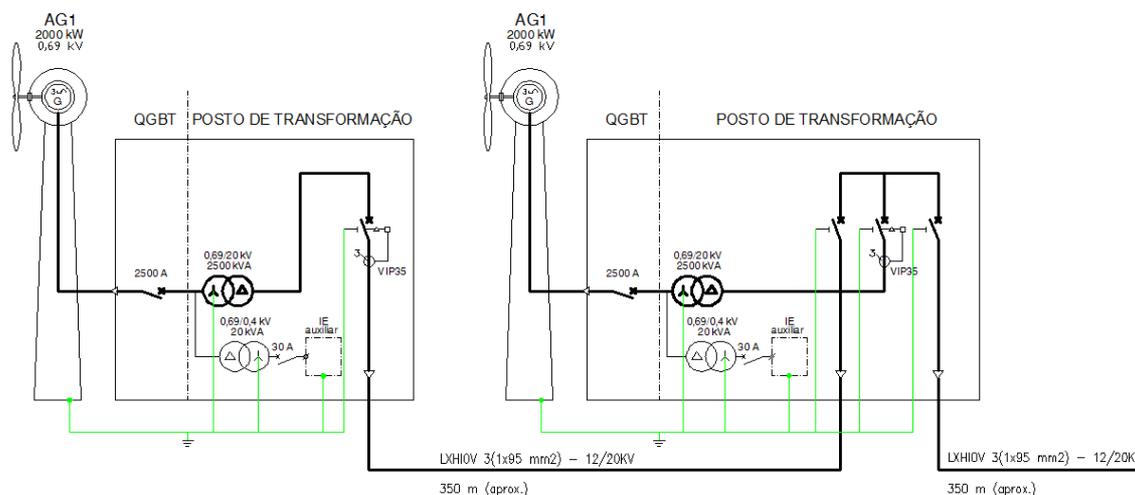


Fig. 4.15 – Esquema eléctrico com dois aerogeradores

O esquema eléctrico equivalente em EMTP-RV da Fig. 4.16 representa dois aerogeradores, sendo que na proximidade de um dos quais ocorre uma DEA nuvem-solo. Por simplicidade o cabo MT é aqui representado por um modelo de parâmetros concentrados. Nenhum DPST é colocado do lado primário (BT) ou do lado secundário (MT) do transformador, pretendendo-se deste modo avaliar a real influência da sobretensão sobre o segundo aerogerador.

Com uma DEA de corrente de pico igual a 10 kA o segundo aerogerador não fica sujeito a sobretensões perigosas para o equipamento. Os resultados são apresentados na Fig. 4.17.

Mesmo em presença de uma DEA com corrente de pico igual a 200 kA o segundo aerogerador não fica sujeito a sobretensões perigosas para o equipamento. As sobretensões presentes no primeiro aerogerador são consideráveis e para evitar danos no seu equipamento devem ser utilizados DPST, conforme representado na Fig. 4.13. Os resultados podem ser observados na Fig. 4.18.

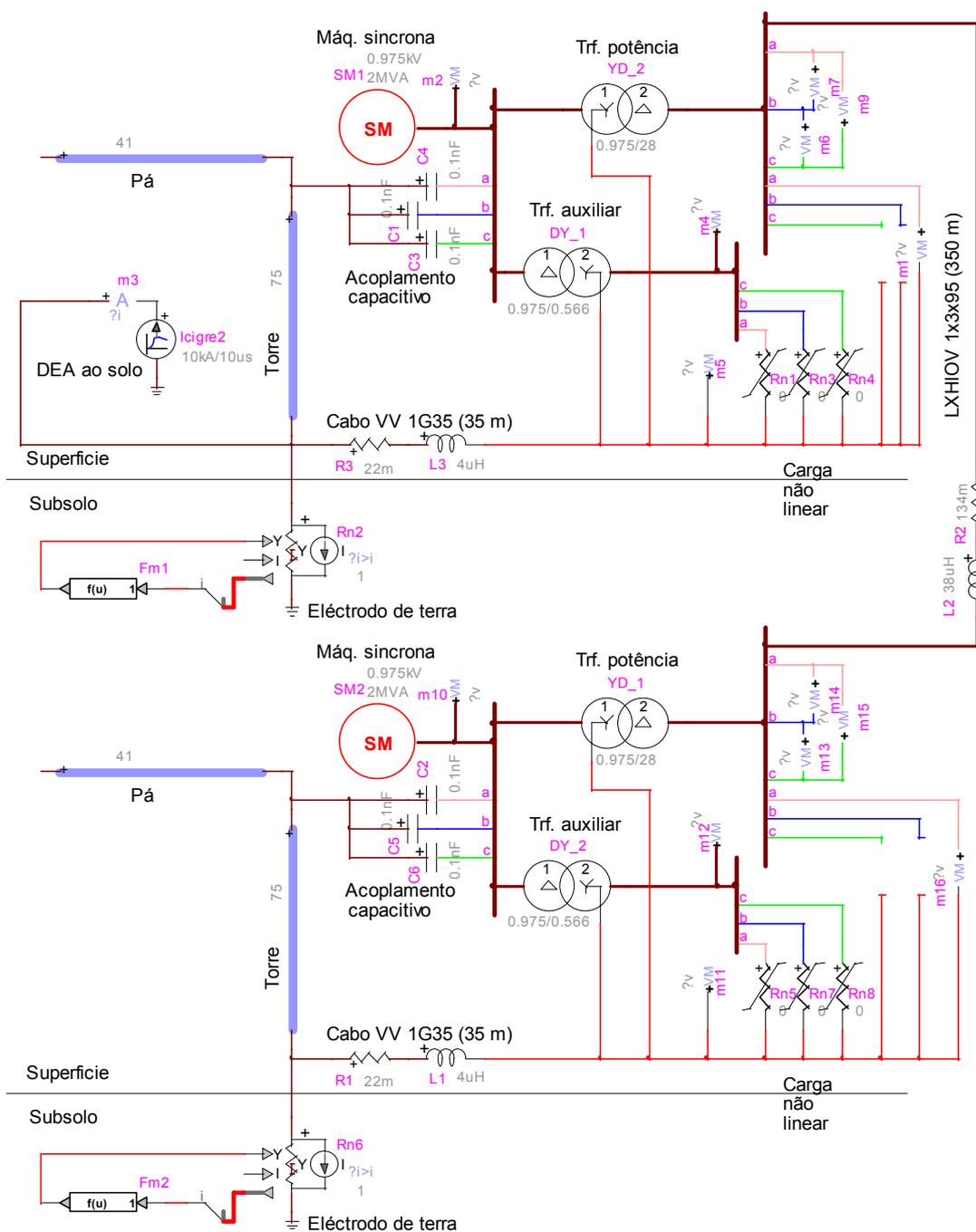


Fig. 4.16 – Esquema eléctrico equivalente em EMTP-RV da Fig.4.15 com ocorrência de uma DEA indirecta junto a uma das torres

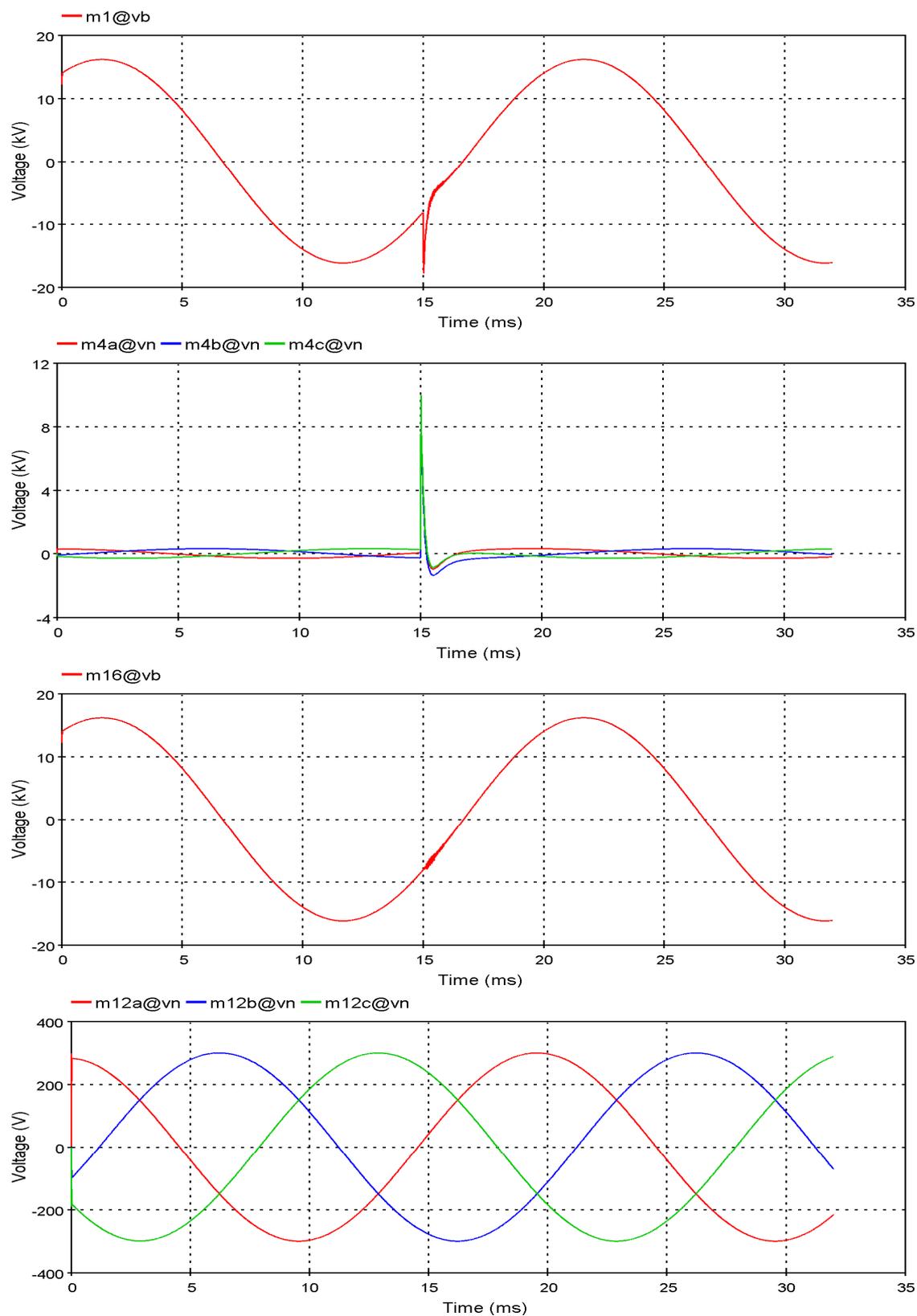


Fig. 4.17 – Formas de onda da sobretensão resultantes da simulação em EMTP-RV do esquema da Fig.4.16: a) à saída do transformador elevador (m1); b) à saída do transformador auxiliar (m4); c) à saída do transformador elevador (m16); d) à saída do transformador auxiliar (m12)

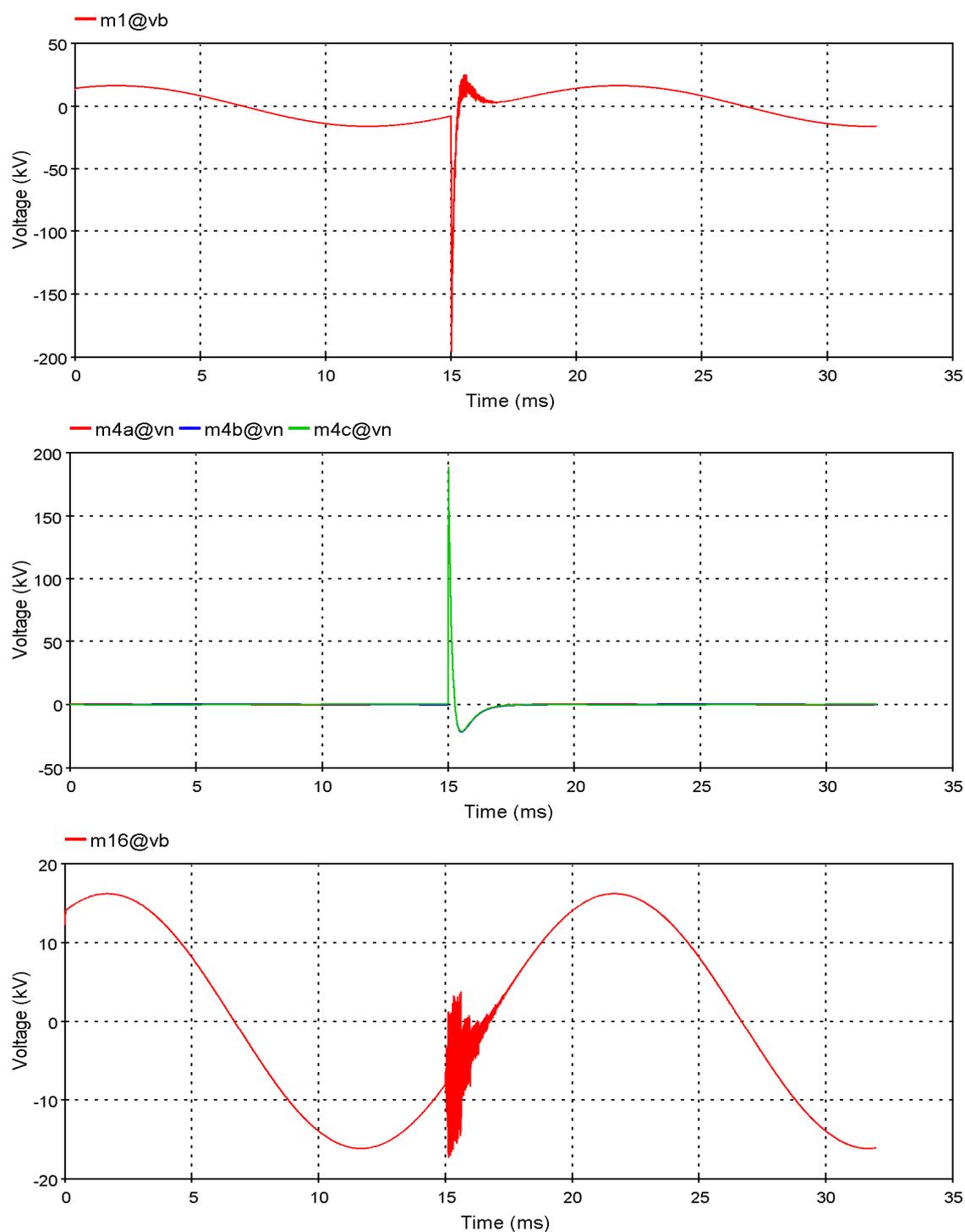


Fig. 4.18 – Formas de onda da sobretensão obtidas para esquema da Fig.4.16 com $I=200$ kA: a) à saída do transformador elevador (m1); b) à saída do transformador auxiliar (m4); c) à saída do transformador elevador (m16)

4.5 Conclusões

Com o intuito de modelar matematicamente a propagação das sobretensões em meios condutores, foram obtidas as equações da linha de transmissão.

O programa de computador EMTP-RV foi apresentado e as suas principais características realçadas. O EMTP é um programa de reconhecido mérito internacional na simulação de transitórios electromagnéticos. A versão EMTP-RV é a mais recente evolução deste programa.

De modo a implementar os conhecimentos teóricos adquiridos e utilizar o programa de simulação EMTP-RV foram apresentados dois casos de estudo, respectivamente com um e dois aerogeradores, dotados do seu equipamento habitual, atingidos indirectamente por uma DEA nuvem-solo.

Os resultados obtidos mostram que, mesmo considerando uma corrente de pico com 10 kA, bastante inferior ao que pode ser injectada por uma DEA, a protecção contra as DEA indirectas requer a existência de DPST adequados para proteger o equipamento mais sensível, nomeadamente o equipamento electrónico.

O estudo da propagação das sobretensões através do eléctrodo de terra foi privilegiado, e mostra que em condições de ligação à terra ideais um DPST é suficiente para proteger o equipamento eléctrico e electrónico das sobretensões.

No entanto, em condições reais e mesmo em presença de valores extremamente baixos para a resistência de terra, o DPST pode não ser totalmente eficaz na sua função.

CAPÍTULO

5

Protecção dos Parques Eólicos contra Efeitos Directos das DEA

Neste capítulo é apresentado o estudo realizado à protecção dos parques eólicos contra os efeitos directos das DEA. É apresentada uma revisão sobre o método de análise de risco de danos causados por DEA proposto pela normalização internacional IEC 62305. É apresentado um novo programa de computador em Visual Basic, o LPS 2008, desenvolvido para o propósito desta tese. O LPS 2008 corre sobre o AutoCAD, efectua a análise de risco de danos de uma qualquer estrutura ou conjunto de estruturas baseado na IEC 62305 e permite ainda a simulação em 3D do RSM. O RSM permite identificar os pontos vulneráveis de uma estrutura em função do nível de protecção escolhido. O EMTP-RV é utilizado no estudo da propagação das sobretensões causadas por DEA directas em dois casos de estudo. No primeiro caso de estudo considera-se apenas um aerogerador dotado do seu equipamento habitual, e no segundo são considerados dois aerogeradores interligados.

5.1 Introdução

Em Portugal o primeiro aerogerador foi instalado em 1985. Desde então a capacidade instalada cresceu rapidamente, atingindo 3338 MW em Junho de 2009. A Fig. 5.1 apresenta o posicionamento de Portugal face aos demais países europeus no final de 2008.

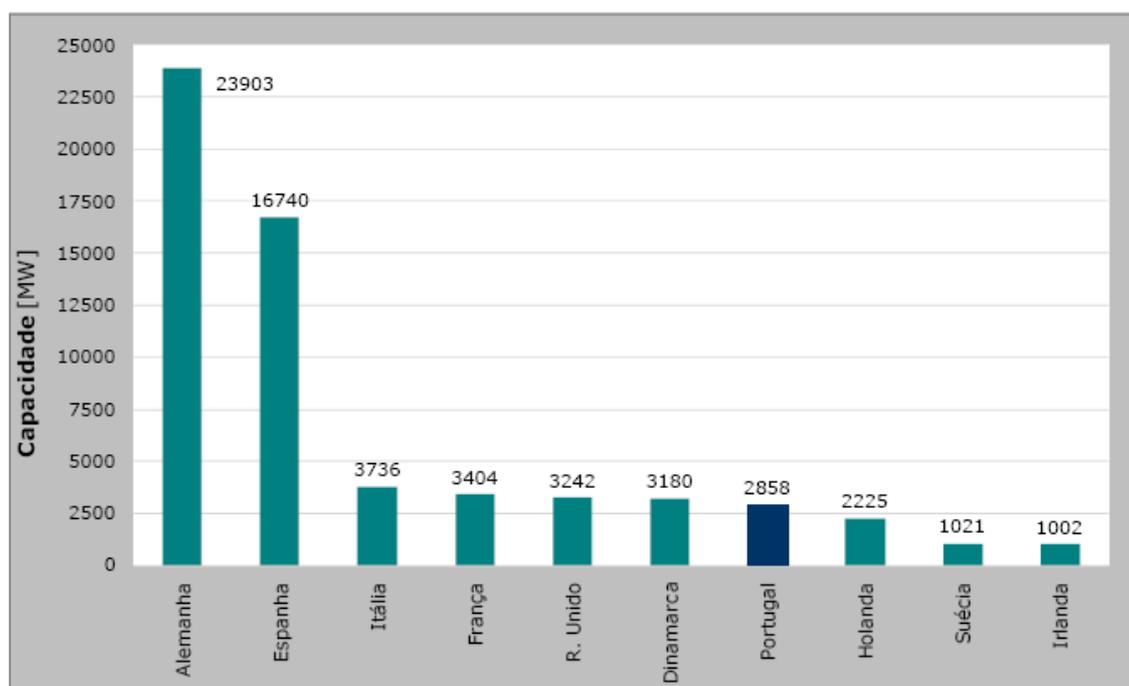


Fig. 5.1 – Capacidade instalada na Europa em Finais de 2008 [73]

A Fig. 5.1 permite-nos concluir que, aparte a Alemanha e a Espanha, Portugal mesmo com menor área territorial se encontra ao nível de países com a França e o Reino Unido.

O Governo Português atribuiu uma importância estratégica elevada às energias renováveis e em particular à energia eólica. Esta estratégia visa reduzir a dependência externa de Portugal em matéria de produtos petrolíferos e cumprir com os compromissos ambientais assumidos na ratificação do Protocolo de Quioto. Portugal apresenta um dos maiores crescimentos em potência instalada (Fig. 5.2).

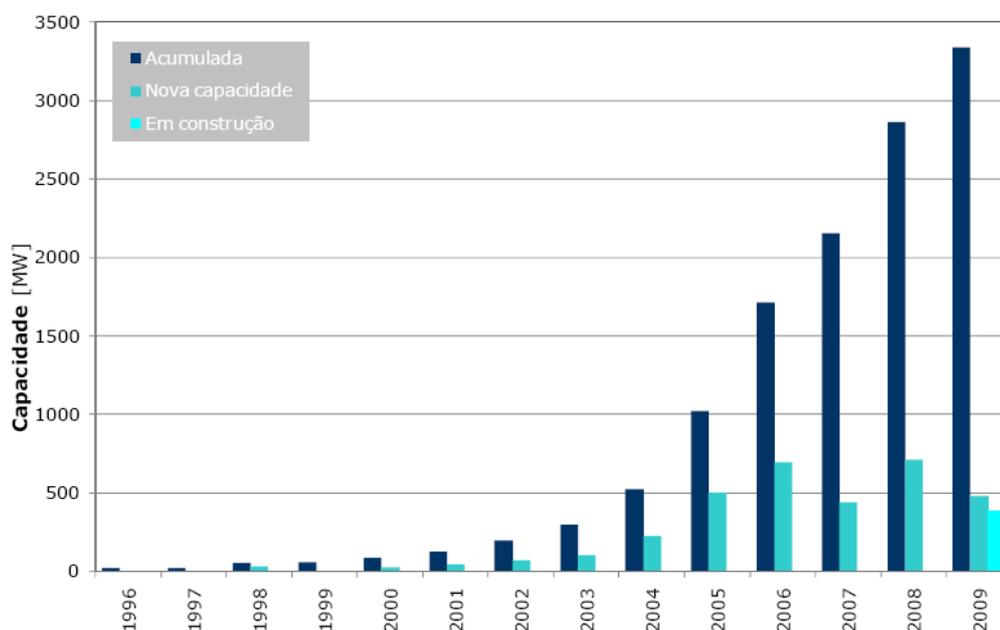


Fig. 5.2 – Capacidade instalada e acumulada em Portugal (Junho de 2009 [73])

A localização dos parques eólicos em Portugal, em Junho de 2009, é apresentada na Fig. 5.3.

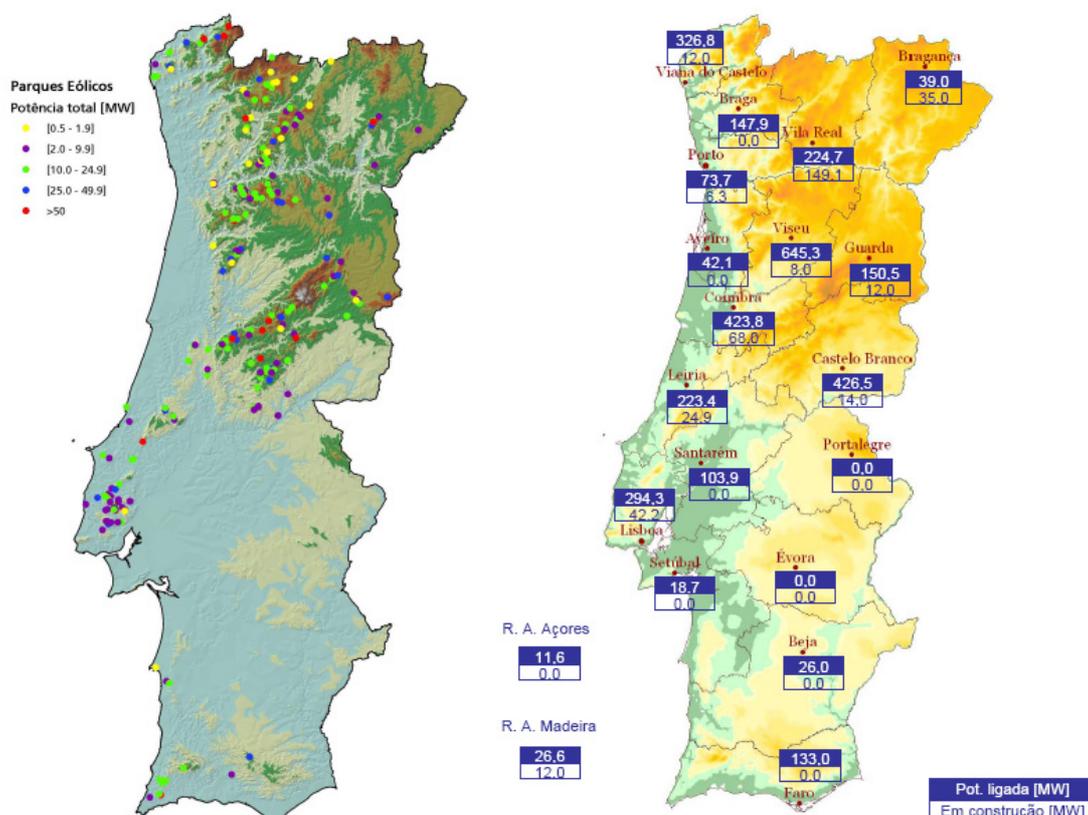


Fig. 5.3 – Localização dos parques eólicos em Portugal (Junho de 2009 [73])

O crescente número de parques eólicos tem tornado a fiabilidade e protecção destas instalações eléctricas uma preocupação também crescente. Por esta razão, a protecção eficaz de parques eólicos contra os danos causados por DEA é de crucial importância uma vez que, não raras vezes, os locais mais favoráveis para a instalação de parques eólicos são também locais de elevada actividade cerâmica.

Assim, uma das principais causas de danos em parques eólicos são sem dúvida os efeitos das DEA [74]. Segundo Glushakow [75] as DEA são a principal causa de paragem por avaria dos aerogeradores, provocando a perda de incontáveis MWh em energia não fornecida. Os modernos aerogeradores caracterizam-se por possuírem grande potência, como é o caso do modelo E-126 da Enercon com 7 MW (Fig. 5.4), elevada altura, muitas vezes acima dos 100 m e algumas com mais de 200 m, e o sempre presente equipamento electrónico de processamento e controlo [76].



Fig. 5.4 – Modelo E-126 da Enercon (Fonte: Enercon)

As estatísticas de danos, em parques eólicos, causados por DEA foram analisadas em [1]. Na Alemanha 14% dos aerogeradores localizados em zonas montanhosas foram danificados por DEA [2]. O Japão é um país que sofre intensamente os efeitos das DEA onde a percentagem de aerogeradores danificados é de 36% [3].

De modo a mitigar os efeitos das DEA em parques eólicos é crucial conhecer a actividade ceráunica da região e o risco de danos associado a cada parque em concreto, tornando assim possível conceber medidas de protecção mais eficazes [4].

Não existe nenhuma norma nacional ou internacional especificamente vocacionada para a protecção de parques eólicos contra os efeitos das DEA. O documento mais próximo deste objectivo é o relatório técnico IEC TR 61400-24 [77]. Tipicamente os relatórios técnicos da IEC são meramente informativos, mas a IEC TR 61400-24 deve ser encarada como um importante passo em frente.

Em Janeiro de 2006, surgiu uma nova norma da IEC; trata-se da série IEC 62305, a qual se encontra dividida em quatro partes, 62305-1 a 62305-4 [5], [6], [7] e [78], que: estabelece os princípios gerais da protecção contra os efeitos directos e indirectos das DEA em qualquer estrutura; proporciona um método bem experimentado de análise de risco de danos conducente a um nível de protecção adequado; indica o RSM para a determinação dos pontos vulneráveis de uma estrutura; e proporciona indicações práticas sobre medidas de protecção a adoptar na protecção de edifícios, equipamento electrónico e canalizações de serviços tais como telecomunicações.

No entanto, a IEC 62305 não considera algumas particularidades dos aerogeradores, tal como o facto destas estruturas possuírem partes condutoras em rotação.

A necessidade da adopção de medidas de protecção, a selecção adequada dessas medidas e os benefícios económicos daí decorrentes, devem basear-se numa análise de risco de danos bem fundamentada [79]. A identificação dos pontos mais vulneráveis de uma estrutura que possa ser atingida por uma DEA é uma questão crucial no bom funcionamento de um sistema de protecção contra DEA [80].

Face às razões expostas anteriormente, adopta-se nesta tese o método de análise de risco de danos proposto na IEC 62305-2, o qual no entanto apresenta a dificuldade prática de necessitar informação acerca de muitos parâmetros e cálculos. Ainda, o RSM exige a construção de maquetas à escala, tornando-o também pouco prático e caro.

De modo a solucionar estes problemas foi desenvolvido um novo programa de computador em Visual Basic, o LPS 2008, que utiliza o ambiente do AutoCAD para modelar as estruturas em 3D, desenhar canalizações de serviços, extrair informação numérica a partir de objectos desenhados, e construir autonomamente novos objectos desenhados a partir de informação numérica calculada.

O LPS 2008 efectua a análise de risco de danos a qualquer estrutura de acordo com a metodologia proposta na IEC 62305-2 e simula em 3D o RSM, sendo até hoje, tanto quanto sabemos, o único programa capaz disso. Apesar do LPS 2008 ter sido desenvolvido para a protecção de parques eólicos, pode perfeitamente ser utilizado noutras estruturas.

5.2 Análise do Risco de Danos

Tal como já foi referido anteriormente o método utilizado nesta tese para a análise de risco de danos, em estruturas e serviços, causados por DEA, é o proposto na norma IEC 62305-2.

Uma vez estabelecido um valor aceitável para o risco de danos, o método auxilia o projectista na escolha das medidas de protecção mais adequadas à situação.

O método para a análise de risco de danos da norma IEC 62305-2 considera que a corrente da DEA é a principal causa de danos. As seguintes fontes de danos são estabelecidas em função do ponto de impacto da DEA nuvem-solo:

- S1 – DEA que atingem a estrutura;
- S2 – DEA que ocorrem na vizinhança da estrutura;
- S3 – DEA que atingem as canalizações de serviços;
- S4 – DEA que ocorrem na vizinhança das canalizações de serviços.

As DEA podem ser perigosas para a vida de pessoas e animais, para as estruturas e para os diversos serviços existentes; assim, os seguintes danos são considerados:

- D1 – danos em seres vivos;
- D2 – danos na estrutura e no seu recheio;
- D3 – Falhas de equipamento eléctrico e electrónico.

As fontes de danos S1 e S3 podem causar danos do tipo D1, D2 e D3. As fontes de danos S2 e S4 podem causar danos do tipo D3. Para além disto, as avarias causadas por sobretensões transitórias nas instalações de utilização e nas redes de distribuição podem ainda causar sobretensões de manobra que afectem as instalações eléctricas.

Cada tipo de danos, isoladamente ou combinado com outros, pode produzir uma perda diferente no objecto que se pretende proteger. O tipo de perda que pode surgir depende das características da estrutura e do seu conteúdo. Os seguintes tipos de perdas são considerados:

- L1 – Perda de vida humana;
- L2 – Perda de serviços públicos;
- L3 – Perda de património cultural;

- L4 – Perda de valor económico (estrutura, recheio, serviços e perda de produtividade).

Medidas de protecção extraordinárias podem ser necessárias de modo a reduzir as perdas devidas aos efeitos nefastos das DEA. A justificação que fundamenta a decisão de aplicar certas medidas de protecção extraordinárias deve ser encontrada numa análise de risco apropriada. O risco é definido em [6] como sendo a perda média anual numa estrutura ou num serviço, devido às DEA nuvem-solo, e depende de:

- O número anual de DEA capaz de influenciar a estrutura ou o serviço;
- A probabilidade de uma DEA, com influência na estrutura ou serviço, causar danos;
- O valor monetário anual médio das perdas sofridas.

O número anual de DEA capaz de influenciar a estrutura ou serviço depende da sua dimensão e características construtivas, do meio ambiente envolvente e da densidade de DEA (GFD) da região.

A probabilidade de uma DEA com influência na estrutura ou serviço causar danos depende das características da estrutura, do serviço e da corrente da DEA, bem como das medidas de protecção aplicadas e da sua eficiência. O valor monetário anual médio das perdas sofridas depende dos danos sofridos e das suas consequências.

As medidas de protecção aplicadas têm como efeito reduzir a probabilidade de danos e consequentes perdas. A expressão matemática para calcular o risco de danos é dada por:

$$R = (1 - e^{-NPt})L \quad (5.1)$$

N é o número anual de DEA capaz de influenciar a estrutura ou o serviço; P é a probabilidade de uma DEA com influência na estrutura ou serviço causar danos; L é a perda média em consequência de uma DEA capaz de influenciar a estrutura ou o serviço; e t é o período sob avaliação, o qual se considera habitualmente um ano. Quando $NPt \ll 1$, o que na prática acontece sempre, a expressão (5.1) transforma-se em:

$$R = N P L t \quad (5.2)$$

R é assim entendido como sendo risco global de danos. Para cada tipo de perda, L1 a L4, são avaliados os riscos mais relevantes. As componentes do risco que devem ser avaliadas relacionadas com uma estrutura são:

- R_1 – Risco de perda de vidas humanas;
- R_2 – Risco de perda de serviços públicos;
- R_3 – Risco de perda de património cultural;
- R_4 – Risco de perda económica.

As componentes do risco que devem ser avaliadas relacionadas com um serviço público são:

- R'_1 – Risco de perda de vidas humanas;
- R'_2 – Risco de perda de serviços públicos;
- R'_3 – Risco de perda económica.

O valor de R é a soma das suas componentes, as quais devem ser agrupadas de acordo com a fonte e o tipo de danos.

É responsabilidade da competente autoridade nacional de cada país definir o valor do risco aceitável R_T com o qual deve ser comparado o valor calculado de R.

A Tabela 5.1 sugere valores para R_T que poderão ser utilizados na falta de valores oficiais, como é o caso de Portugal.

Tabela 5.1
Valores típicos para R_T

Tipo de Perda	R_T
L1 – Perda de vida humana	10^{-5}
L2 – Perda de serviços públicos	10^{-3}
L3 – Perda de património cultural	10^{-3}

O procedimento para avaliar sobre a necessidade de instalar medidas de protecção extraordinárias deve seguir os seguintes passos:

- Identificar as componentes de risco R_i que compõem o risco R ;
- Calcular o valor de cada uma das componentes R_i ;
- Calcular o valor do risco global R ;
- Identificar o valor do risco aceitável R_T ;
- Comparar o risco R com R_T .

Se $R \leq R_T$, não serão necessárias medidas de protecção extraordinárias. Se $R > R_T$, devem ser instaladas medidas de protecção de modo a reduzir o valor de R até que $R \leq R_T$ para todas as componentes de risco consideradas.

A descrição detalhada do método para o cálculo do risco de danos devido às DEA nuvem-solo, encontra-se descrita em [6] e foi abordada em [1], [81] e [82].

Por se entender ser desnecessária não se fez a sua transcrição completa para a presente tese, tendo-se optado por descrever resumidamente o seu princípio de funcionamento.

Este método será novamente abordado durante a exposição dos casos de estudo.

5.3 Modelo Electrogeométrico e RSM

A experiência mostra que, quando ocorre uma DEA sobre uma linha, o sistema nuvem-terra comporta-se como uma fonte de corrente de grande impedância interna. Nas linhas aéreas o sistema constituído por um condutor de fase e a terra tem uma impedância de onda Z_0 dada por:

$$Z_0 = 60 \ln\left(\frac{2h}{r}\right) \quad (5.3)$$

onde:

h é a altura a que se encontra o condutor do solo,

r é o raio do condutor.

Quando uma DEA com corrente de pico i_m atinge um condutor de fase, propaga-se para cada lado da linha uma onda de tensão com um valor de pico igual a:

$$u_m = Z_0 \frac{i_m}{2} \quad (5.4)$$

Se a tensão u_m for superior à tensão de contornamento à onda de choque u_{ci} da cadeia de isoladores, esta será contornada iniciando-se um processo que provavelmente levará à interrupção de serviço. A linha ficará protegida se for possível garantir que nenhuma DEA com corrente de pico superior à da expressão (5.5) atinge qualquer condutor de fase

$$i_m = \frac{2 u_{ci}}{Z_0} \quad (5.5)$$

Sabe-se que um condutor ligado à terra e colocado ao longo da linha de transmissão a uma altura superior à dos condutores activos pode reduzir a probabilidade destes serem atingidos directamente por DEA.

No entanto, durante muito tempo os registos dos incidentes da exploração destas linhas não confirmavam de modo satisfatório as sucessivas teorias que procuravam explicar o efeito protector do cabo de guarda.

Os estudos de Armstrong, Golde e de Whitehead nos anos 50 mostraram a existência de uma dependência entre o comprimento do "salto final" d e o valor de pico da intensidade da corrente injectada pela DEA.

A expressão (5.6) foi proposta por Whitehead et. al.:

$$d = 6,7 i_m^{0,8} \quad (5.6)$$

onde:

i_m se expressa em kA

d em m.

O modelo electrogeométrico diz-nos que imediatamente antes do "salto final" apenas as distâncias ao solo, ao condutor de fase e ao cabo de guarda são determinantes para identificar o ponto de impacto da DEA. A cada condutor associa-se uma zona de atracção cuja extensão depende de i_m . A DEA atingirá um ou outro condutor ou o solo conforme a zona de atracção na qual entre primeiro. Toda esta descrição justifica a construção geométrica apresentada na Fig. 5.5 que se aplica a cada condutor F a proteger.

O limite entre as zonas de atracção do condutor de fase e o solo é definido pelo arco de parábola Bc a igual distância do condutor F e do solo. Se o valor da tensão que provoca o contornamento da cadeia de isoladores for u'_{ci} , o valor limite da corrente de pico da DEA será então i'_m nas condições de (5.5).

A representação cartesiana da equação (5.6) permite determinar a distância d' vencida pelo salto final quando o valor da corrente de pico da DEA for i'_m . Definido d' marca-se o ponto E sobre a parábola Bc. Com centro em E traça-se o arco de circunferência mn que passa por F. A colocação do cabo de guarda C é feita por tentativa e erro em qualquer ponto sobre mn e acima de F. Com centro em C traça-se o arco de circunferência rs que passa por E.

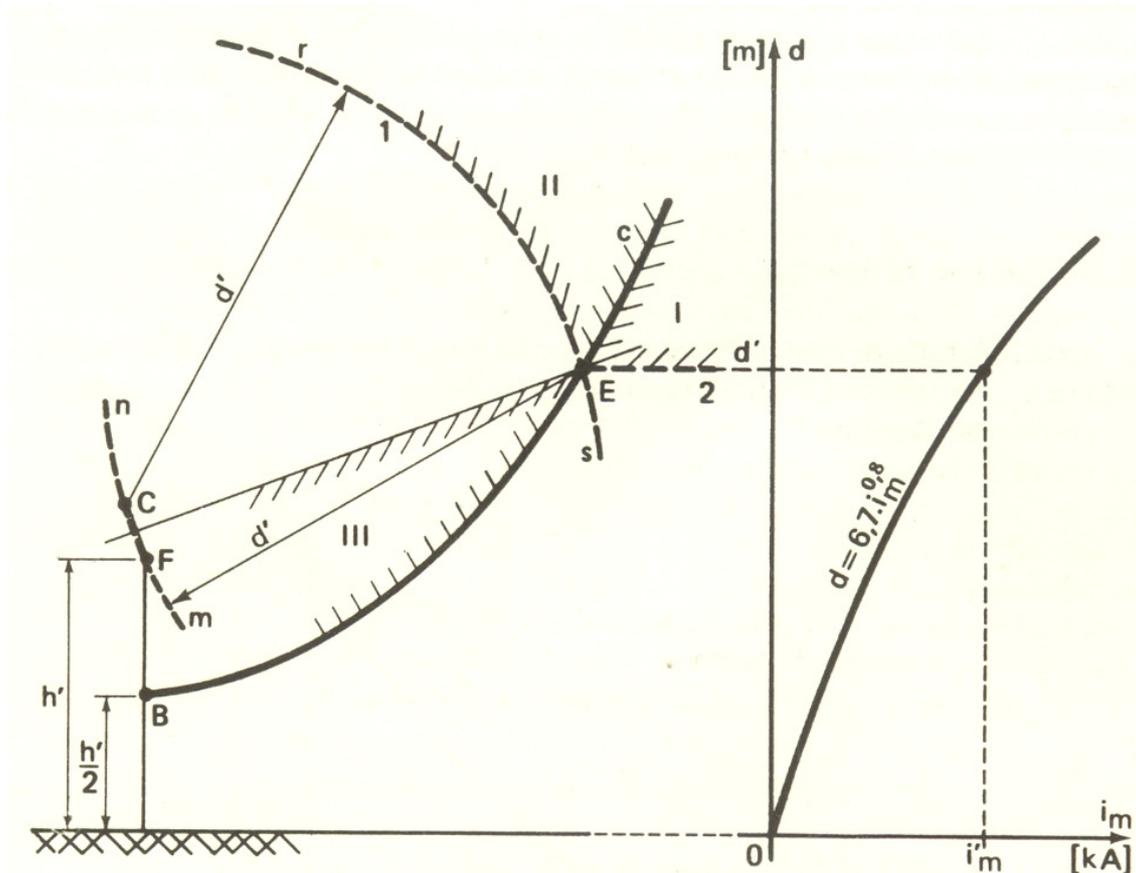


Fig. 5.5 – Aplicação do modelo electrogeométrico à protecção de um condutor de fase de uma linha aérea [83]

Se $i_m > i'_m$ o "salto final" terá início acima da linha 1E2 e duas situações podem ocorrer: entra na zona I e atinge o solo; ou entra na zona II e atinge o cabo de guarda. Se $i_m < i'_m$ o "salto final" terá início abaixo de linha 1E2 e duas situações podem ocorrer: entra na zona I e atinge o solo; ou entra na zona III e atinge o condutor de fase, mas neste caso não causará o contornamento da cadeia de isoladores porque $i_m < i'_m$, e nestas circunstâncias o valor de u'_{ci} não será ultrapassado.

Este modelo foi posteriormente desenvolvido por Mousa que em 1976 alargou o seu âmbito às subestações. Em 1977, Lee, baseado no modelo electrogeométrico desenvolveu o RSM. Outros tal como Szedenik [84] têm vindo, mais recentemente, a efectuar análises críticas ao RSM.

No RSM a corrente de pico da DEA está relacionada com o raio de uma esfera fictícia que posta a rolar sobre uma estrutura qualquer define quais os pontos que se encontram protegidos e quais se encontram vulneráveis às DEA. Assim, todos os pontos tocados pela esfera encontram-se vulneráveis e todos aqueles em que a esfera não consegue tocar encontram-se protegidos.

Em 1992 um grupo de trabalho do IEEE (*Estimating Lightning Performance of Transmission lines II*) [85] estabeleceu a relação (5.7) para o raio da esfera:

$$R = 10 i_m^{0.65} \quad (5.7)$$

O método utilizado nesta tese para determinar os pontos vulneráveis numa estrutura é o RSM, o qual foi claramente adoptado na mais recente norma da IEC [5], [6], [7] e [78]. Os raios de 20, 30, 45 ou 60 m são escolhidos em função do nível de protecção pretendido ou aconselhável. O raio de 20 m corresponde ao nível de protecção mais elevado e é recomendado para protecção de estruturas muito grandes ou para armazéns de explosivos e produtos inflamáveis [86]. O RSM é adequado para identificar os pontos vulneráveis da estrutura a proteger [87]. Este é considerado o melhor método para se trabalhar na prática da engenharia [79]. O conhecimento dos seus pontos vulneráveis é crucial para a concepção de medidas de protecção eficazes e económicas.

5.4 Ferramenta Computacional LPS 2008

O método de análise de risco de danos devidos a DEA nuvem-solo da IEC 62305-2 necessita de um elevado número de dados e cálculos que, quando efectuados sem o auxílio de um computador, requerem muito tempo.

Muitos engenheiros e técnicos consideram o método proposto pela IEC 62305-2 pouco prático devido à muita informação necessária, à necessidade de se calcularem áreas circunscritas por formas complexas, e à necessidade de modelos 3D à escala.

Pelas razões anteriores é dispendido demasiado tempo na realização destas tarefas. A IEC, consciente deste problema, desenvolveu a folha de cálculo SIRAC para mitigar alguns dos problemas mencionados anteriormente.

O SIRAC permite aumentar a rapidez de cálculo mas não resolve os problemas do desenho e cálculo das áreas de influência e do modelo 3D da estrutura. Finalmente, o SIRAC não realiza a simulação do RSM conforme indicado na IEC 62305-2.

O programa de computador LPS 2008 foi desenvolvido especificamente para o propósito desta tese. O seu desenvolvimento beneficiou da experiência acumulada pelo autor desta tese no desenvolvimento anterior de um outro programa designado SPDA 2002 [27]. O SPDA 2002 foi baseado no relatório técnico IEC 61662, o qual não tem o carácter de norma internacional como tem a IEC 62305-2. A boa aceitação do SPDA 2002 por parte dos utilizadores, constituiu um estímulo para o desenvolvimento do novo LPS 2008, com a publicação da norma IEC 62305 em 2006.

De salientar que, no desenvolvimento do LPS 2008 houve a necessidade de criar um código completamente novo para se adaptar correctamente ao novo método da IEC 62305-2.

Foram ainda efectuadas melhorias significativas no código responsável pela simulação do RSM, com o objectivo de melhorar o seu desempenho na rapidez de execução.

A Fig. 5.6 apresenta o ecrã de boas-vindas do LPS 2008.

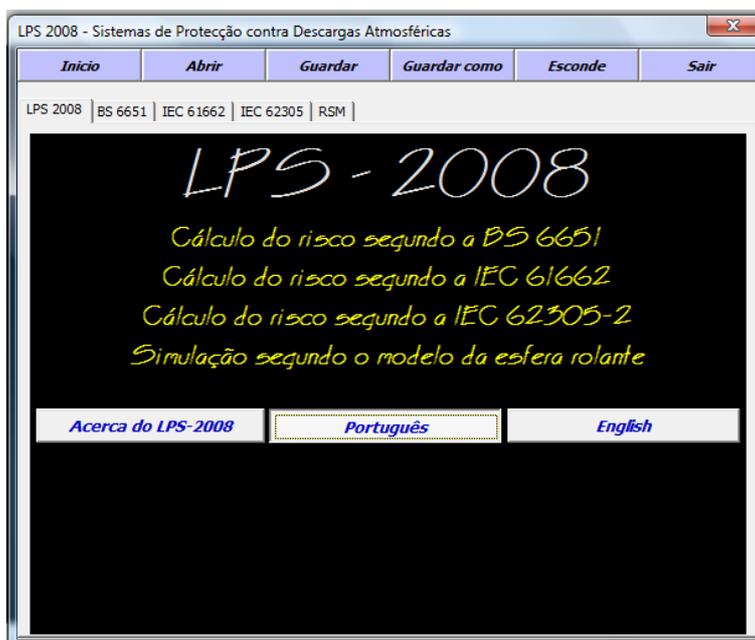


Fig. 5.6 – Ecrã de boas-vindas do LPS 2008

O LPS 2008 foi desenvolvido em Visual Basic para AutoCAD, especificamente adaptado ao método de análise de risco de danos da IEC 62305-2.

As principais características do LPS 2008 são:

- Efectua a análise de risco de danos devidos aos efeitos directos e indirectos das DEA sobre estruturas e linhas de serviços segundo a norma internacional IEC 62305-2, a qual é a única norma internacional com um método experimentado neste tipo de análise de risco.
- Efectua a análise de risco de danos segundo a norma britânica BS 66551 e o relatório técnico IEC 61662.

- Funciona sobre qualquer versão do AutoCAD e interage com o ambiente de desenho, permitindo a utilização das ferramentas de desenho e de modelação de objectos 3D, tais como edifícios, antenas de comunicações, e aerogeradores.
- Simula o RSM assinalando todos os pontos vulneráveis numa estrutura ou conjunto de estruturas para um dado nível de protecção seleccionado, de acordo com o resultado da análise de risco de danos da IEC 62305-2.

Na Fig. 5.7 pode ver-se o LPS 2008 em execução conjunta com o AutoCAD.

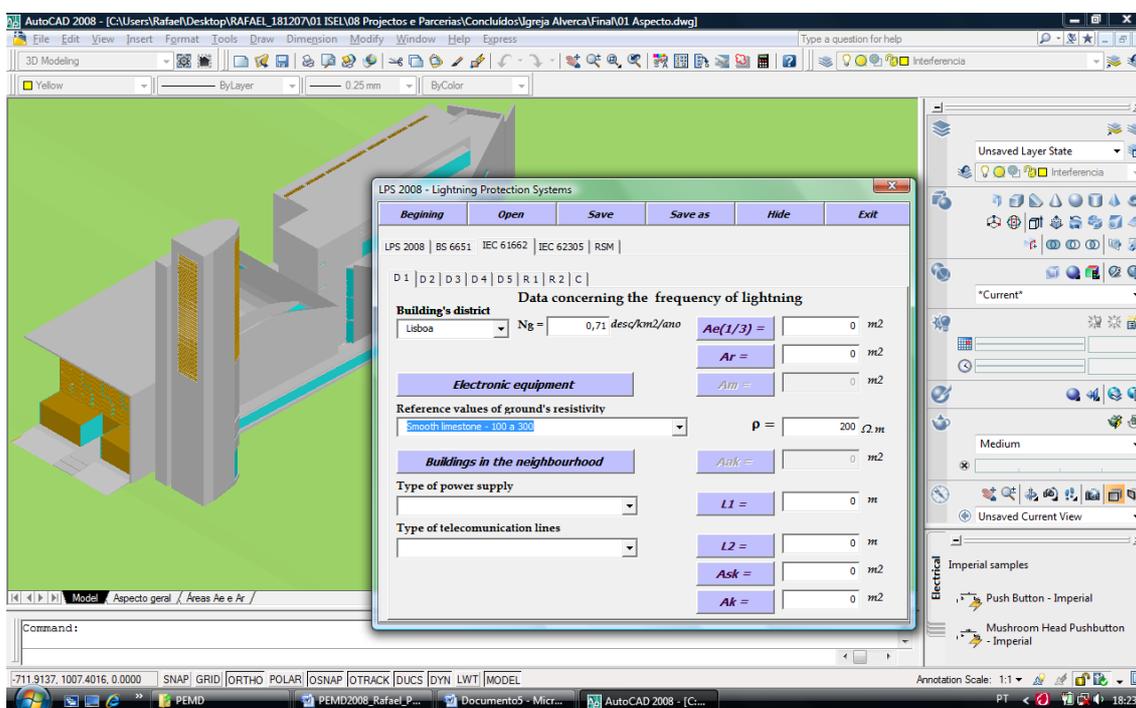


Fig. 5.7 – LPS 2008 a ser executado com o AutoCAD

O LPS 2008 extrai informação numérica de objectos desenhados no AutoCAD, tais como área, comprimento e coordenadas, simplesmente apontando para o objecto em questão com o rato.

A Tabela 5.2 apresenta os dados típicos para caracterizar uma estrutura e o meio envolvente.

Tabela 5.2
Dados típicos para caracterizar uma estrutura

Parâmetro	Símbolo
Dimensões da estrutura (m)	(L.W.Hb)
Factor de localização	C_d
Probabilidade de danos	P_B
Coeficiente da presença de blindagem	K_{S1}
Densidade de DEA	GFD

A Tabela 5.3 apresenta os dados típicos para caracterizar a instalação eléctrica da estrutura, o seu equipamento electrónico e a linha de abastecimento de energia.

Tabela 5.3
Dados típicos para caracterizar a instalação eléctrica da estrutura, o seu equipamento electrónico e a linha de abastecimento de energia

Parâmetro	Símbolo
Comprimento da linha (m)	L_c
Aérea	-
Altura (m)	-
Factor de correcção transformador MT/BT	C_t
Factor de localização	C_d
Factor ambiental	C_e
Probabilidade de danos	P_{LD}
	P_{LI}
Coeficiente da instalação dos cabos	K_{S3}
Coeficiente da tensão suportada U_w	K_{S4}
Probabilidade de falha dos SPD	P_{SPD}
Extremo “a” da linha (m)	(L·W·Ha)
Estrutura “a” factor de localização	C_{da}

A Tabela 5.4 apresenta os dados típicos para caracterizar as zonas a definir na estrutura.

Tabela 5.4

Dados típicos para caracterizar as zonas de uma estrutura

Parâmetro	Símbolo
Tipo de solo	r_a
Risco de incêndio	r
<i>Special hazard</i>	h
Protecção contra incêndios	r_f
Probabilidade de danos em pessoas	P_A
Coefficiente de equipotencialização	K_{S2}
Sistemas internos	-
Perdas por contactos indirectos e tensão de passo	L_t
Perdas por danos físicos	L_f
Perdas por falha em sistemas internos	L_o

A Fig. 5.8 representa um dos ecrãs do LPS 2008 onde se faz a introdução dos dados.

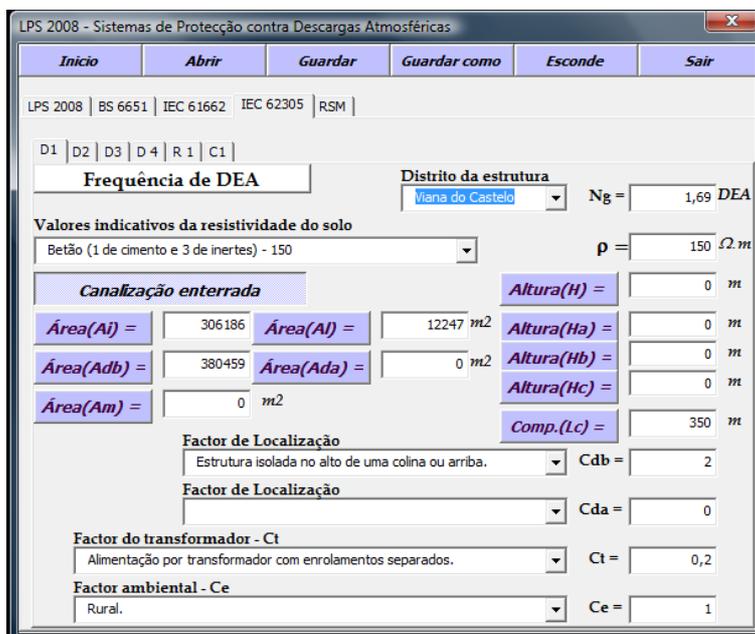


Fig. 5.8 – Um dos ecrãs de entrada de dados no LPS 2008

O fluxograma do LPS 2008 para avaliar a necessidade de instalação de medidas de protecção adicionais é apresentado na Fig. 5.9.

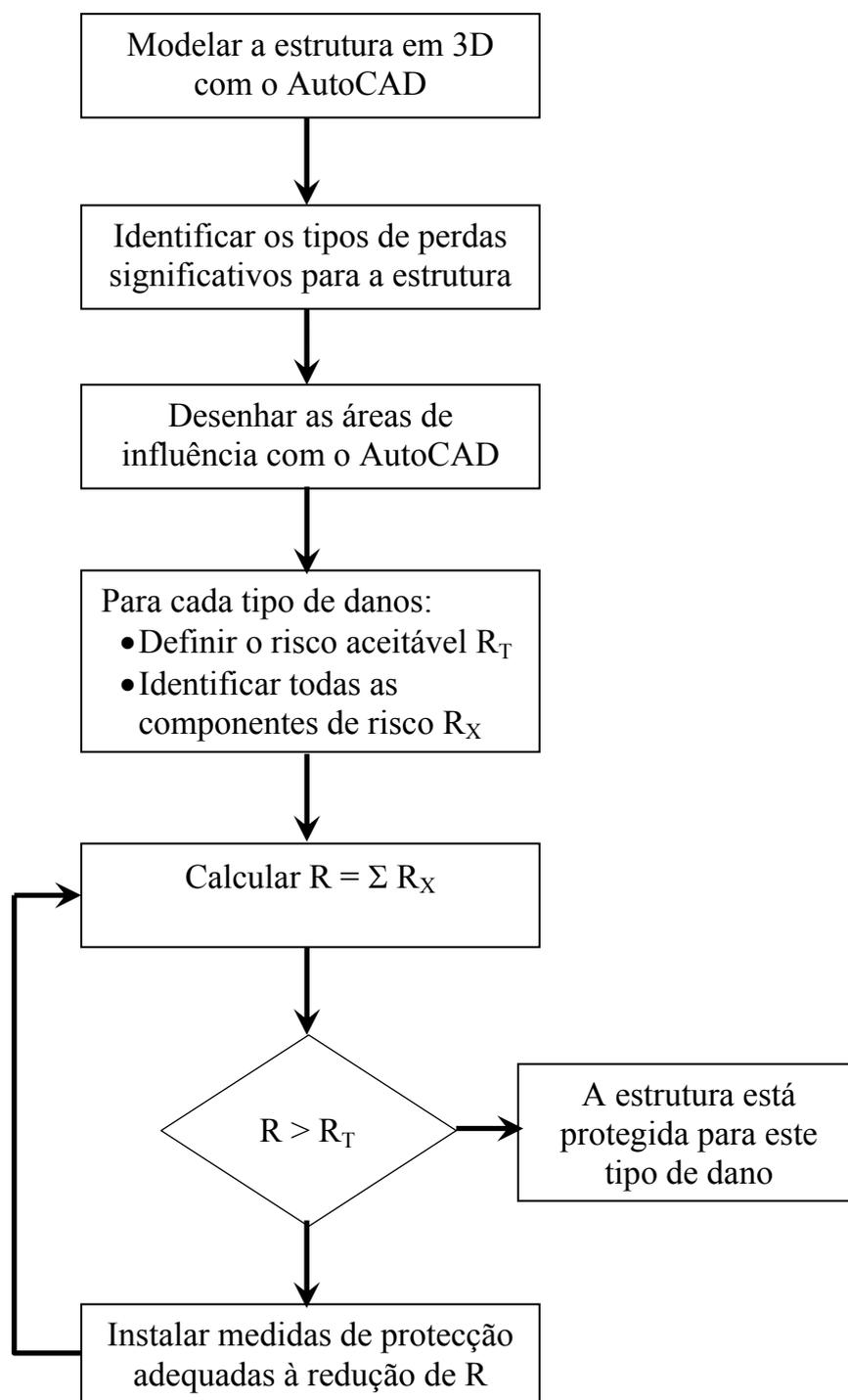


Fig. 5.9 – Fluxograma para decisão de instalação de medidas de protecção adicionais no LPS 2008

Após concluída a análise do risco de danos, o projectista conhece o nível de protecção mais adequado à estrutura em questão. O nível de protecção é então inserido no LPS 2008 e a resolução da simulação gráfica escolhida.

A Fig. 5.10 apresenta o ecrã do LPS 2008 onde se inserem os dados e dá a ordem de execução da simulação do RSM.

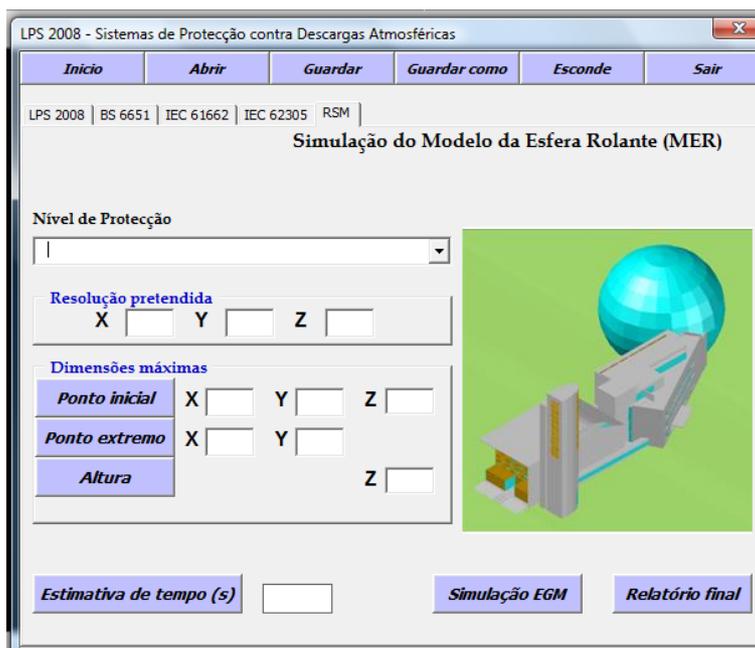


Fig. 5.10 – Ecrã para simulação do RSM no LPS 2008

Ao contrário do sugerido nos exemplos da IEC 62305-2, nos quais se reduz a complexidade arquitectónica de uma estrutura a três dimensões, o LPS 2008 é capaz de reconhecer todos os pormenores arquitectónicos do modelo.

No caso de conjuntos de edifícios ou estruturas muito complexas pode acontecer que o computador tenha dificuldade em lidar com toda a informação decorrente. Claro que este problema não é uma deficiência do LPS 2008, uma vez que é completamente dependente das capacidades do computador e da versão do AutoCAD. No entanto, o LPS 2008 também ajuda a resolver este problema ao dividir a simulação em várias porções espaciais.

Por cada porção de simulação efectuada é realizada uma gravação do ficheiro o que permite ainda libertar a memória do computador. Assim, o LPS 2008 é um programa conveniente para ser usado em computadores pessoais sem nenhuma característica especial e, teoricamente, permite a simulação de qualquer conjunto de estruturas.

5.5 Resultados e Discussão

O LPS 2008 foi desenvolvido especificamente para a protecção dos parques eólicos contra os efeitos nefastos das DEA. No entanto, é suficientemente genérico para ser aplicado a qualquer tipo de estrutura ou serviço. A análise de risco de danos efectuada a um aerogerador, modelado em 3D com o AutoCAD e com as dimensões apresentadas na Fig. 5.11, segundo o método proposto na IEC 62305-2, confirmou a necessidade da existência de captos artificiais nas pás, ligados a condutores de descida no caso de torres em betão, ou ligados à estrutura metálica da torre que funciona como captor natural.

A existência deste pára-raios aumenta a probabilidade do aerogerador ser atingido por uma DEA, embora diminua a probabilidade desta causar danos por efeito directo. Assim, exige-se a instalação de DPST para protecção do equipamento eléctrico e electrónico contra os efeitos indirectos das DEA, isto é, as sobretensões transitórias.

Os aerogeradores são um caso relativamente simples quanto à sua geometria e por isso a aplicação do RSM não nos traz muita informação relevante. De facto, se considerarmos o nível I de protecção, o raio da esfera será igual a 20 m e pelo facto do aerogerador ser basicamente um cilindro, todos os pontos acima desta cota serão pontos vulneráveis às DEA. A novidade do resultado da aplicação do RSM com o LPS 2008 será o limite ao nível do solo entre as zonas vulnerável e protegida.

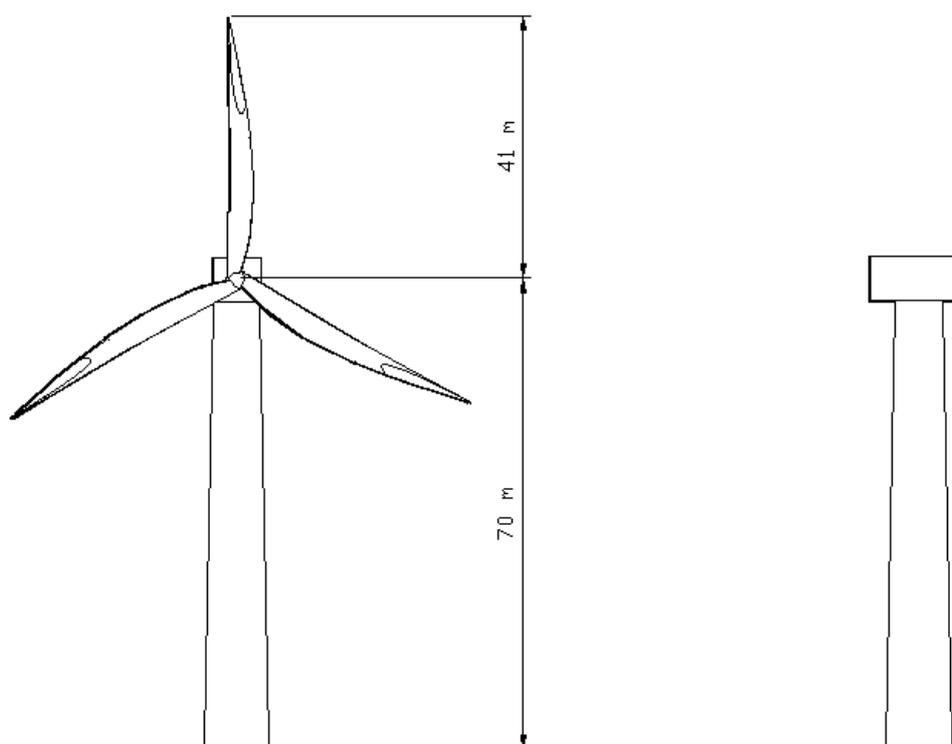


Fig. 5.11 – Aerogerador modelado em 3D no AutoCAD

A zona interior à linha irregular ao nível do solo, apresentada na Fig. 5.12, encontra-se protegida do impacto directo de DEA. A Fig. 5.12 apresenta a simulação do RSM com o LPS 2008 aplicada ao aerogerador da Fig. 5.11, para os níveis de protecção I e IV, aos quais correspondem respectivamente os valores mínimos da corrente de pico da DEA de 3 e 16 kA. No entanto, a simulação do RSM com o LPS 2008 pode ser muito mais interessante para aplicação à subestação e outros edifícios existentes no parque eólico.

A ocorrência de uma DEA nuvem-solo directa na pá do aerogerador foi também alvo de análise com o EMTP-RV. Baseado no esquema eléctrico da Fig. 4.5 foi desenvolvido um esquema equivalente para o EMTP-RV (Fig. 5.13). A descrição dos modelos utilizados foi realizada no Capítulo 4. Verifica-se que uma DEA directa dá origem a sobretensões muito mais gravosas que as DEA indirectas, da ordem das dezenas e até centenas de kV. Os resultados obtidos por simulação no EMTP-RV são apresentados na Fig. 5.14.

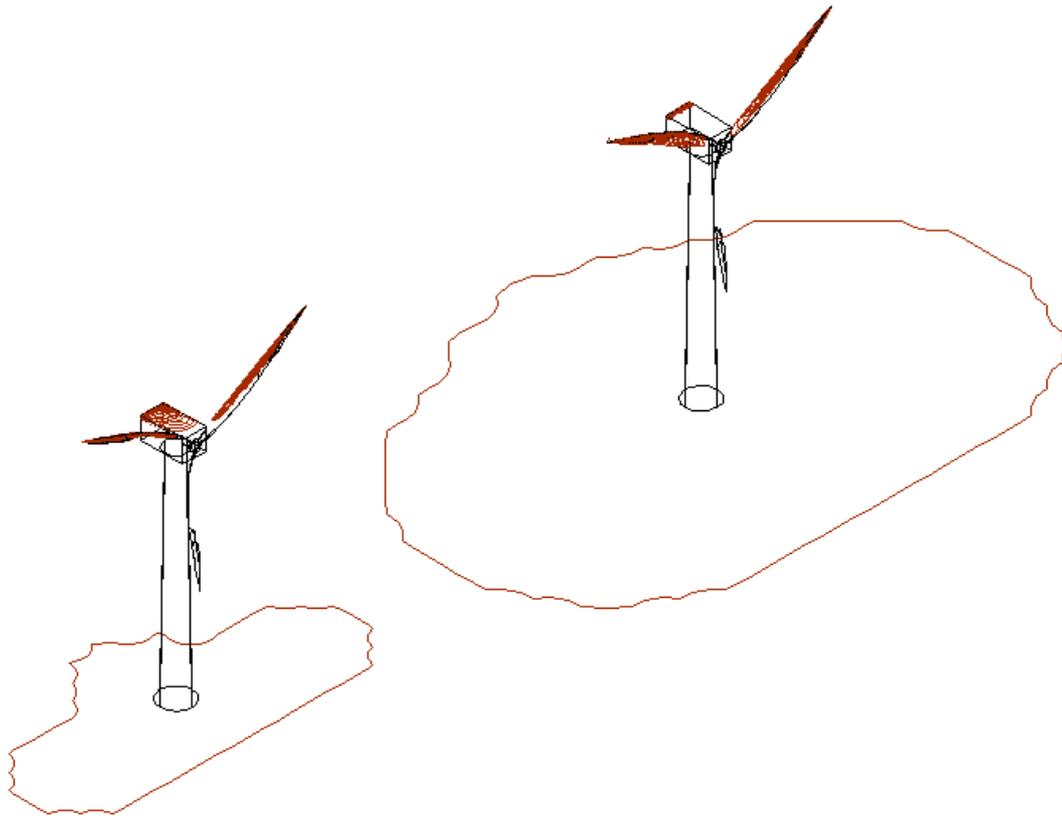


Fig. 5.12 – Resultado da simulação do RSM com o LPS 2008 ao aerogerador

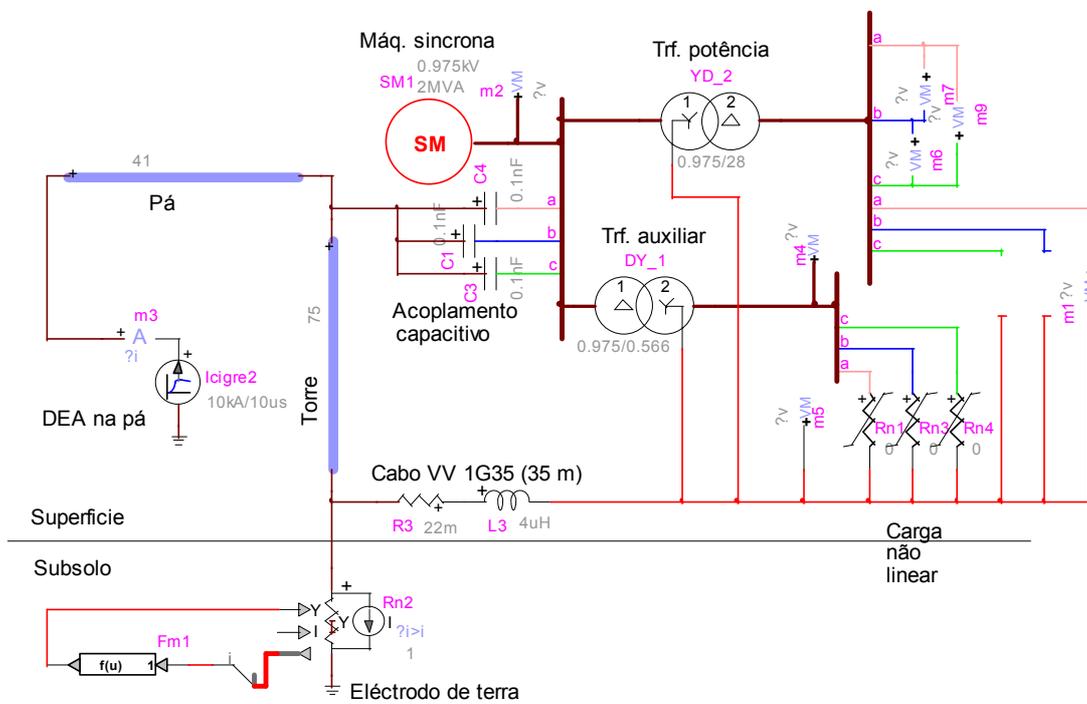


Fig. 5.13 – Esquema eléctrico equivalente em EMTP-RV da Fig.4.5 com DEA directa

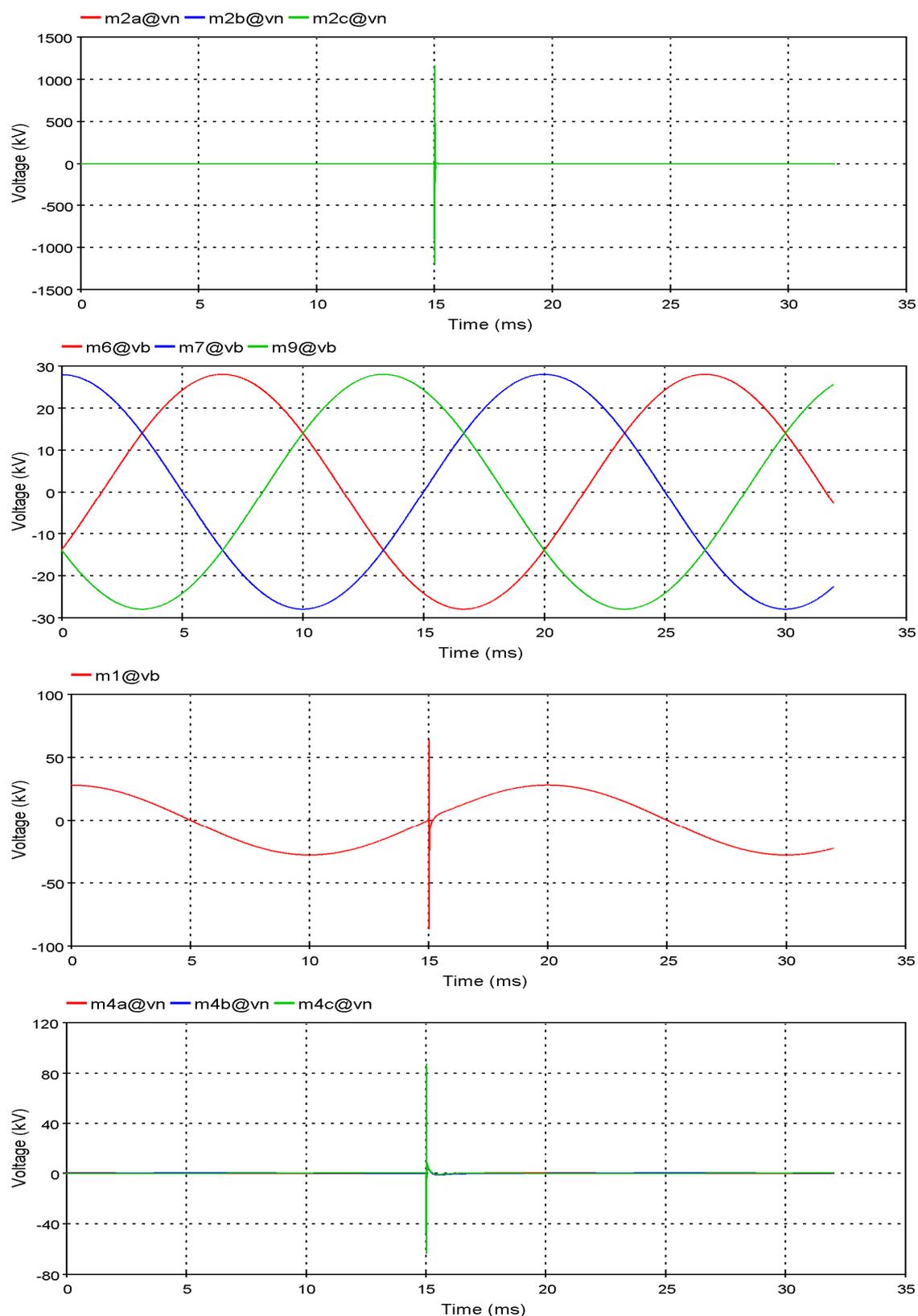


Fig. 5.14 – Formas de onda da sobretensão resultantes da simulação em EMTP-RV do esquema da Fig.5.13: a) à saída do gerador (m2); b) à saída do transformador elevador (m6, 7, 9); c) à saída do transformador elevador (m1); d) à saída do transformador auxiliar (m4)

A inserção de um DPST de 1 kV quase idealmente ligado à terra (Fig. 5.15) protege eficazmente a rede de MT, mas não consegue proteger o equipamento electrónico de comando e controlo.

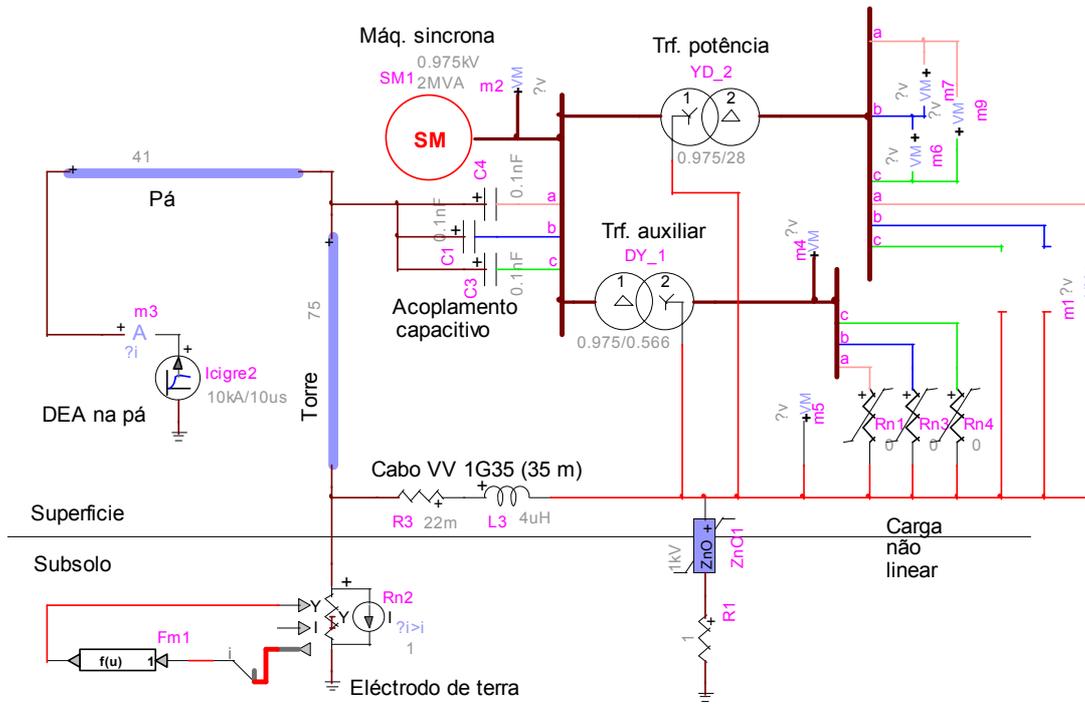


Fig. 5.15 – Esquema eléctrico equivalente em EMTP-RV da Fig.4.5 com DEA directa e com DPST quase idealmente ligado

Os resultados obtidos por simulação no EMTP-RV podem ser observados na Fig. 5.16.

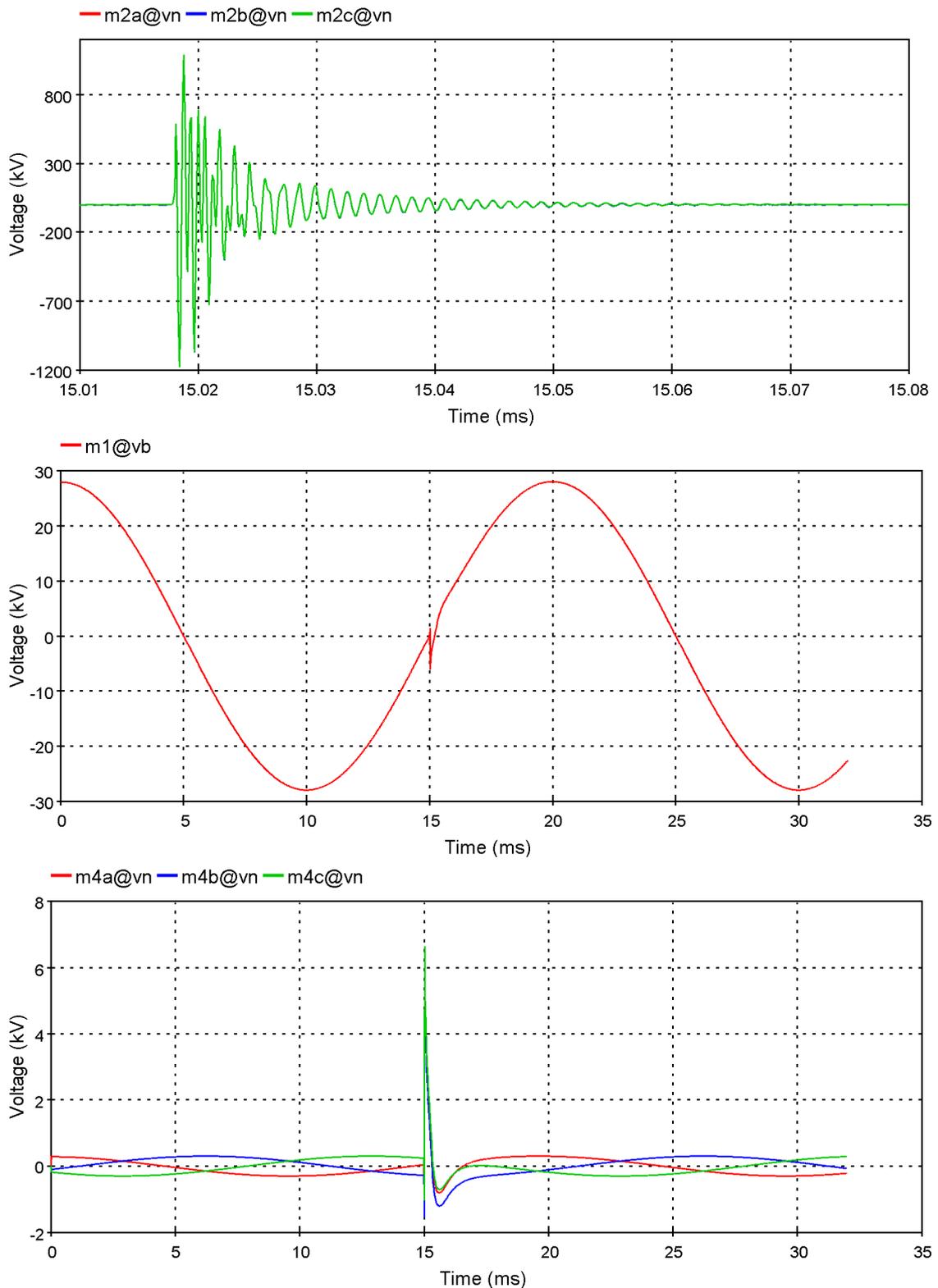


Fig. 5.16 – Formas de onda da sobretensão resultantes da simulação em EMTP-RV do esquema da Fig.5.15: a) à saída do gerador (m2); b) à saída do transformador elevador (m1); c) à saída do transformador auxiliar (m4)

A inserção de um DPST de 1 kV idealmente ligado à terra (Fig. 5.17) protege eficazmente a rede de MT e o equipamento electrónico de comando e controlo.

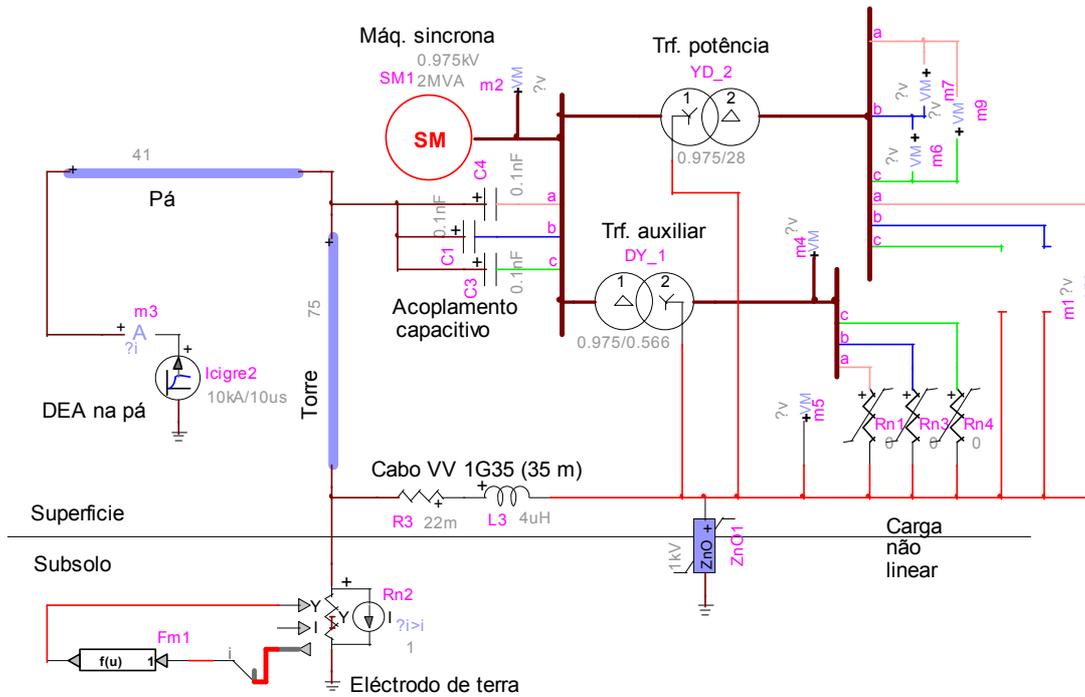


Fig. 5.17 – Esquema eléctrico equivalente em EMTP-RV da Fig.4.5 com DEA directa e com DPST idealmente ligado

Os resultados obtidos por simulação no EMTP-RV podem ser observados na Fig. 5.18.

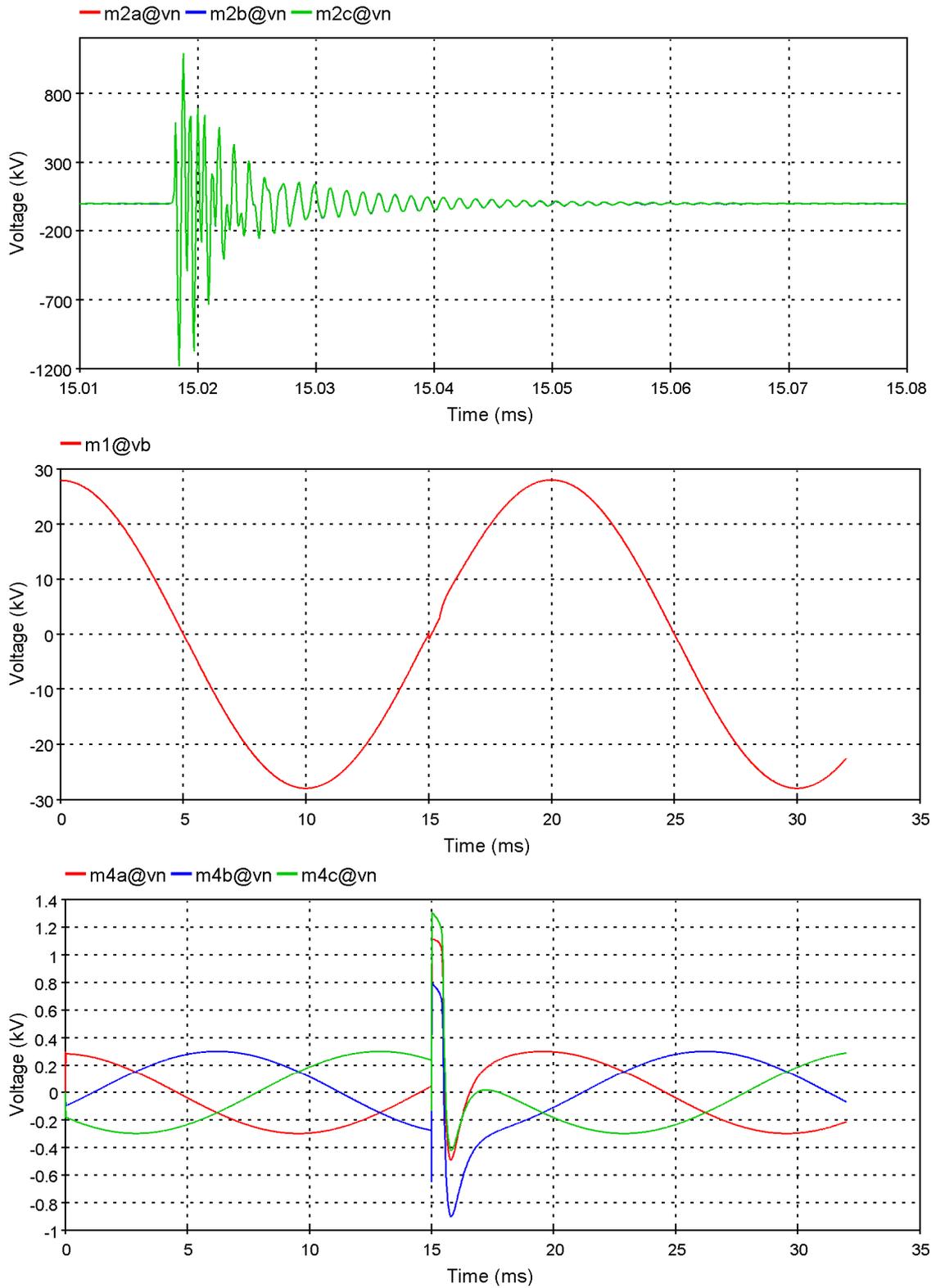


Fig. 5.18 – Formas de onda da sobretensão resultantes da simulação em EMTP-RV do esquema da Fig.14: a) à saída do gerador (m2); b) à saída do transformador elevador (m1); c) à saída do transformador auxiliar (m4)

O esquema eléctrico da Fig. 5.19 representa dois aerogeradores e a ocorrência de uma DEA nuvem-solo directa na pá de um deles. Considerando uma DEA com corrente de pico igual a 10 kA, o segundo aerogerador não fica sujeito a sobretensões perigosas. Pelas razões expostas no Capítulo 4 não são utilizados DPST nesta simulação. Os resultados podem ser observados na Fig. 5.20.

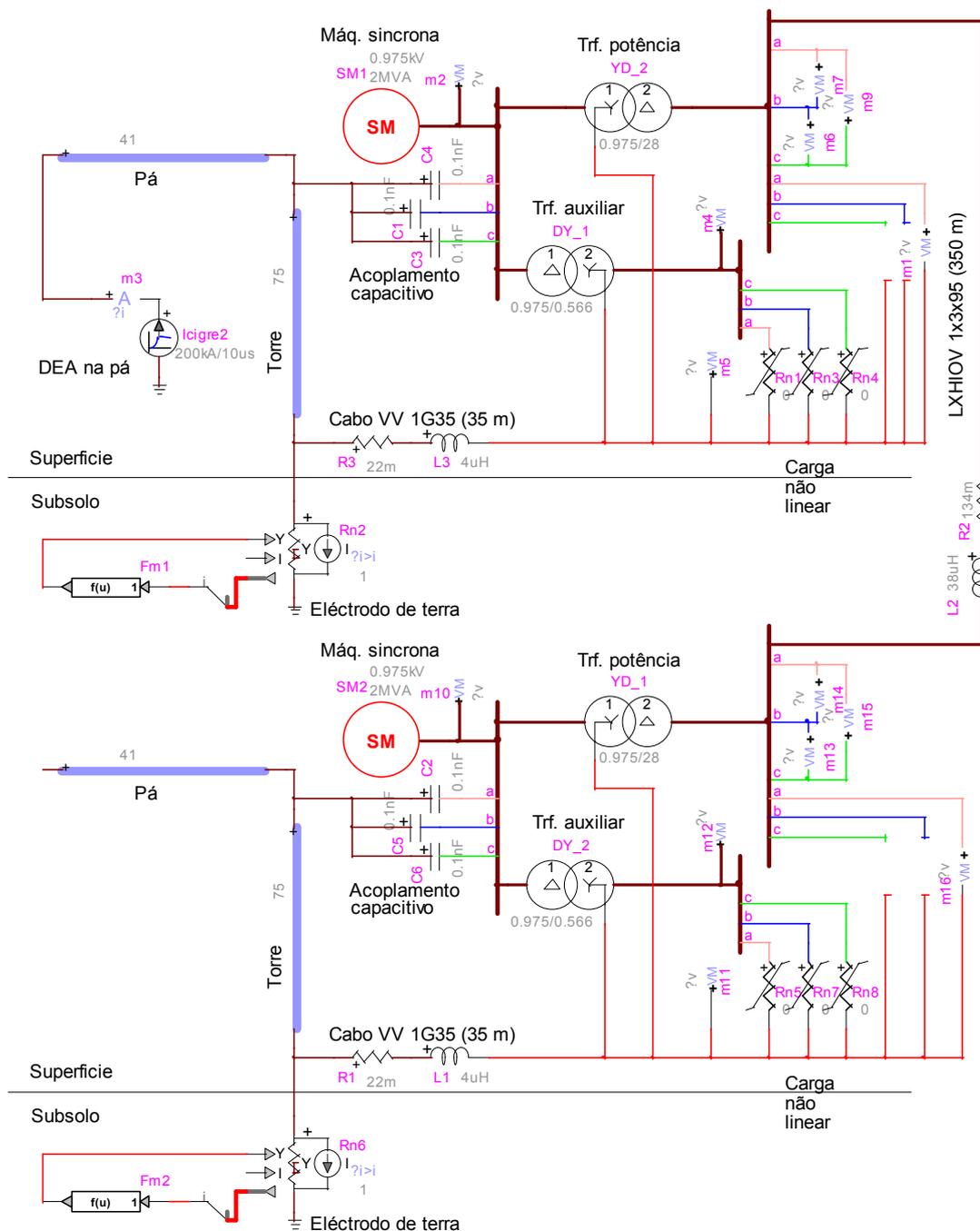


Fig. 5.19 – Esquema eléctrico equivalente em EMTP-RV da Fig.4.15 com ocorrência de uma DEA directa numa das torres

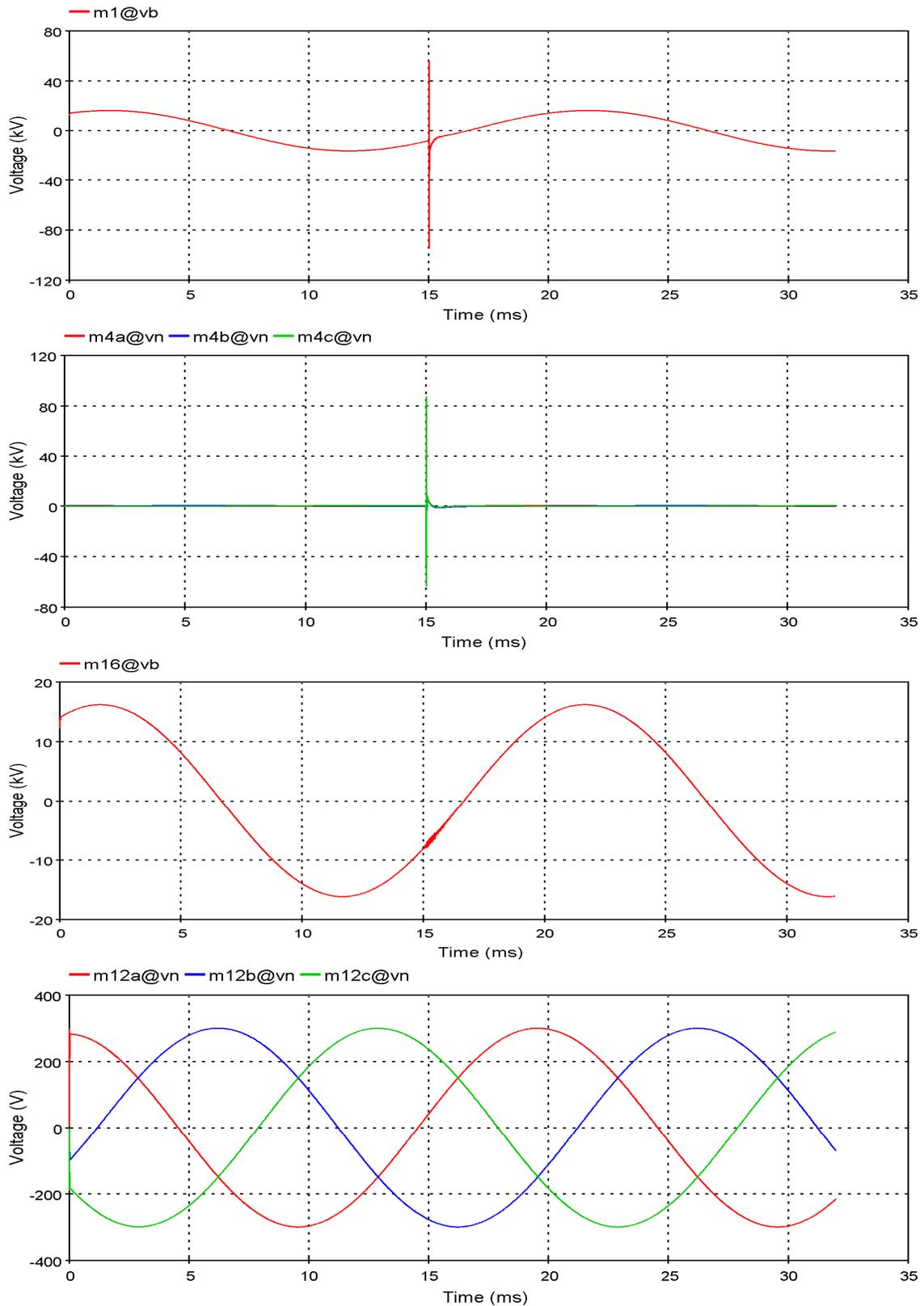


Fig. 5.20 – Formas de onda da sobretensão obtidas para esquema da Fig.5.19 com $I = 10$ kA:
 a) à saída do transformador elevador (m1); b) à saída do transformador auxiliar (m4); c) à saída do transformador elevador (m16); d) à saída do transformador auxiliar (m12)

Mesmo em presença de uma DEA com corrente de pico igual a 200 kA o segundo aerogerador não fica sujeito a sobretensões perigosas para o seu equipamento. No entanto, e como vimos no Capítulo 4, devem ser utilizados DPST, conforme representado na Fig. 5.17, para proteger o equipamento do aerogerador atingido. Os resultados podem ser observados na Fig. 5.21.

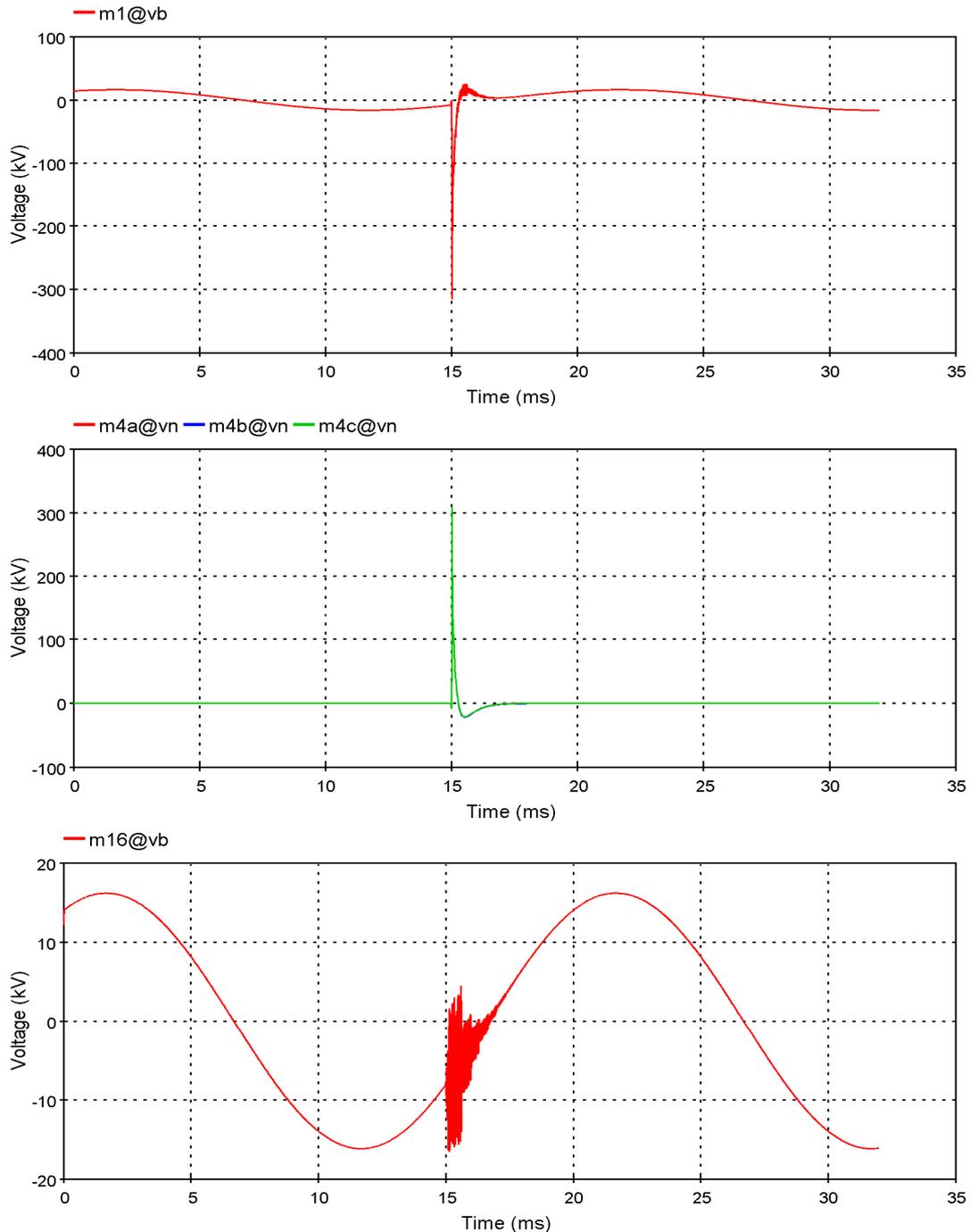


Fig. 5.21 – Formas de onda da sobretensão obtidas para esquema da Fig.5.19 com $I=200$ kA: a) à saída do transformador elevador (m1); b) à saída do transformador auxiliar (m4); c) à saída do transformador elevador (m16); d) à saída do transformador auxiliar (m12)

5.6 Conclusões

Sendo certo que é imprescindível dispor-se de um método de análise de risco de danos causados por DEA, robusto e experimentado, considerou-se e apresentou-se de forma resumida o método proposto pela série normativa IEC 62305, o qual se baseia no relatório técnico IEC 61662.

Este método considera uma vasta quantidade de elementos de informação com o objectivo de caracterizar com rigor a estrutura e as condições ambientais em que esta se insere. Ao contrário de outros métodos tais como a BS 6651, o método de análise de risco de danos mais recente da IEC não deixa o projectista em "zonas cinzentas" sobre se deve ou não efectuar a protecção. Com o método da IEC 62305, ou é necessário aplicar pára-raios, ou não é. São ainda indicadas, quando necessário, medidas de protecção complementares tais como: instalação de DPST, equipotencialização, utilização de cabos com blindagem, e implementação de um sistema de detecção de incêndios.

A análise de risco de danos causados por DEA é sem dúvida importante, mas se o resultado indicar a necessidade de instalar um pára-raios coloca-se o problema de como o projectar. O modelo indicado pela mesma norma IEC 62305 é o RSM, o qual não é muito utilizado na prática da engenharia corrente por necessitar de maquetas e bolas em escala reduzida. No entanto, o RSM tem-se revelado desde os anos 50 um modelo adequado à engenharia.

Por este ser um problema por um lado geométrico, isto é, procura-se proteger estruturas com geometria complexa e de muito difícil tradução matemática e com elevada necessidade de cálculo, nada mais natural que utilizar o computador com as suas capacidades de cálculo e de modelação 3D. Para resolver os problemas de grande quantidade de informação e cálculo, do método de análise de risco de danos da IEC 62305 e, o problema da aplicação do RSM sem maquetas e bolas à escala, foi desenvolvido o programa de computador LPS 2008.

O LPS 2008 foi desenvolvido em Visual Basic e interage com o ambiente gráfico do AutoCAD onde são criados os modelos que representam as estruturas a proteger. O LPS 2008 reduz de forma drástica o tempo dispendido pelo projectista a elaborar um projecto, fundamentado em normas internacionais, de protecção contra os efeitos directos das DEA.

De facto, tem sido grande o interesse internacional neste programa, que aparentemente não tem concorrência. Versões anteriores ao LPS 2008 têm sido usadas na leccionação em unidades curriculares de Projecto de Instalações Eléctricas no Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Ambas as situações atestam o bom desempenho deste programa agora actualizado segundo a mais recente norma IEC 62305.

Foram ainda analisados dois casos de estudo, respectivamente com um e dois aerogeradores, dotados do seu equipamento habitual, sendo um deles atingido directamente por uma DEA nuvem-solo.

Os resultados obtidos mostram que as sobretensões originadas em caso de DEA directas são substancialmente superiores àquelas que se obtêm com DEA indirectas. Mesmo considerando uma corrente de pico com 10 kA, bastante inferior ao que pode ser injectada por uma DEA, a protecção contra as DEA directas requer a existência de DPST adequados para proteger o equipamento mais sensível, nomeadamente o equipamento electrónico.

As conclusões relativamente à eficácia do DPST e a sua ligação à terra são idênticas às extraídas no Capítulo 4.

CAPÍTULO

6

Conclusão

Neste capítulo são apresentadas as contribuições originais desta tese sobre o tema da protecção de sistemas de energia eólica contra descargas eléctricas atmosféricas. Ainda, são indicadas as publicações científicas que resultaram no contexto de divulgação e validação do trabalho de investigação realizado. Por fim, são indicadas direcções para futuros desenvolvimentos.

6.1 Contribuições

A proliferação de parques eólicos em diversos países, entre eles Portugal, e a potência crescente dos geradores torna a sua importância, no âmbito do sistema de energia eléctrica, cada vez maior. A fiabilidade dos aerogeradores é agora um factor crucial a ter em conta, não só ao nível dos materiais e do equipamento utilizado, mas também ao nível do projecto e da instalação.

A orografia favorável à instalação de parques eólicos, no cimo de montes e planaltos ou em locais planos onde o vento não encontra obstáculos e apresenta uma velocidade quase constante, é também local de grande actividade cerâmica. Efectivamente, o gerador eólico é de todos os geradores eléctricos o mais vulnerável às DEA, e estas são a maior causa de danos e mau funcionamento em aerogeradores. Os efeitos indirectos das DEA podem originar sobretensões transitórias muito elevadas na instalação eléctrica, causando facilmente a destruição do equipamento eléctrico e electrónico no interior da torre por disrupção do dieléctrico. Os efeitos directos das DEA causam danos físicos nas pás, nos rolamentos do rotor, e na própria torre, podendo originar a sua queda.

O trabalho de investigação realizado sobre o tema da protecção de sistemas de energia eólica contra descargas eléctricas atmosféricas, conducente à elaboração desta tese, foi norteado pelas seguintes tarefas:

- T1 caracterizar a actividade cerâmica sobre o território continental Português, nomeadamente a distribuição espacial e temporal das DEA e a distribuição da corrente de pico do primeiro arco-de-retorno;
- T2 desenvolver um modelo matemático adequado do aerogerador para simulação com o EMTP-RV;
- T3 proceder à protecção dos aerogeradores e demais estruturas de apoio fundamentada numa análise de risco de danos rigorosa e na utilização do RSM como método para determinar os seus pontos vulneráveis às DEA.

As contribuições originais desta tese foram as seguintes:

- C1 apresentação de novos resultados referentes à caracterização da actividade cerâmica sobre o território continental Português [61];
- C2 desenvolvimento de um novo modelo de aerogerador, sujeito a simulação com o programa de computador EMTP-RV [70], [71];
- C3 desenvolvimento de um novo programa de computador, LPS 2008, capaz de efectuar a análise de risco de danos causados por DEA e de simular o RSM, de acordo com a norma internacional IEC 62305-2 [1].

Nesta tese apresentou-se um dos primeiros estudos, realizados em Portugal, com resultados publicados em revistas internacionais da especialidade, com vista à caracterização da sua actividade cerâmica.

Para o estudo da propagação das sobretensões transitórias com origem nas DEA, foi desenvolvido um novo modelo de aerogerador. De modo a sujeitar esse modelo à simulação com correntes do tipo onda de choque, a última versão do programa de computador EMTP foi utilizada, o EMTP-RV. Os resultados realçam a importância de uma concepção rigorosa da protecção contra as sobretensões transitórias.

Finalmente, foi desenvolvido em Visual Basic o LPS 2008, que permite interagir com o ambiente gráfico do AutoCAD onde são criados os modelos que representam as estruturas a proteger. O LPS 2008, em conformidade com a mais recente norma IEC 62305, permitiu resolver os problemas de grande quantidade de informação e cálculo.

6.2 Publicações

Quando se adopta um determinado tema de investigação original e cujos trabalhos têm como objectivos principais não só contribuir para o desenvolvimento científico e tecnológico da área escolhida, mas também, a obtenção de um determinado grau académico pós-graduado, como é o caso desta tese, é fundamental, à medida que as diferentes tarefas previamente planeadas vão sendo cumpridas, que os respectivos resultados sejam publicados periodicamente com a finalidade de os submeter à comunidade científica, assim como de incentivar a discussão e à troca de ideias, resultando usualmente no aperfeiçoamento daqueles resultados.

Em consequência, e de acordo com esta postura, é feita a apresentação da lista dos trabalhos publicados, a que as contribuições desta tese deram origem.

Publicações Científicas em Capítulos de Livros

- 1 R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão, "Lightning surges on wind power systems", in: *Electromagnetic Interference Issues in Power Electronics and Power Systems*, Ed. Firuz Zare, Bentham Science Publishers, 2010 (aceite para publicação).

Publicações Científicas em Revistas Internacionais

- 1 R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão, "Estimation of lightning vulnerability points on wind power plants using the rolling sphere method", *Journal of Electrostatics* (ELSEVIER), Vol. 67, No. 5, pp. 774-780, September 2009 — *Indexed by: ISI Web of Science*.

- 2 R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão, S. Correia, V. Prior, M. Aguado, "Analysis of the thunderstorm activity in Portugal for its application in the lightning protection of wind turbines", *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 7, No. 5, pp. 519-526, September 2009 — *Indexed by: ISI Web of Science*.
- 3 R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão, "Lightning data observed with lightning location system in Portugal", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010 — *ISI Journal Citation Reports* (aceite para publicação).
- 4 R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão, "Electromagnetic transients analysis of lightning overvoltages on wind power plants", *International Review of Electrical Engineering-IREE*, 2010 — *ISI Journal Citation Reports* (aceite para publicação).

Publicações Científicas em Actas de Conferências

- 1 R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão, "A case study of risk analysis due to lightning for wind power plants", in: *Proceedings of the International Conference on Renewable Energy and Power Quality — ICREPQ'08*, Santander, Spain, pp. 87-88 and CD-R, 12-14 March, 2008.
- 2 R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão, "Computer simulation for lightning and overvoltage protection of wind power plants", in: *Proceedings of the 4th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives — PEMD 2008*, York, UK, pp. 777-782, 2-4 April, 2008 — *Indexed by: Scopus*.

- 3 R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão, S. Correia, V. Prior, M. Aguado, "An investigation over the lightning location system in Portugal for wind turbine protection development", in: *Proceedings of the 2008 IEEE Power & Energy Society General Meeting — PESGM08*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, pp. 2324-2331, July 20-24, 2008 — *Indexed by: ISI Web of Science*.
- 4 R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão, "Wind turbine power electronics and electrical machines: on lightning protection simulation", in: *Proceedings of the XVIII International Conference on Electrical Machines — ICEM'08*, Vilamoura, Portugal, CD-R, September 6-9, 2008 — *Indexed by: ISI Web of Science*.
- 5 R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão, "Simulação em computador para protecção de parques eólicos contra descargas eléctricas atmosféricas", em: *Actas das Quartas Jornadas de Engenharia de Electrónica e Telecomunicações e de Computadores — JETC'08*, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, pp. 269-274, 20-21 de Novembro de 2008.
- 6 R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão, "Lightning surges on wind power systems: study of electromagnetic transients", in: *Proceedings of the 11th Spanish-Portuguese Conference on Electrical Engineering — 11CHLIE*, Zaragoza, Spain, CD-R, 1-4 July, 2009.

- 7 R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão, "Electromagnetic transients analysis on wind turbines during lightning strikes", in: *Proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Fields — ISEF 2009*, Arras, France, CD-R, 10-12 September, 2009.
- 8 R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão, "EMTP-RV analysis of lightning surges on wind turbines", in: *Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality — ICREPQ'10*, Granada, Spain, 23-25 March, 2010 (aceite para publicação).
- 9 R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão, "Electromagnetic transients due to lightning strikes on wind turbines: a case study", in: *Proceedings of the 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference — MELECON'2010*, Valletta, Malta, 26-28 April, 2010 (aceite para publicação).
- 10 R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão, "Lightning data observed with lightning location system in Portugal", in: *Proceedings of the 2010 IEEE Power & Energy Society General Meeting — PESGM10*, Minneapolis, Minnesota, USA, July 25-29, 2010 (aceite para publicação).

6.3 Direcções de Investigação

É possível estabelecer um conjunto de direcções de investigação, quer no âmbito desta tese, visto que, a mesma não esgota os assuntos nela abordados, quer no que concerne a novas perspectivas, que a própria tese deixa antever, para futura investigação.

Assim, salientam-se as seguintes direcções de investigação:

- D1 No âmbito da caracterização da actividade ceráunica do território continental Português, seria interessante continuar o seu estudo pelo menos até completar onze anos de registos, período de tempo que corresponde ao ciclo solar e que muitos meteorologistas acreditam ter um papel fundamental no clima terrestre, bem como nas DEA.
- D2 No âmbito da protecção dos parques eólicos contra as sobretensões transitórias causadas por DEA, aperfeiçoar os modelos existentes para as redes eléctricas e subestações MT/AT.
- D3 No âmbito da protecção dos parques eólicos contra os efeitos directos das DEA, desenvolver uma nova versão do LPS 2008 na qual se incluiria o método da análise do risco de danos causados por sobretensões de origem atmosférica em cabos de telecomunicações com condutores metálicos ou cabos de fibra óptica com elementos metálicos.

Referências Bibliográficas

- [1] R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão, "Estimation of lightning vulnerability points on wind power plants using the rolling sphere method", *Journal of Electrostatics*, Vol. 67, No. 5, pp. 774-780, September 2009.
- [2] T. Sorensen, F.V. Jensen, N. Raben, J. Lykkegaard, J. Saxov, "Lightning protection for offshore wind turbines", in: *Proceedings of the 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, Amsterdam, Netherlands, June 18-21, 2001.
- [3] Y. Yasuda, N. Uno, H. Kobayashi, T. Funabashi, "Surge analysis on wind farm when winter lightning strikes", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 23, No. 1, pp. 257-262, March 2008.
- [4] A. Kern, F. Krichel, "Considerations about the lightning protection system of mains independent renewable energy hybrid-systems: practical experiences", *Journal of Electrostatics*, Vol. 60, No. 2-4, pp. 257-263, March 2004.
- [5] IEC, "Protection of structures against lightning—Part 1: General principles", 62305-1, 2006.
- [6] IEC, "Protection of structures against lightning—Part 2: Risk management", 62305-2, 2006.
- [7] IEC, "Protection of structures against lightning—Part 3: Physical damage and life hazard", 62305-3, 2006.
- [8] P. Gruet, "Etude des Paratonnerres a dispositif d'amorçage: Ministere de l'aménagement du territoire et de l'environnement", Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, October 2001.

- [9] M. Aguado, "Determinación de los parámetros del rayo en Navarra para su aplicación en los sistemas eléctricos de potencia y su correlación con las características del terreno", Tese Doutoral, Universidade Pública de Navarra, Setembro 2000.
- [10] P. Lalande, "Etude des Conditions de Foudroiement d'une Structure au Sol", Tese Doutoral, Universidade de Paris Sur, Setembro 1998.
- [11] R.J. Blakeslee, H.J. Christian, B. Vonnegut, "Electrical measurements over thunderstorms", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, No. D11, pp. 3135-3140, September 1989.
- [12] P.R. Krehbiel, "The electrical structure of thunderstorms, in the Earth's electrical environment", in: *National Academy Press*, Washington, USA, pp. 90-113, 1986.
- [13] X. Liu, P.R. Krehbiel, "The initial streamer of intracloud lightning flashes", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 90, No. ND4, pp. 6211-6218, 1985.
- [14] X.M. Shao, P.R. Krehbiel, "The spatial and temporal development of intracloud lightning", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, No. D21, pp. 26641-26668, November 1996.
- [15] C.D. Weidman, E.P. Krider, "The radiation field wave forms produced by intracloud lightning discharge processes", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, No. NC6, pp. 3159-3164, 1979.
- [16] J.R. Bils, E.M. Thomson, M.A. Uman, D. MacKerras, "Electric field pulses in close lightning cloud flashes", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 93, No. D12, pp. 15933-15940, December 1988.

- [17] Y. Villanueva, V.A. Rakov, M.A. Uman, M. Brook, "Microsecond-scale electric field pulses in cloud lightning discharges", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, No. D7, pp. 14353-14360, July 1994.
- [18] K.L. Cummins, M.J. Murphy, J.V. Tuel, "Lightning detection methods and meteorological applications", in: *IV International Symposium on Military Meteorology*, Malbork, Poland, September 25-28, 2000.
- [19] D.J. Malan, "Physics of Lightning", *The English Universities Press*, London, 1963.
- [20] E.T. Pierce, "Atmospherics and radio noise", *Lightning: Physics of Lightning*, pp. 351-384, 1977.
- [21] M.J. Murphy, K.L. Cummins, "2-D and 3-D cloud discharge detection", in: *Proceedings of the 1998 International Lightning Detection Conference*, Tucson, Arizona, USA, 1998.
- [22] D.A. Smith, X.M. Shao, D.N. Holden, C.T. Rhodes, M. Brook, P.R. Krehbiel, M. Stanley, W. Rison, R.J. Thomas, "A distinct class of isolated intracloud lightning discharges and their associated radio emissions", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, No. D4, pp. 4189-4212, February 1999.
- [23] D.E. Proctor, "A hyperbolic system for obtaining VHF radio pictures of lightning", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 76, No. 6, pp. 1478, 1971.
- [24] V.A. Rakov, M.A. Uman, "Lightning: Physics and Effects", *Cambridge University Press*, 2007.

- [25] E. Sunde, "Earth conduction effects in transmission systems", *Dover Publications*, New York, 1968.
- [26] CIGRE Guide n.º 63, "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines" Working Group on lightning, Paris, France, October 1991.
- [27] R.B. Rodrigues, "Protecção de instalações eléctricas de baixa tensão contra sobretensões causadas por descargas atmosféricas", Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Dezembro 2004.
- [28] R.B. Andersen, A.J. Eriksson, "Lightning parameters for engineering applications", *Electra*, No. 69, pp 65-102. March 1990.
- [29] H. Norinder, "Long distance location of thunderstorms", in: *Thunderstorm Electricity*, University of Chicago Press, 1953.
- [30] R.A. Watson-Watt, J. F. Herd, "An instantaneous direct-reading radio goniometer", *Journal of Institution Electrical Engineers*, Vol. 64, pp. 611-622, 1926.
- [31] R.A. Watson-Watt, J.F. Herd, L.H. Bainbridge-Bell, "Applications of the Cathode Ray Oscillograph in Radio Research", London, U.K., 1933.
- [32] E.P. Krider, R.C. Noggle, M.A. Uman, "A gated wideband magnetic direction-finder for lightning return strokes", *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 15, No. 3, pp. 301-306, 1976.

- [33] E.P. Krider, R.C. Noggle, A.E. Pifer, D.L. Vance, "Lightning direction finding systems for forest fire detection", *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 61, No. 9, pp. 980-986, 1980.
- [34] E.A. Lewis, R.B. Harvey, J.E. Rasmussen, "Hyperbolic direction finding with sferics of transatlantic origin", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 65, No. 7, pp. 1879-1905, 1960.
- [35] A.C.L. Lee, "Ground truth confirmation and theoretical limits of an experimental VLF arrival time difference lightning flash locating system", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 115, No. 489, pp. 1147-1166, July 1989.
- [36] P.W. Casper, R.B. Bent, "Results from the LPATS USA national lightning detection and tracking system for the 1991 lightning season", in: *Proceedings of the 21st International Conference on Lightning Protection*, pp. 339-342, Berlin, Germany, 1992.
- [37] R.S. Bent, W.A. Lyons, "Theoretical evaluations and initial operational experiences of LPATS (Lightning Position and Tracking System) to monitor lightning ground strikes using a time-of-arrival (TOA) technique", in: *Proceedings of the 7th International Conference on Atmospheric Electricity*, pp. 317-324, Albany, New York, 1984.
- [38] J.A. Cramer, K.L. Cummins, "Long-range and trans-oceanic lightning detection, in: *Proceedings of the 11th International Conference on Atmospheric Electricity*, pp. 376-379, June 7-11, 1999.

- [39] C.O. Hayenga, J.W. Warwick, "Two-dimensional interferometric positions of VHF lightning sources", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86, No. NC8, pp. 7451-7462, 1981.
- [40] C.T. Rhodes, X.-M. Shao, P.R. Krehbiel, R.J. Thomas, C.O. Hayenga, "Observations of lightning phenomena using radio interferometry", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, No. D6, pp. 13059-13082, June 1994.
- [41] X.M. Shao, P.R. Krehbiel, R.J. Thomas, W. Rison, "Radio interferometric observations of cloud-to-ground lightning phenomena in Florida", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, No. D2, pp. 2749-2783, February 1995.
- [42] P. Richard, A. Soulage, P. Laroche, J. Appel, "The SAFIR lightning monitoring and warning system: Application to aerospace activities", in: *Proceedings of the International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity*, pp. 383-390, Oklahoma City, 1988.
- [43] P. Richard, A. Soulage, F. Broutet, "The SAFIR lightning warning system", in: *Proceedings of the 1989 International Conference on Lightning and Static Electricity*, Bath, England, 1989.
- [44] P. Richard, "The SAFIR System: Early detection and alarm alert for risk of storms", in: *Lightning and Mountains*, Société des Electriciens et des Electroniciens, France, pp. 77-83, 1994.

- [45] P. Richard and J. Y. Lojou, Lightning and forecast of intense precipitation, in: *Lightning and Mountains*, Société des Electriciens et des Electronicien, France, pp. 338-342, 1997.
- [46] C. Lennon, L. Maier, "Lightning mapping system", in: *Proceedings of the International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity*, Cocoa Beach, Florida, 1991.
- [47] L. Maier, C. Lennon, T. Britt, S. Schaefer, "Lightning Detection and Ranging (LDAR) system performance analysis", in: *Proceedings of the 6th Conference on Aviation Weather Systems*, Dallas, Texas, 1995.
- [48] K.L. Cummins, E.P. Krider, M.D. Malone, "The US National Lightning Detection Network (TM) and applications of cloud-to-ground lightning data by electric power utilities", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 40, No. 4, pp. 465-480, November 1998.
- [49] M.I. Lees, "Lightning activity in the UK", in: *Proceedings of the IEE Half-Day Colloquium on Lightning Protection of Wind Turbines*, November 1997.
- [50] T. Shindo, S. Yokoyama, "Lightning occurrence data observed with lightning location systems in Japan: 1992–1995", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, No. 4, pp. 1468-1474, October 1998.
- [51] T. Udo, "Study of the winter lightning ground flash density investigated by the lightning location systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, No. 3, pp. 1613-1619, July 2006.

- [52] N. Herodotou, W.A. Chisholm, W. Janischewskyj, "Distribution of lightning peak stroke currents in Ontario using an LLP system", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 3, pp. 1331-1339, July 1993.
- [53] G. Diendorfer, W. Schulz, V.A. Rakov, "Lightning characteristics based on data from the Austrian lightning locating system", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 40, No. 4, pp. 452-464, November 1998.
- [54] M. Bernardi, D. Ferrari, "Evaluation of the LLS efficiency effects on the ground flash density, using the Italian lightning detection system SIRF", *Journal of Electrostatics*, Vol. 60, No. 2-4, pp. 131-140, March 2004.
- [55] S.M. Chen, Y. Du, L.M. Fan, H.M. He, D.Z. Zhong, "A lightning location system in China: Its performances and applications", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 44, No. 4, pp. 555-560, November 2002.
- [56] S.M. Chen, Y. Du, L.M. Fan, "Lightning data observed with lightning location system in Guang-Dong province, China", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 3, pp. 1148-1153, July 2004.
- [57] M.H. Shwehdi, "Reliable maps of lightning thunderstorms for Saudi Arabia", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, No. 3, pp. 1571-1577, July 2006.

- [58] R.B. Rodrigues, M.T. Correia de Barros, A. Ametani, "An investigation of lightning strikes in Portugal", in: *Proceedings of the 5th International Workshop on High Voltage Engineering*, Shizuoka, Japan, 2007.
- [59] IGP – Instituto Geográfico Português. <http://www.igeo.pt>
- [60] American Digital Cartography, Inc. <http://www.adci.com>
- [61] R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão, "Lightning data observed with lightning location system in Portugal", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2010 (aceite para publicação).
- [62] R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão, S. Correia, V. Prior, M. Aguado, "An investigation over the lightning location system in Portugal for wind turbine protection development", in: *Proceedings of the 2008 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 2324-2331, Pittsburgh, PA, July 20-24, 2008.
- [63] R.E. Orville, G.R. Huffines, "Cloud-to-ground lightning in the United States: NLDN results in the first decade, 1989-98", *Monthly Weather Review*, Vol. 129, No. 5, pp. 1179-1193, May 2001.
- [64] W. Schulz, K. Cummins, G. Diendorfer, M. Dorninger, "Cloud-to-ground lightning in Austria: A 10-year study using data from a lightning location system", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, No. D9, May 2005.
- [65] IEC, "Lightning protection—Telecommunication lines—Part 2: Lines using metallic conductors", 61663-2, 2001.

- [66] F. Rachidi, J.L. Bermudez, M. Rubinstein, V.A. Rakov, "On the estimation of lightning peak currents from measured fields using lightning location systems", *Journal of Electrostatics*, Vol. 60, No. 2-4, pp. 121-129, March 2004.
- [67] A. Borghetti, C.A. Nucci, M. Paolone, "Estimation of the statistical distributions of lightning current parameters at ground level from the data recorded by instrumented towers", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 3, pp. 1400-1409, July 2004.
- [68] A. Borghetti, C.A. Nucci, M. Paolone, "Effect of tall instrumented towers on the statistical distributions of lightning current parameters and its influence on the power system lightning performance assessment", *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 13, No. 6, pp. 365-372, November-December 2003.
- [69] G. Diendorfer, W. Schulz, C. Cummins, V. Rakov, M. Bernardi, F. De La Rosa, B. Hermoso, A.M. Hussein, T. Kawamura, F. Rachidi, H. Torres, "Review of CIGRE Report Cloud-to-Ground Lightning Parameters Derived from Lightning Location Systems – The Effects of System Performance", CIGRE SC C4 2009, Kushiro Colloquium, 2009.
- [70] R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão, "Electromagnetic transients due to lightning strikes on wind turbines: a case study", in: *Proceedings of the 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference — MELECON'2010*, Valletta, Malta, pp. 1417-1422 and CD-R, 26-28 April, 2010 (aceite para publicação).

- [71] R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão, "Electromagnetic transients analysis of lightning overvoltages on wind power plants", *International Review of Electrical Engineering-IREE*, 2010 (aceite para publicação).
- [72] J. Mahseredjian, C. Dewhurst, "Using EMTP tutorials and reference", Hydro-Québec, 2003-2008.
- [73] INEGI – Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, "Parques eólicos em Portugal", Relatório técnico, Junho 2009.
- [74] M. Paolone, F. Napolitano, A. Borghetti, C.A. Nucci, M. Marzinotto, F. Fiamingo, C. Mazzetti, H. Dellago, "Models of wind-turbine main shaft bearings for the development of specific lightning protection systems", in: *Proceedings of the IEEE Power Tech 2007 Conference*, Lausanne, Switzerland, July 1-5, 2007.
- [75] B. Glushakow, "Effective lightning protection for wind turbine generators", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 22, No. 1, pp. 214-222, March 2007.
- [76] F. Rachidi, M. Rubinstein, J. Montanya, J.-L. Bermudez, R.R. Sola, G. Sola, N. Korovkin, "A review of current issues in lightning protection of new generation wind-turbine blades", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 6, pp. 2489-2496, June 2008.
- [77] IEC, "Wind turbine generator systems—Part 24: Lightning protection", TR 61400-24, 2002.

- [78] IEC, "Protection of structures against lightning—Part 4: Electrical and electronic systems within structures", 62305-4, 2006.
- [79] C. Bouquegneau, "A critical view on the lightning protection international standard", *Journal of Electrostatics*, Vol. 65, No. 5-6, pp. 395-399, May 2007.
- [80] M. Becerra, V. Cooray, Z.A. Hartono, "Identification of lightning vulnerability points on complex grounded structures", *Journal of Electrostatics*, Vol. 65, No. 9, pp. 562-570, August 2007.
- [81] R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão, "A case study of risk analysis due to lightning for wind power plants", in: *Proceedings of the International Conference on Renewable Energy and Power Quality — ICREPQ'08*, Santander, Spain, pp. 87-88, 12-14 March, 2008.
- [82] R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalão, "Computer simulation for lightning and overvoltage protection of wind power plants", in: *Proceedings of the 4th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives — PEMD 2008*, York, UK, pp. 777-782, 2-4 April, 2008.
- [83] D. Moura, "Técnicas de alta tensão", Técnica, AEIST, 1980.
- [84] N. Szedenik, "Rolling sphere – method or theory?", *Journal of Electrostatics*, Vol. 51, pp. 345-350, May 2001.

- [85] J.T. Tehead, W.A. Chisholm, J.G. Anderson, R. Clayton, H. Elahi, A.J. Eriksson, S. Grzybowski, A.R. Hileman, W. Janischewskyj, V.J. Longo, C.H. Moser, A.M. Mousa, R.E. Orville, D.E. Parrish, F.A.M. Rizk, J.R. Renowden, "IEEE working group-report estimating lightning performance of transmission-lines .2. updates to analytical models", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 3, pp. 1254-1267 , July 1993.
- [86] M. Szczerbinski, "Lightning protection with the mesh method: some models for the effectiveness analysis", *Journal of Electrostatics*, Vol. 64, No. 5, pp. 263-268, May 2006.
- [87] I.A. Metwally, F. Heidler, "Computation of collection area and probability of lightning strikes to structures using the electrogeometric model", *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 17, No. 6, pp. 582-596, November-December 2007.

Apêndice A

A.1 Caracterização da Actividade Cerâmica em Portugal Continental

Neste apêndice são apresentados os resultados relativos à caracterização da actividade cerâmica em Portugal continental, não incluídos no corpo principal da tese.

As Figs. A.1 a A.4 apresentam as DEA nuvem-solo registadas nas três regiões consideradas em valor absoluto e em valor relativo, em função da latitude, nos anos 2003 a 2006.

As Figs. A.5 a A.8 apresentam as DEA nuvem-solo nas três regiões, em valor absoluto e em valor relativo, em função da longitude nos anos 2003 a 2006.

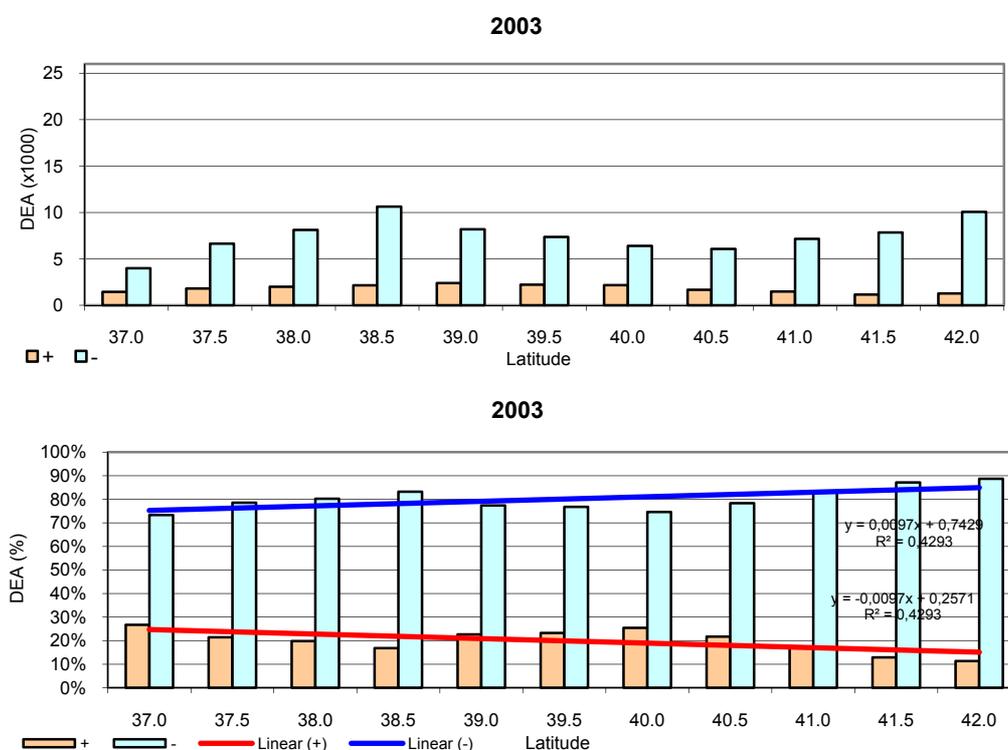


Fig. A.1 – DEA em função da latitude em 2003

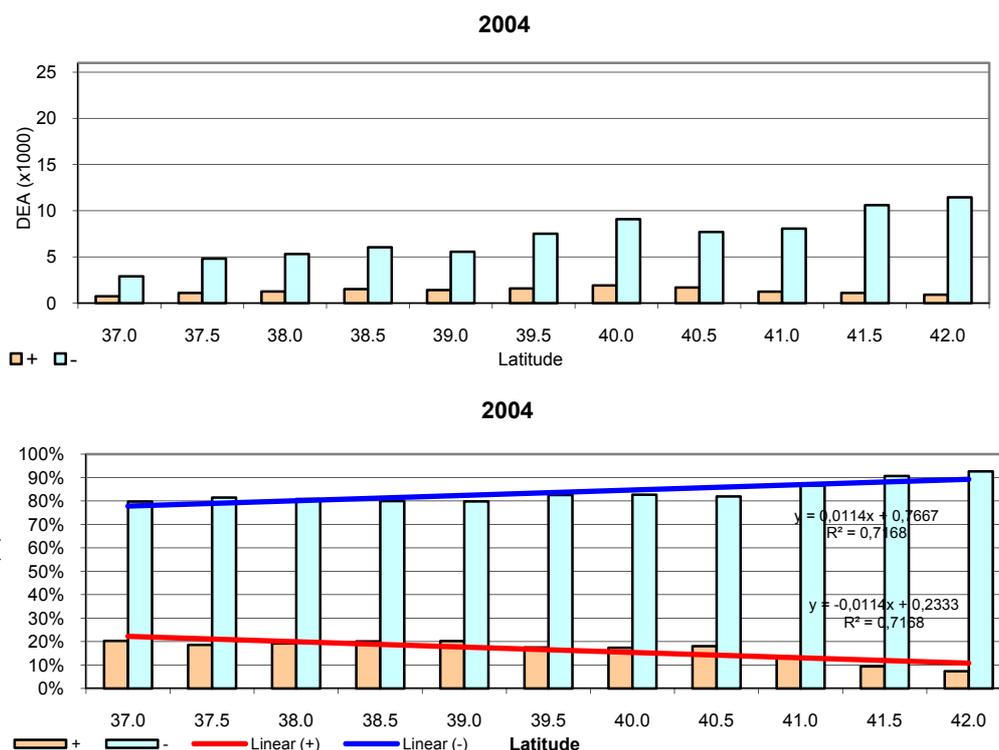


Fig. A.2 – DEA em função da latitude em 2004

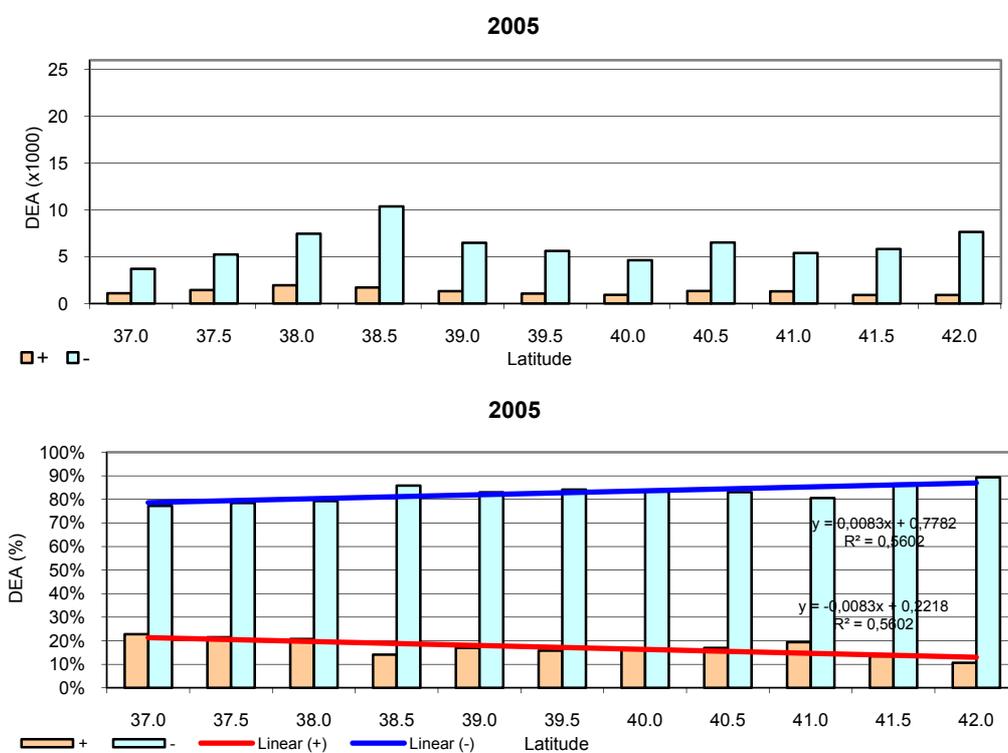


Fig. A.3 – DEA em função da latitude em 2005

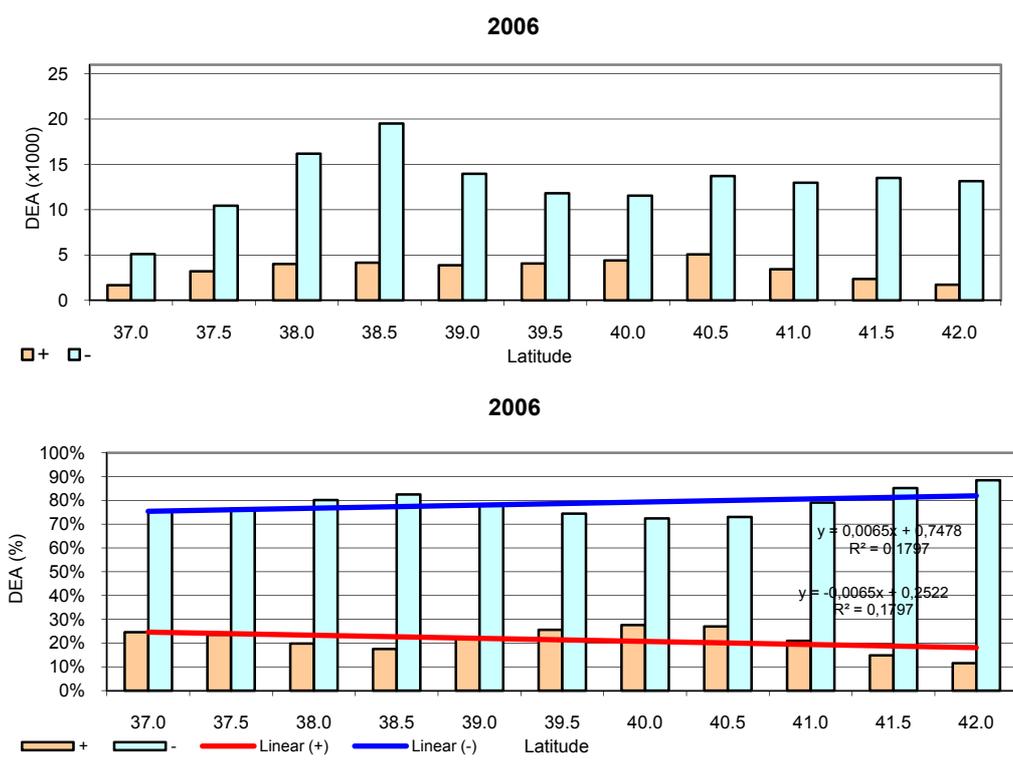


Fig. A.4 – DEA em função da latitude em 2006

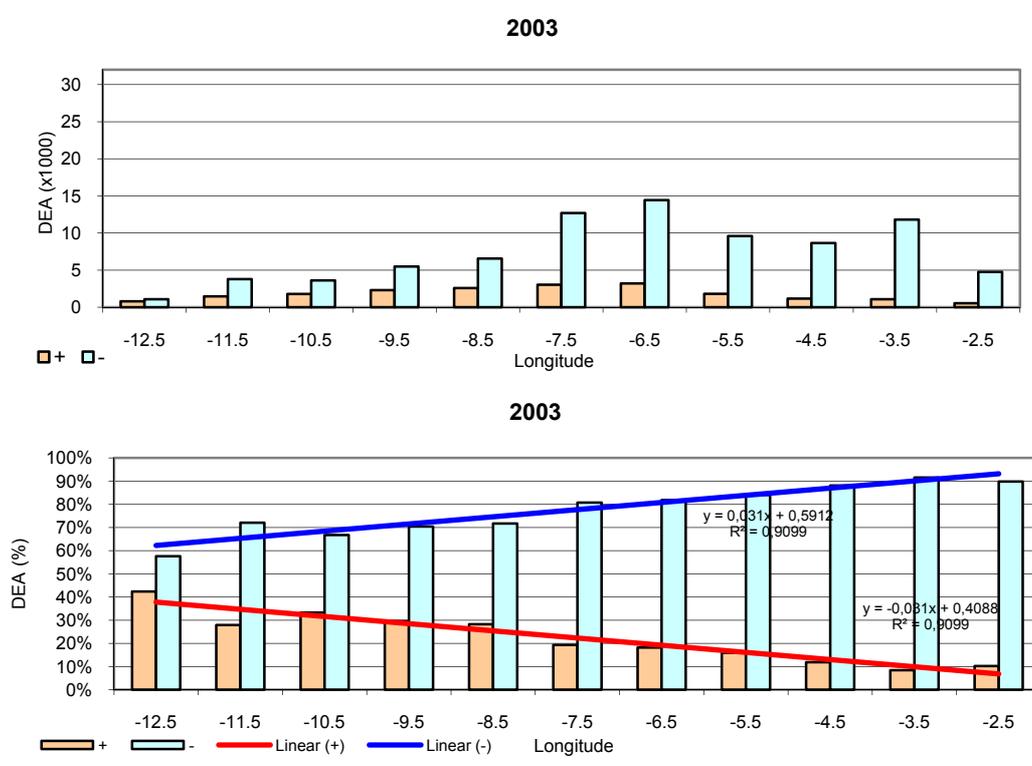


Fig. A.5 – DEA em função da longitude em 2003

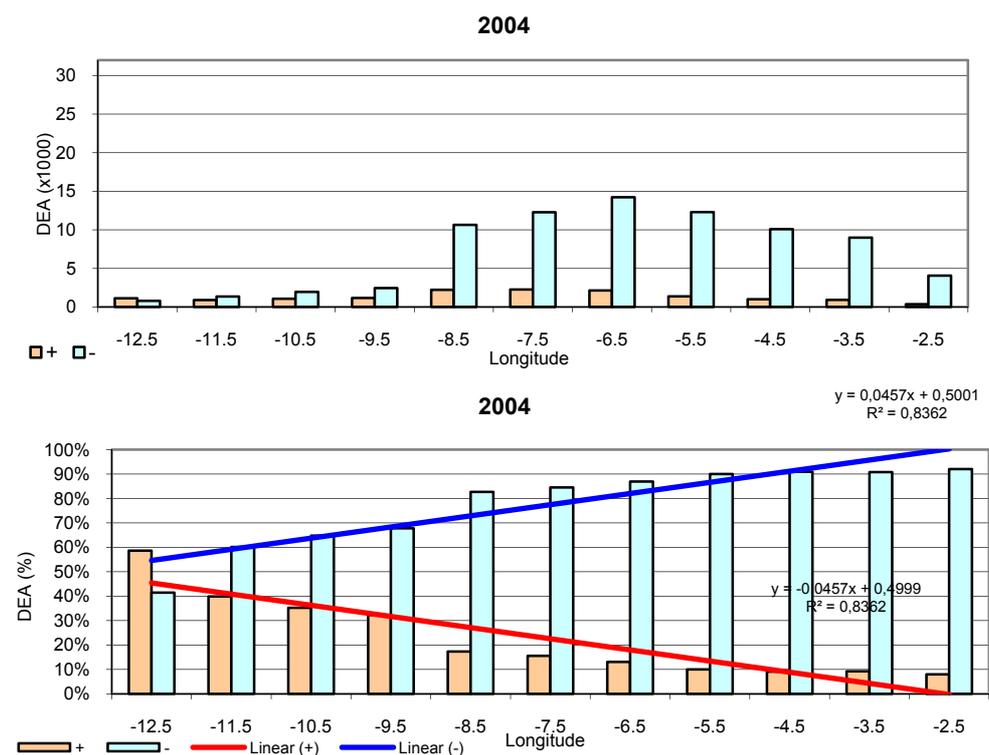


Fig. A.6 – DEA em função da longitude em 2004

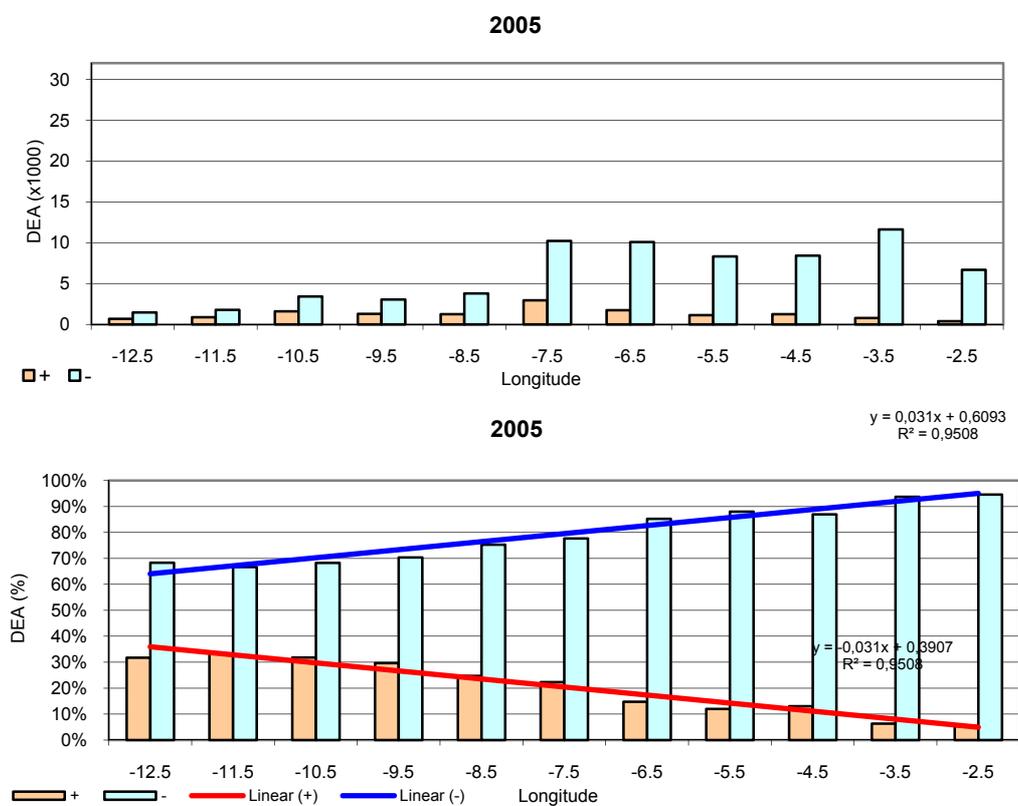


Fig. A.7 – DEA em função da longitude em 2005

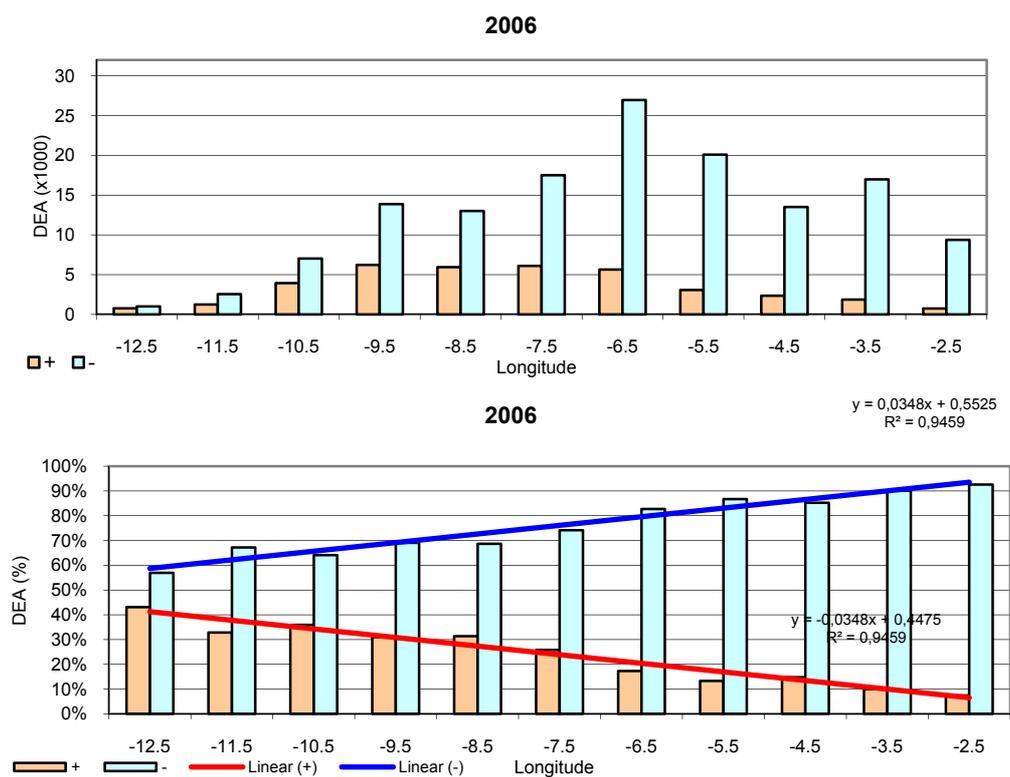


Fig. A.8 – DEA em função da longitude em 2006

As Figs. A.9 a A.13 apresentam as DEA nuvem-solo registadas na região A – Oceano Atlântico, em valor absoluto e em valor relativo, em função do mês, nos anos 2003 a 2007.

As Figs. A.14 a A.17 apresentam as DEA nuvem-solo registadas na região B – Portugal continental, em valor absoluto e em valor relativo, em função do mês, nos anos 2003 a 2006.

As Figs. A.18 a A.22 apresentam as DEA nuvem-solo registadas na região C – Espanha, em valor absoluto e em valor relativo, em função do mês, nos anos 2003 a 2007.

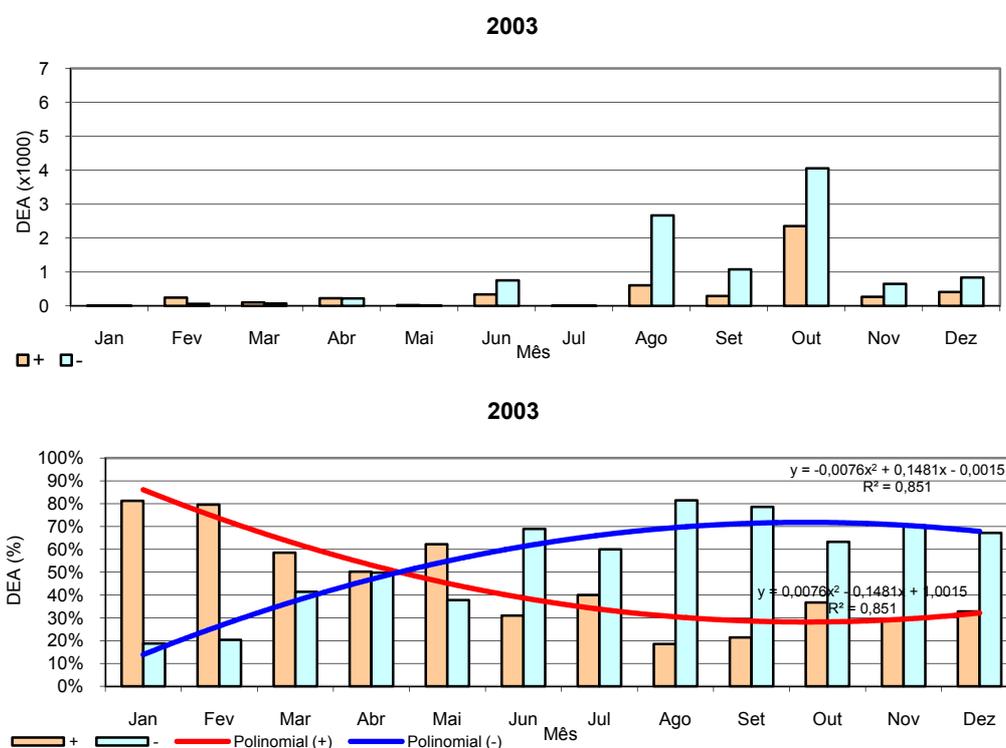


Fig. A.9 – DEA em função do mês na região A em 2003

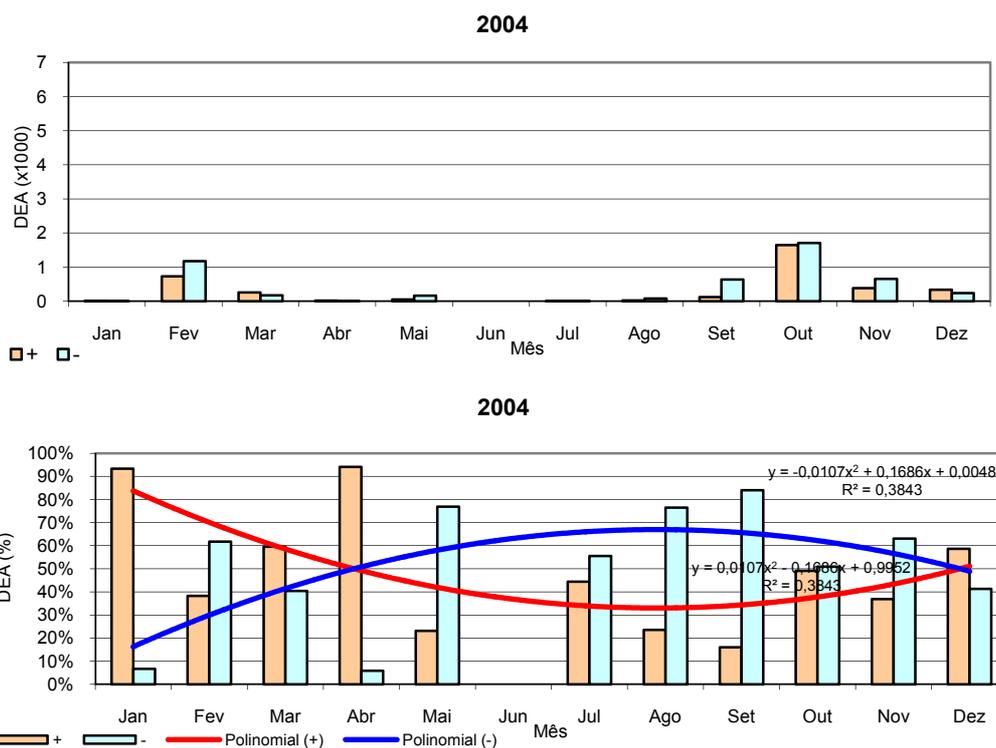


Fig. A.10 – DEA em função do mês na região A em 2004

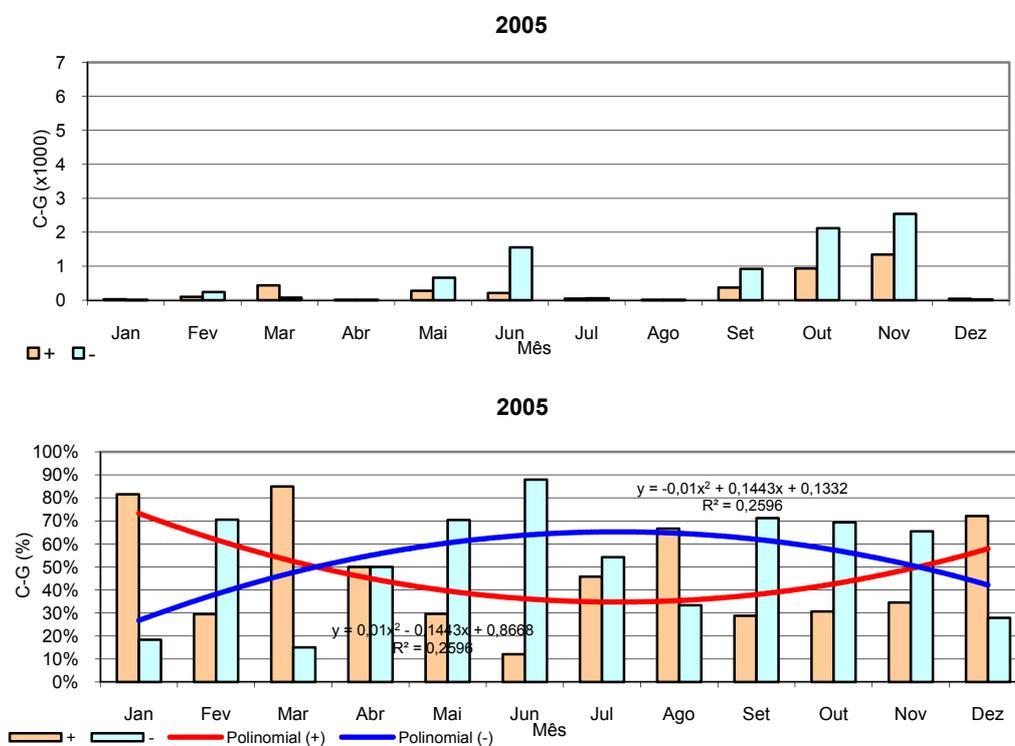


Fig. A.11 – DEA em função do mês na região A em 2005

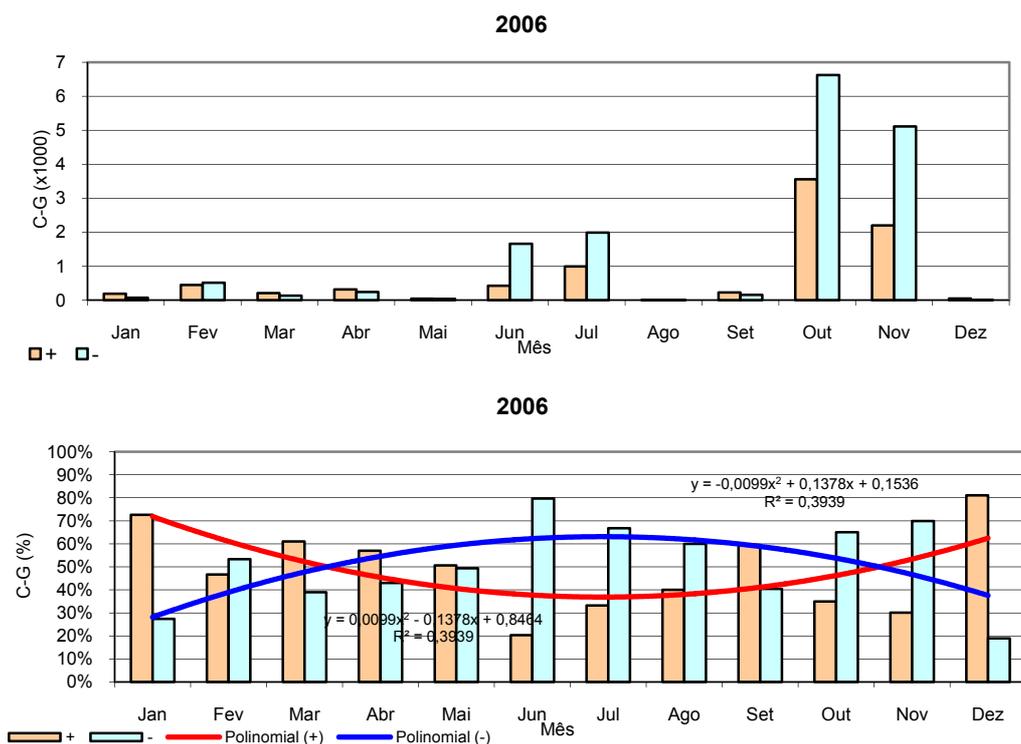


Fig. A.12 – DEA em função do mês na região A em 2006

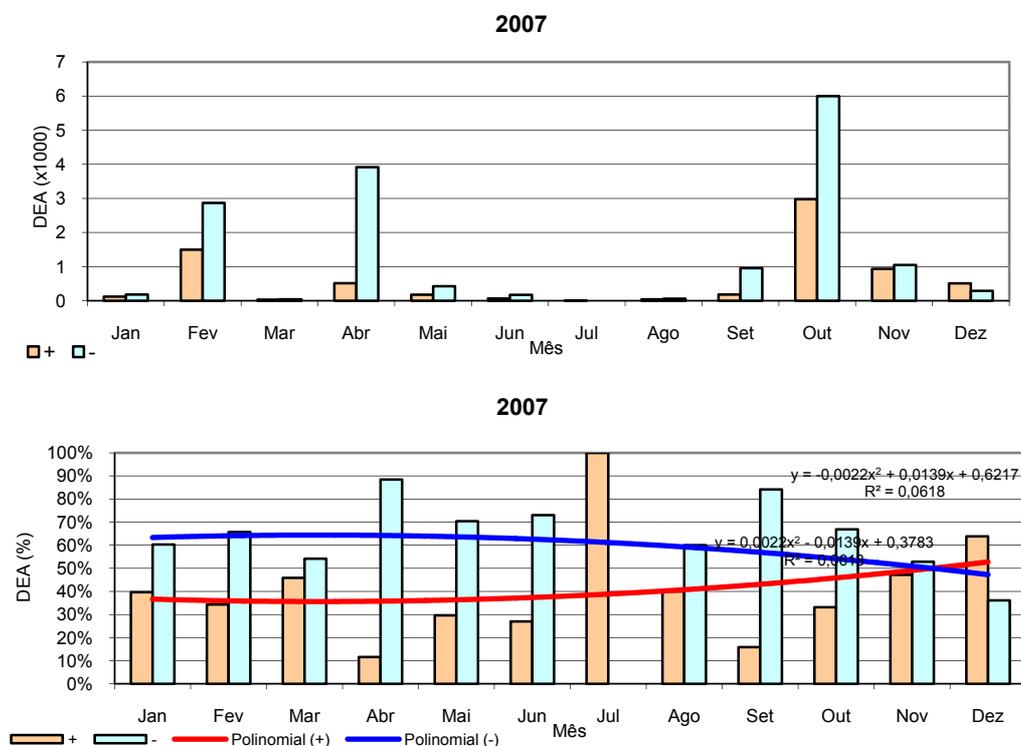


Fig. A.13 – DEA em função do mês na região A em 2007

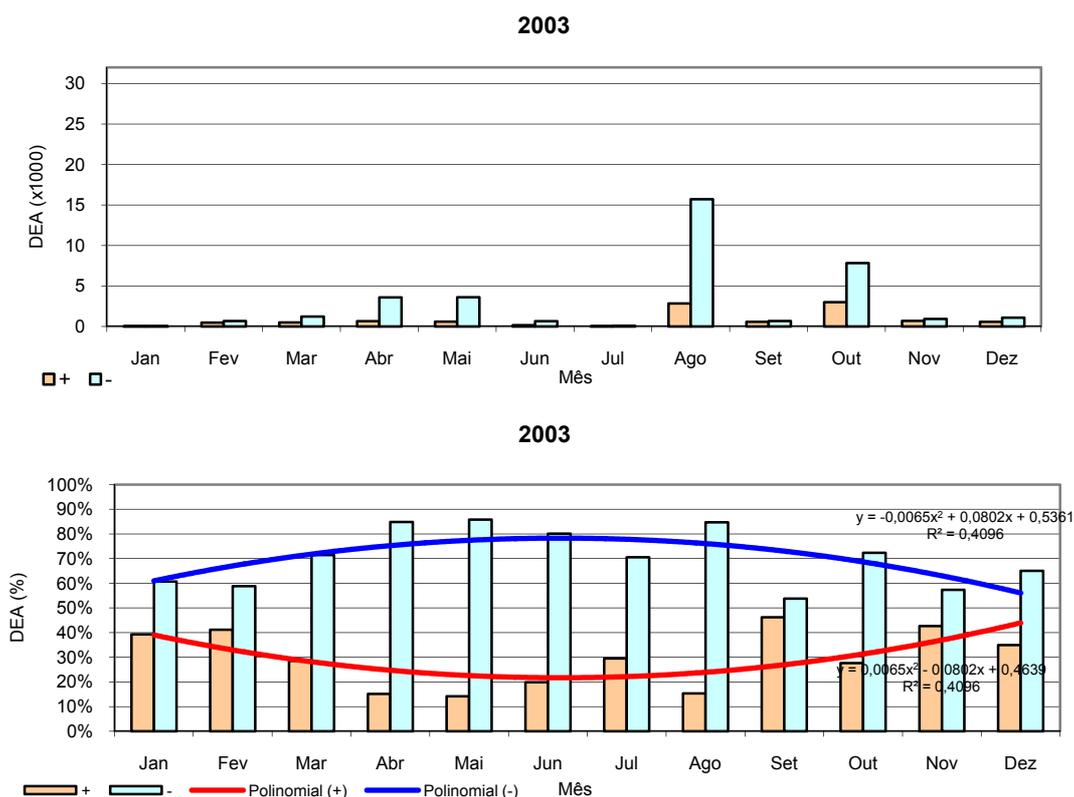


Fig. A.14 – DEA em função do mês na região B em 2003

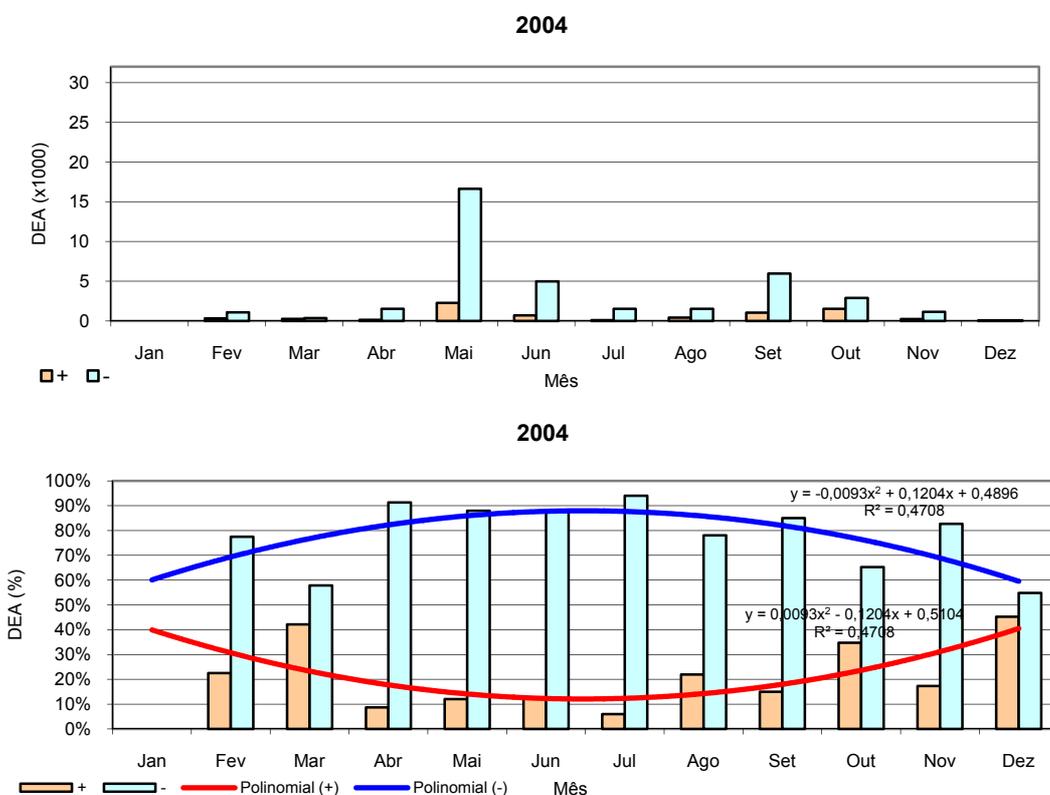


Fig. A.15 – DEA em função do mês na região B em 2004

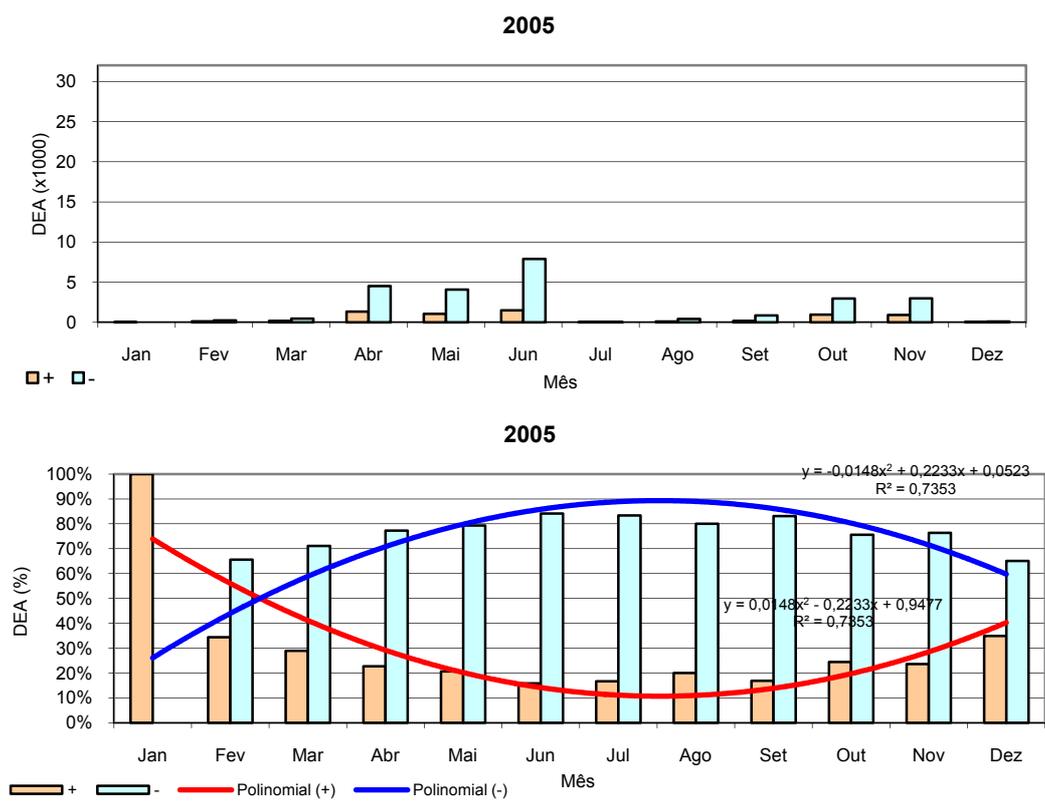


Fig. A.16 – DEA em função do mês na região B em 2005

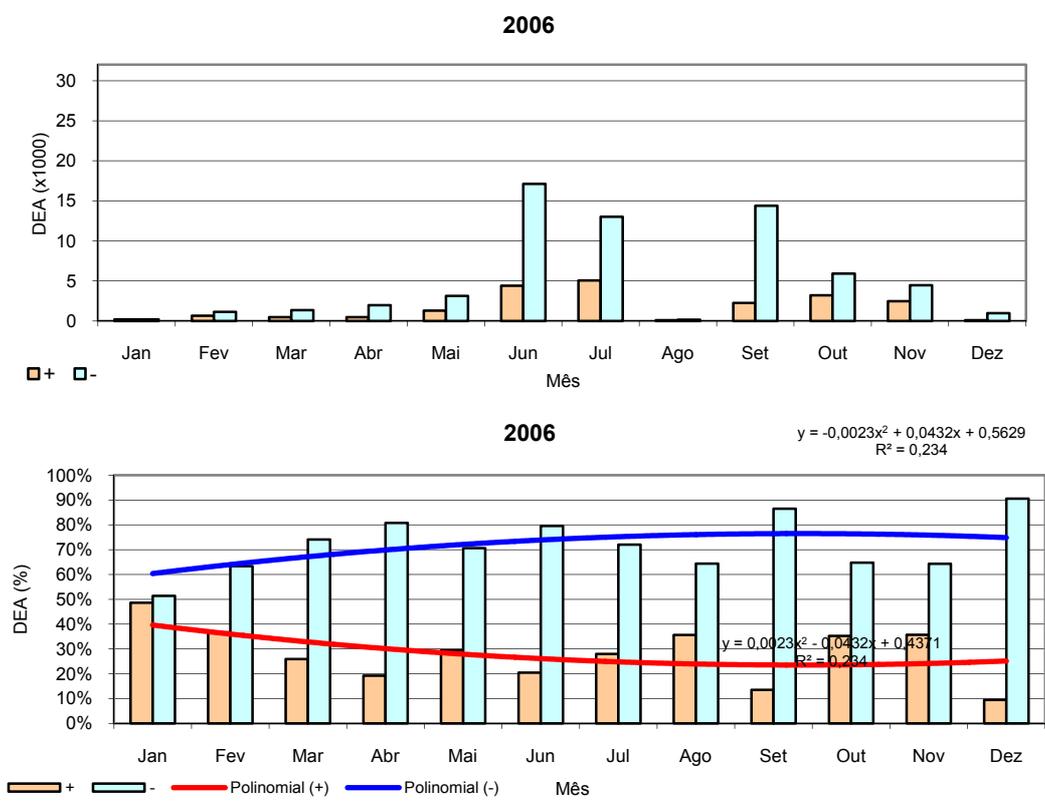


Fig. A.17 – DEA em função do mês na região B em 2006

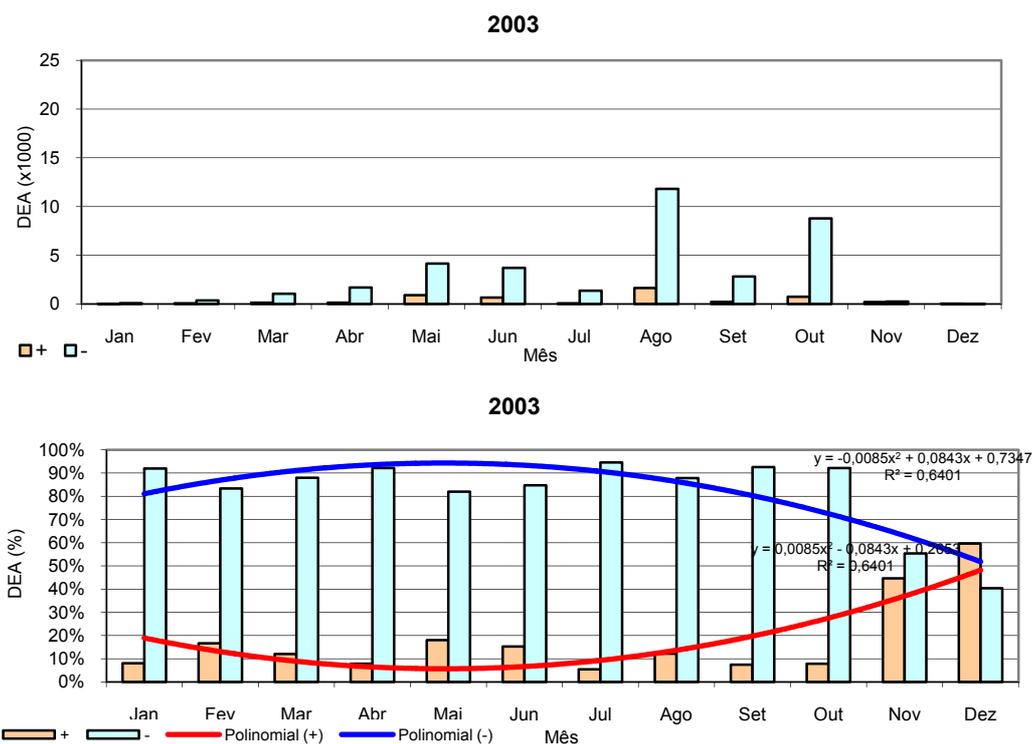


Fig. A.18 – DEA em função do mês na região C em 2003

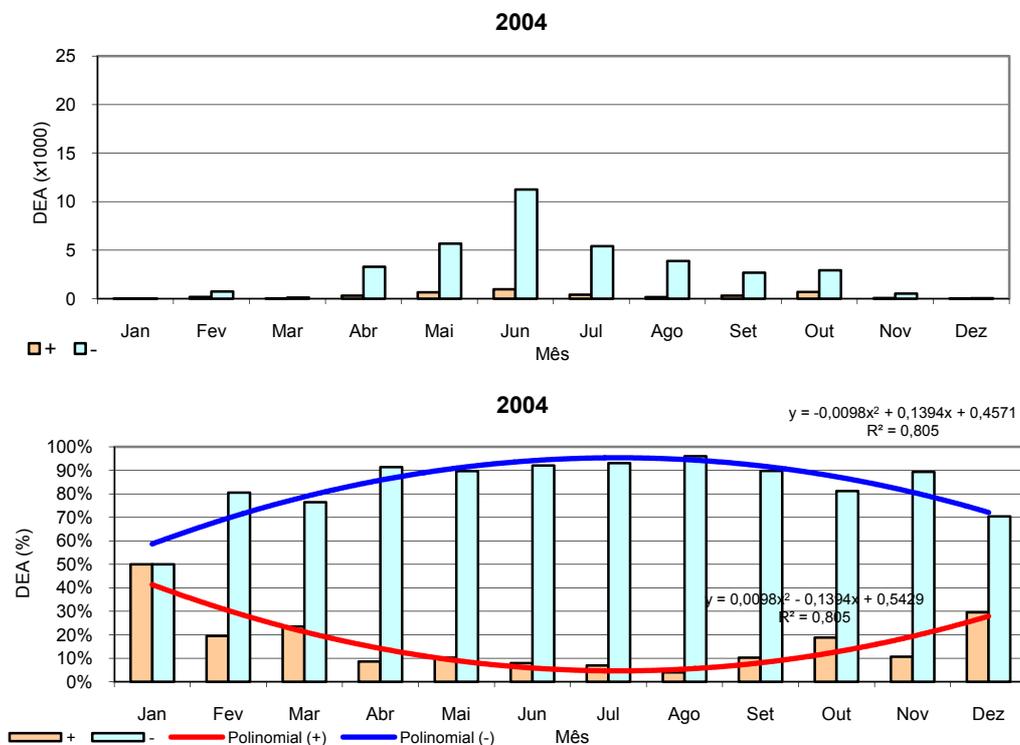


Fig. A.19 – DEA em função do mês na região C em 2004

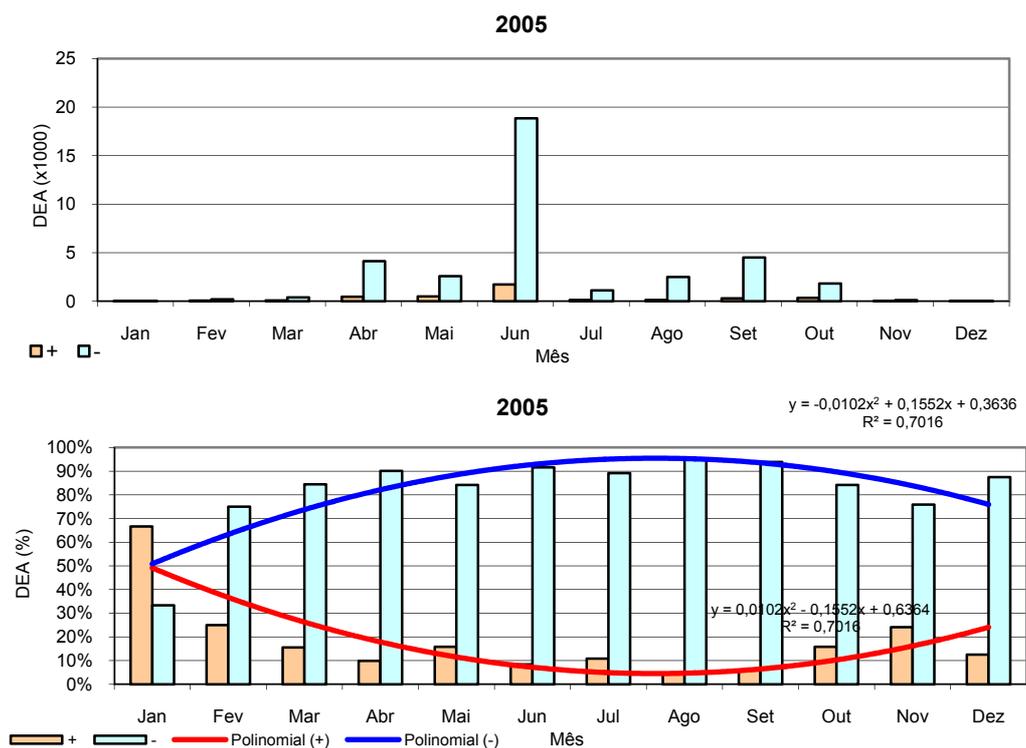


Fig. A.20 – DEA em função do mês na região C em 2005

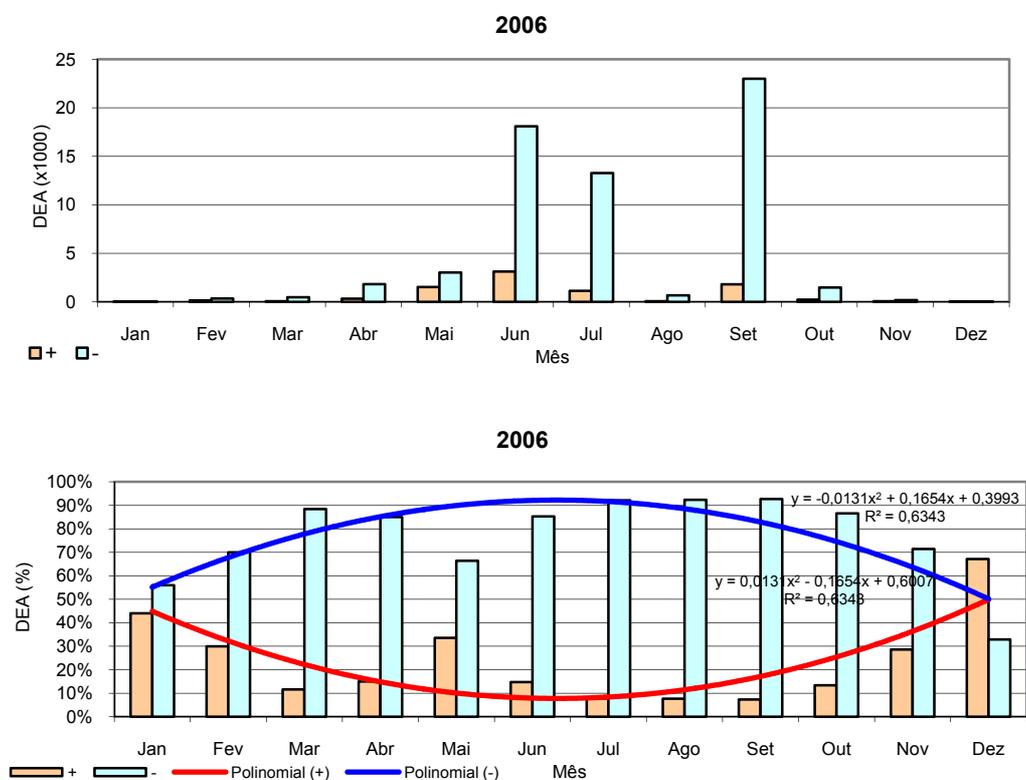


Fig. A.21 – DEA em função do mês na região C em 2006

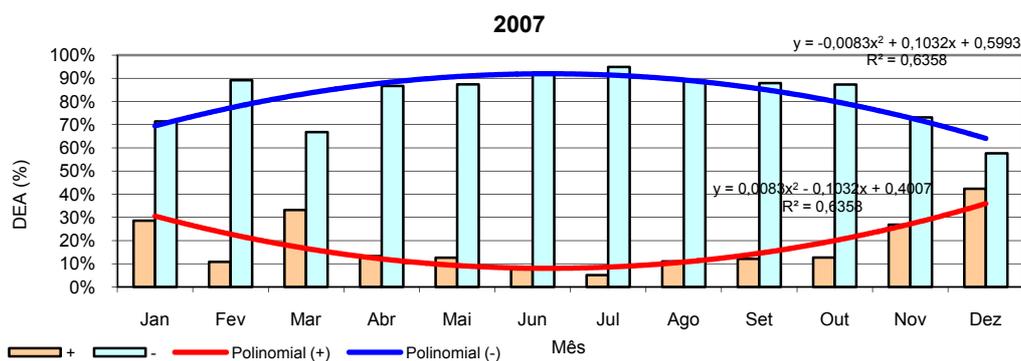
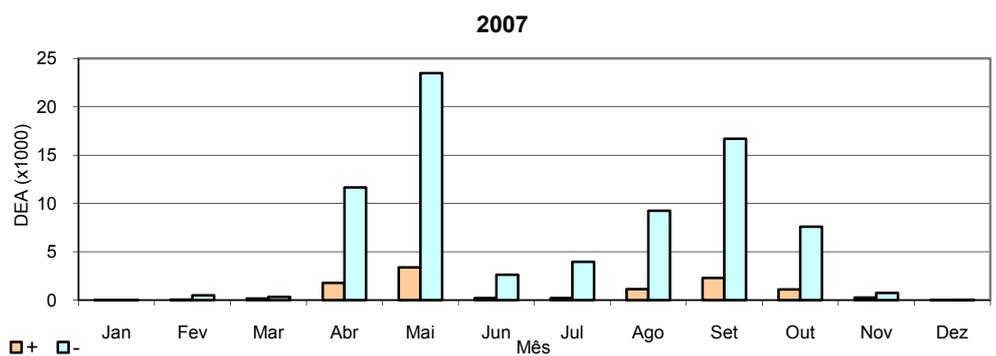


Fig. A.22 – DEA em função do mês na região C em 2007

Apêndice B

B.1 Introdução ao Programa LPS 2008

O que é o LPS 2008?

O LPS 2008 é um programa desenvolvido em *Visual Basic for Applications* (VBA), que tem por objectivo ajudar o projectista de sistemas de protecção contra DEA, a efectuar uma análise de risco de danos pormenorizada, objectiva e rápida da situação de risco potencial a que a(s) estruturas(s) está(ão) sujeita(s). A sua execução decorre dentro de uma sessão de qualquer versão AutoCAD a partir da versão 2000, facilitando assim a aquisição de informação numérica necessária, a partir de objectos desenhados e desenho automático de objectos, a partir de resultados numéricos.

O desenvolvimento do LPS 2008 beneficiou da experiência acumulada pelo autor desta tese no desenvolvimento anterior de um outro programa designado SPDA 2002 [27]. O SPDA 2002 foi baseado no relatório técnico IEC 61662, o qual não tinha o carácter de norma internacional como tem a IEC 62305-2. A boa aceitação do SPDA 2002 por parte dos utilizadores, constituiu um estímulo para o desenvolvimento do LPS 2008 com a publicação da norma IEC 62305 em 2006. No desenvolvimento do LPS 2008 houve a necessidade de criar um código completamente novo para se adaptar correctamente ao novo método da IEC 62305-2.

A execução do método de análise de risco descrito na IEC 62305, beneficia largamente em ser realizado com auxílio de computador, uma vez que este método considera um grande número de parâmetros para caracterizar a situação da estrutura a proteger. Estes relacionam-se entre si de uma forma se não complexa pelo menos morosa para quem queira executá-lo manualmente.

O desenho a três dimensões é necessário neste tipo de estudo, principalmente se pretendermos simular o modelo da esfera rolante (RSM), o qual é o único considerado e recomendado na IEC 62305-2. Torna-se também útil para obtenção de diversas vistas do(s) edifício(s).

Antes de executar o LPS 2008 deverá ter recolhido todas as informações necessárias sobre a estrutura a proteger, canalizações que a penetram, estruturas vizinhas, etc., de modo a poder inserir todos os dados que lhe serão pedidos, sem ter necessidade de interromper a aplicação para obter alguma informação em falta.

Instalar o LPS 2008

A instalação do LPS 2008 é simples e limita-se a copiar o ficheiro intitulado “LPS-2008.dvb”, para o seu computador. Embora não seja absolutamente necessário, poderá copiar o ficheiro “LPS.dwt” para a directoria “Template” do seu AutoCAD, de modo a que fique junto com os demais ficheiros deste tipo e possa executá-lo facilmente. O ficheiro “LPS-2008.dvb” poderá ficar localizado numa directoria à sua escolha.

B.2 Desenhar Objectos em 3D

Desenhar com precisão

O AutoCAD disponibiliza vários métodos que o auxiliam neste ponto. O mais simples de todos será estabelecer uma grelha “Grid” com um dado intervalo. Outra forma consiste em introduzir pontos por coordenadas cartesianas ou polares, absolutas ou relativas. Dispõe ainda de ajudas que lhe permitem identificar com rigor o ponto extremo de um segmento de recta ou o centro de um círculo, entre muitos outros como veremos.

Visualizar o desenho

O computador dispõe de um monitor que nos limita o espaço visual, mas o AutoCAD proporciona ferramentas como o “Zoom In”, “Zoom Out”, “Pan”, “3Dorbit”, entre outras, tornando fácil a navegação pelo desenho por muito grande que seja e ampliando-o tanto quanto queiramos.

A utilização de “Viewports” permite visualizar áreas ainda que muito afastadas, no mesmo “Layout” e as modificações efectuadas num “Viewport” fazem-se sentir também nos outros.

Modificar o seu desenho

O AutoCAD, facilita as tarefas menos criativas. Se necessitar de copiar um ou mais objectos ou partes destes, não necessita de os redesenhar. Apagar objectos indesejáveis faz-se com uns poucos “clicks” no rato e se apagar algo que não pretendia pode rapidamente anular a acção.

Uma vez desenhado um objecto, não necessita mais de o redesenhar, pode modificá-lo rodando-o, desenhá-lo em espelho, afectar-lhe um factor de escala e muito mais. Pode ainda mudar-lhe as propriedades tais como cor, “Layer”, tipo de linha, espessura de linha, de uma só vez e em qualquer altura.

Incorporar outros desenhos

Com o AutoCAD, pode referenciar parte ou a totalidade de outro desenho criando uma referência externa “Xref”. Os “Xrefs” permitem-lhe incorporar outros desenhos no desenho corrente, sem que os dados passem a fazer parte do desenho corrente, apenas os usamos para sobrepor os dois desenhos e eventualmente podemos imprimir o resultado.

Isto pode ser muito útil para verificar se existe ou não interferência entre dois desenhos distintos. “Xrefs” são actualizadas automaticamente sempre que forem alteradas, permitindo portanto manter actualizados também os desenhos onde estão inseridas. “Xrefs” podem localizar-se no seu computador ou na rede à qual o seu computador está ligado. Pode mesmo aceder a elas via Internet, utilizando o “AutoCAD DesignCenter”.

Organizar a informação de um desenho

Na maior parte dos casos é necessário separar a informação relativa a um dado objecto desenhado, por exemplo no caso de um edifício importa separar a construção civil devidamente cotada da instalação eléctrica, esta por sua vez deve ser separada em iluminação e tomadas de usos gerais e assim sucessivamente.

No AutoCAD, os “Layers” são o equivalente às folhas de papel vegetal. Os “Layers” são transparentes, como o papel vegetal, podem ser ligados ou desligados independentemente uns dos outros, permitindo desenhar a planta do edifício uma única vez e visualizá-la tantas vezes quantas as necessárias para, em combinação com outros “Layers”, obter o desenho final pretendido. Pode dar nomes sugestivos aos “Layers” que cria, bloqueá-los de modo que não possam ser alterados inadvertidamente, associar uma dada cor ou um tipo de linha; pode ainda associar a um “Layer” um estilo de impressão.

Quando criar um desenho novo pode utilizar o ficheiro “LPS.dwt”, do tipo “Template”, que lhe facilitará a tarefa uma vez que contém informações deste tipo. Utilize o botão de comando “Browse...”, para navegar até ao ficheiro “LPS.dwt” e seleccione “Open”, para abrir o ficheiro. Acabou de criar um novo desenho que por agora tem o nome de “Drawing1.dwg” mas pode dar-lhe o nome que quiser bastando para isso executar o comando “Save”.

Desenhar em 3D

Se dispuser de desenhos em duas dimensões do(s) edifício(s), como sejam plantas, alçados, coberturas, etc., pode usar esta informação para obter o seu desenho em 3D. Para isso deverá copiar os objectos que constituem a planta para o “Layer” “Planta” do seu desenho. Esta operação pode ser efectuada abrindo os dois desenhos na mesma sessão de AutoCAD, copiar os objectos pretendidos com “CTRL+C”, do desenho fonte e seguidamente efectuar “CTRL+V” no desenho de destino (como se viu anteriormente o AutoCAD, suporta a existência de múltiplos desenhos em uso durante uma sessão de trabalho e permite a troca de informação entre eles). Não deverá incluir na selecção dos objectos a copiar tudo aquilo que for supérfluo sob o ponto de vista do estudo de sistemas de protecção contra as descargas atmosféricas directas, como sejam desenhos de portas e janelas, pilares, mobiliário, etc.

Para criar uma barra de ferramentas nova pressione no botão “New...” e na caixa de diálogo “New Toolbar” introduza o nome que pretende dar à sua barra de ferramentas, por exemplo “LPS”, e faça “OK”. A sua barra de ferramentas nova já está criada. Se observar o ecrã descobrirá a sua barra de ferramentas reduzida ao mínimo pois não tem ainda nenhum comando.

Para inserir os comandos que deseja, seleccione a barra de ferramentas “LPS” e pressione o botão “Customize...”, agora só tem que escolher o comando que pretende adicionar à sua barra e arrastá-lo para dentro da barra de ferramentas “LPS”. Repita o procedimento até completar toda a inserção. Agora já pode usar a sua barra de ferramentas nova quando entender e da mesma forma que as demais barras de ferramentas fornecidas no AutoCAD. Como é evidente, a criação da barra de ferramentas “LPS” e a utilização do ficheiro “LPS.dwt”, não são necessários ao funcionamento do programa LPS 2008. No entanto, sugere-se a sua utilização de modo a aumentar a rapidez de execução do desenho.

A construção de um edifício 3D pode muito simplesmente necessitar apenas de um comando do AutoCAD: o comando  “Box”. Pressione o botão de comando e verá aparecer na “Command Line” a mensagem “Specify corner of box or [Center] <0,0,0>:”. Responda simplesmente com “Enter” para aceitar o ponto sugerido. Uma nova mensagem aparece com a inscrição “Specify corner or [Cube/Length]:”. Escreva “100,60” seguido de “Enter”. Acabou de definir a área da caixa que pretende construir, isto é, com um dos cantos no ponto $x=0$, $y=0$ e $z=0$ e o outro canto no ponto $x=100$, $y=60$ e $z=0$. Resta definir a altura. À mensagem “Specify height:”, responda com “18” seguido de “Enter”.

A Fig. B.1 a) mostra o edifício visto no plano XY, em planta. Mas podemos visualizá-lo em perspectiva isométrica com o comando  “... Isometric View”. Na caixa de diálogo “View” seleccione o separador “Orthographic & Isometric Views”. Aqui escolha a perspectiva “Northeast Isometric” seguido dos botões “Set Current” e “OK”, respectivamente. Poderá então observar uma imagem semelhante à da Fig. B.1 b) e experimentar as demais perspectivas. Também pode usar o comando  “3D Orbit” que lhe permitirá rodar o objecto livremente.

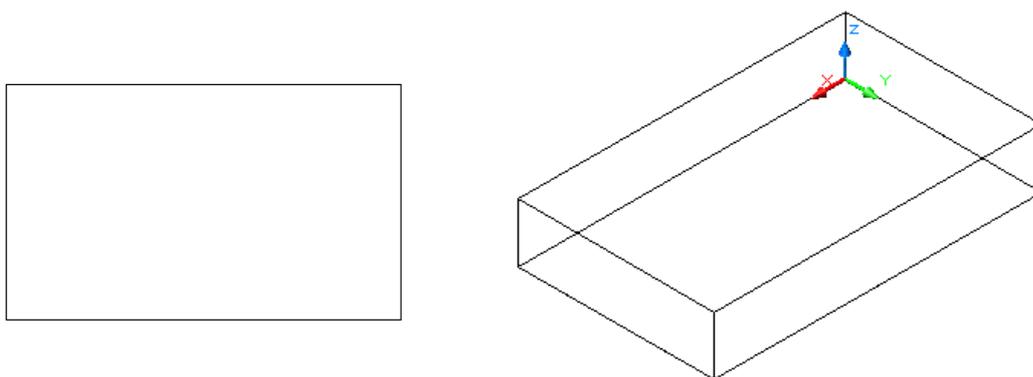


Fig. B.1 – a) Vista em planta do edifício b) Vista em perspectiva isométrica

O exemplo anterior não é suficiente para ilustrar o desenho em 3D; por isso, será apresentado outro exemplo que consiste em desenhar um edifício mais complexo.

A Fig. B.2 mostra um edifício complexo que se pretende obter no final do trabalho. Começemos por desenhar no “Layer” “3D” duas “Box” com as seguintes características:

	Caixa 1	Caixa 2
1.º canto	“0,0,0”	“0,7.5,0”
2.º canto	“6.25,7.5,0”	“3.75,3,0”
Altura	“3”	“3”

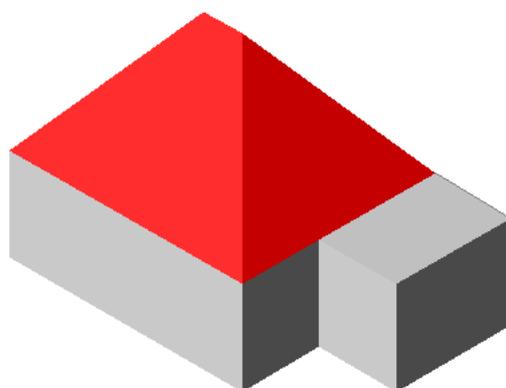


Fig. B.2 – Edifício complexo pretendido

A Fig. B.3 mostra o resultado da construção das caixas. Repare que existe um plano de separação entre ambas as caixas. Elas estão encostadas mas continuam a ser duas caixas distintas.

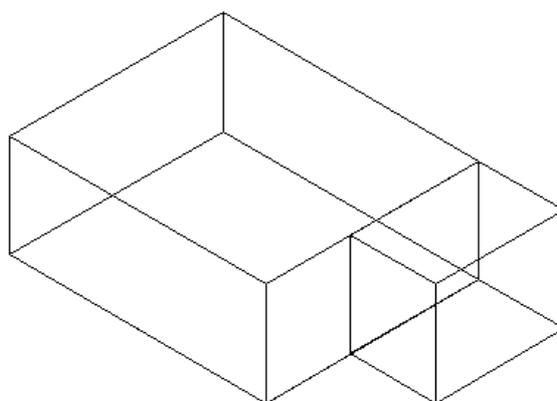


Fig. B.3 – Resultado após construção das duas caixas

Podemos obviar isso com o comando  “Union”. Execute o comando “Union”, seleccione as duas caixas e termine com “Enter”. O resultado será a obtenção de apenas um único sólido, como se pode ver na Fig. B.4.

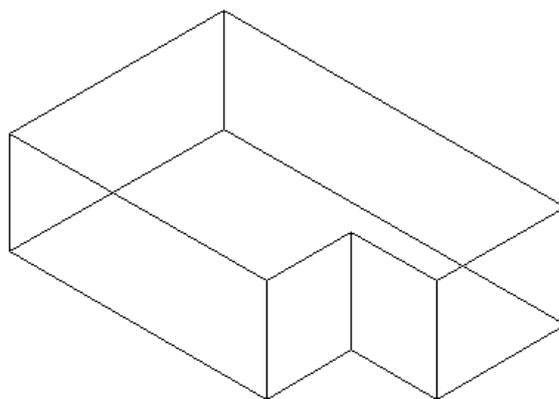


Fig. B.4 – Resultado após executar “Union”

O passo seguinte será desenhar o telhado. Devemos para tal mudar a cor da linha para vermelho. Execute o comando  “Wedge” e verá aparecer na “Command Line” a mensagem “Specify corner of wedge or [Center] <0,0,0>:”. Responda indicando um ponto qualquer da área de desenho, com o “Mouse”. Uma nova mensagem aparece com a inscrição “Specify corner or [Cube/Length]:”. Escreva “@3.125,7.5,0” seguido de “Enter”. Acabou de definir a área da cunha que pretende construir. Resta definir a altura. À mensagem “Specify height:”, responda com “3.9” seguido de “Enter”. Utilize o comando “Mirror” para obter uma segunda cunha em espelho. Na Fig. B.5 a) pode observar o resultado após ter terminado o desenho das cunhas e na Fig. B.5 b) já foi executado o comando “Union” para transformar os dois objectos num só. Repita o procedimento anterior para desenhar mais duas cunhas com as seguintes características:

	Cunha
1.º canto	Qualquer ponto
2.º canto	“@3.125,6.25,0”
Altura	“3.9”

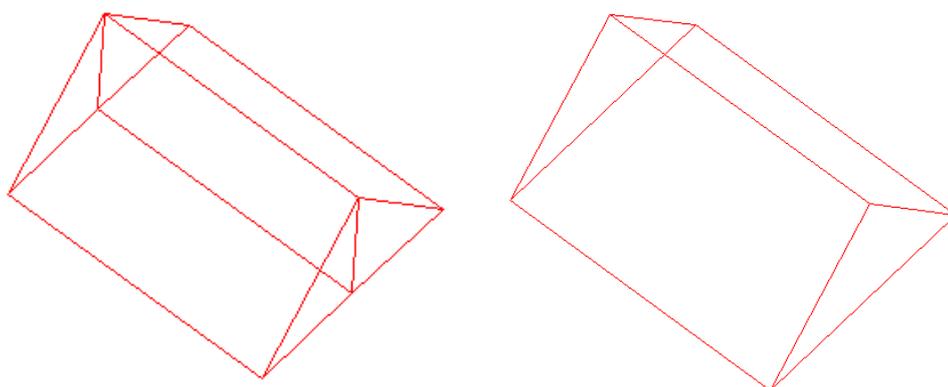


Fig. B.5 – a) Aspecto das duas cunhas b) Resultado após o comando “Union”

Mova cada uma das cunhas de forma a obter um resultado idêntico ao mostrado na Fig. B.6. Utilize o comando “Slice” para retirar o excesso das cunhas. A Fig. B.7 mostra as duas fases desse processo.

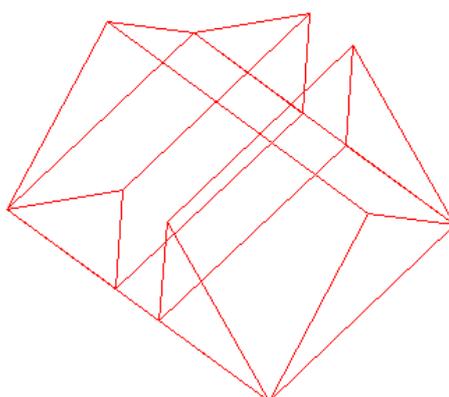


Fig. B.6 – Aspecto de todas as cunhas

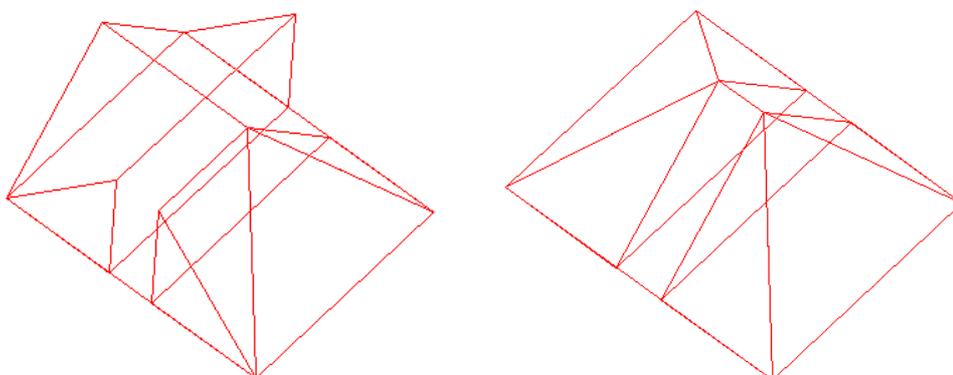


Fig. B.7 – a) O efeito do comando “Slice” b) Aspecto de todas as cunhas após o comando “Slice”

Finalmente utilize o comando “Union” para juntar todos os objectos num só, Fig. B.8.

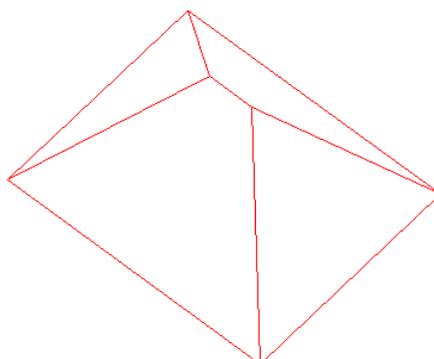


Fig. B.8 – Aspecto final do telhado

Mova o telhado e posicione-o sobre as paredes que havia construído anteriormente. Aplique uma vez mais o comando “Union” e terminou a modelação 3D necessária para obter o desenho da portaria. A Fig. B.9 no entanto não tem o mesmo aspecto da Fig. B.2 porque está em modo “Wireframe”. Pressione o botão “Gouraud Shaded” e obterá um desenho com o mesmo aspecto da Fig. B.2.

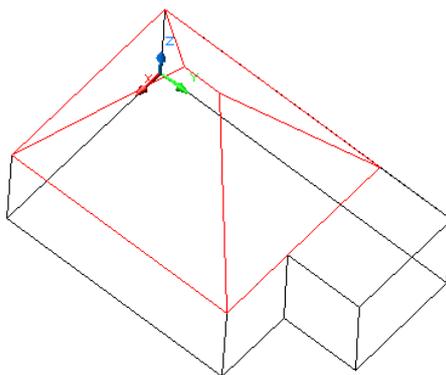


Fig. B.9 – Aspecto final da portaria

B.3 Obtenção das Áreas de Influência

Retornaremos aqui o exemplo da Fig. B.1. Para realizar o desenho da área de captura neste exemplo (Fig. B.10), basta-nos visualizar a planta do edifício e saber a altura deste. Desligue pois, todos os “Layers” desnecessários e faça do “Layer” “Ae (1-3)” o “Layer” corrente.

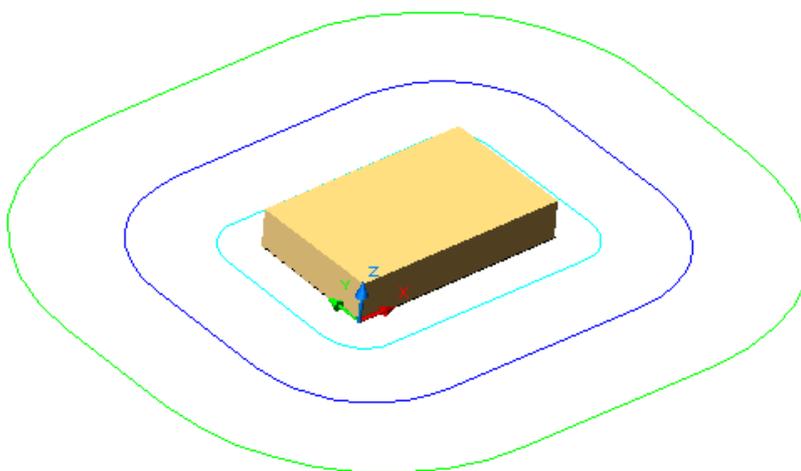


Fig. B.10 – Desenho 3D respeitante ao edifício da Fig. B.1, mostrando as áreas de influência

Utilize a barra de ferramentas “LPS” para executar o comando “Offset”. Verá aparecer na “Command Line” a mensagem: “Specify offset distance or [Trough]<1.0>:”, introduza o triplo do valor da altura do edifício “54 = 3×18” seguido de “Enter”. Agora o comando “Offset” pede-lhe que seleccione um objecto (“Select object to offset or <exit>:”), mova o ponteiro de modo a ficar sobre a linha que delimita a planta do edifício e pressione o botão do lado esquerdo para aceitar o objecto. Quando a mensagem “Specify point on side to offset:” aparecer, escolha um ponto qualquer do lado de fora do objecto que seleccionou. O comando “Offset” constrói um novo objecto, idêntico ao primeiro mas afastado deste de 54 m e pede que seleccione o seguinte objecto. Como não se pretende seleccionar mais nenhum termine com “Enter”.

O novo objecto ficará no “Layer” do objecto fonte, isto é, no “Planta”. Para alterar o “Layer” do novo objecto e colocá-lo no “Layer” “Ae (1-3)” seleccione o novo objecto e escolha o “Layer” “Ae (1-3)” na caixa de dialogo respectiva.

A obtenção dos arcos nos cantos pode ser efectuada com o comando  “Arc Start Center End” existente na barra de ferramentas “LPS”. Quando executa o comando “Arc Start Center End” surge a mensagem “Specify start point of arc or [Center]:”, responda com “CE” seguido de “Enter”. Indique o canto da planta ao pedido: “Specify center point of arc”. Aproxime o ponteiro mais ao menos perpendicularmente ao objecto azul claro até lhe aparecer o “Tooltip” “Perpendicular”. Pressione o botão esquerdo do “mouse” para aceitar o ponto de inicio do arco, em resposta a “Specify start point of arc”. Finalmente surge a mensagem “Specify end point of arc or [Angle/chord Length]” à qual deverá responder aproximando o ponteiro como no passo anterior e de modo a obter o arco desejado (veja-se Fig. B.11). Este procedimento deverá ser repetido na construção dos restantes arcos.

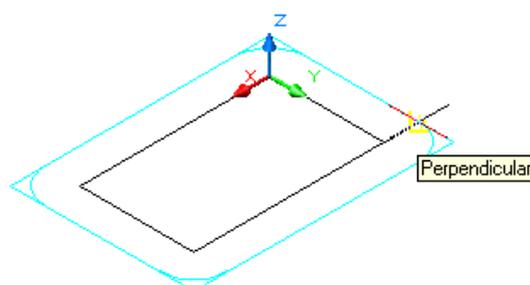


Fig. B.11 – Resultado do comando “Arc Start Center End”

É agora necessário eliminar os cantos do objecto que representa a intersecção com o solo das rectas com inclinação (declive) 1:3.

O comando  “Trim” ao ser executado, pede que seleccionemos os objectos de corte (“Select objects”), pelo que devemos seleccionar os quatro cantos seguido de “Enter” para que aceite a selecção. “Select objects to trim or [Project/End/Undo]” surge na “Command line”, em resposta levamos o ponteiro até um dos cantos a eliminar e uma vez sobre a linha pressionamos o botão esquerdo do “mouse”, fazendo com que esse canto desapareça. Repetimos o procedimento nos restantes cantos (veja-se Fig. B.12).

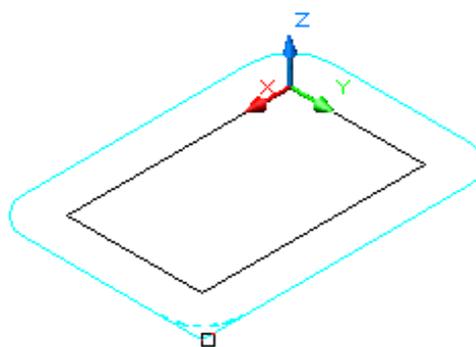


Fig. B.12 – Resultado do comando “Trim”

Neste momento já desenhamos a linha de contorno, resultante da intersecção com o solo, de rectas com declive igual a $1/3$ e que passam pelos pontos mais salientes do edifício. Mas para que o comando “Area” do AutoCAD funcione necessitamos de modificar estes objectos.

O comando “Area” permite-nos calcular a área de uma qualquer “Polyline” fechada. Como tal, vamos transformar o conjunto dos objectos que actualmente constituem a linha de contorno de Ae, num único objecto do tipo “Polyline”.

No menu principal escolha “Modify”/”Polyline” e verá surgir a mensagem: “Select polyline”. Responda seleccionando um qualquer objecto do conjunto que pretendemos modificar. Como o objecto seleccionado não é um objecto do tipo “Polyline” o comando apresenta a mensagem: “Do you want to turn it into one? <Y>”, faça “Enter” para aceitar.

Nova mensagem aparece: “Enter an option [Close/Join/Width/Edit vertex/Fit Spline/Decurve/Ltype gen/Undo]”, introduza “J” e como resposta à mensagem “Select objects”, seleccione os restantes objectos da linha de contorno de Ae. Finalize fazendo “Enter” duas vezes para concluir o comando.

A linha que delimita a área Ae está finalmente concluída. A construção das linhas que delimitam as áreas Ar e Am, é feita segundo o mesmo processo, devendo o utilizador ter o cuidado de desenhá-las nos “Layers” correspondentes e assim chegarmos a um desenho com o aspecto do que é mostrado na Fig. B.10.

B.4 Executar o Programa LPS 2008

O AutoCAD permite-nos aceder e executar macros durante uma sessão, ou seja, aplicações mais ou menos simples e personalizadas pelo utilizador que facilitam e poupam tempo, na execução de um conjunto de tarefas.

O programa LPS 2008 é um exemplo disso. A forma de o “carregar” consiste em aceder a “Tools”, no menu principal, onde escolhemos “Load Application...”. A caixa de diálogo que nos surge pede-nos que seleccionemos a aplicação a “carregar”. Utilize a “ComboBox” “Look in” para “navegar” até ao programa LPS 2008. Uma vez encontrado pressione “Load”/”Close”.

O programa LPS 2008 está pronto a funcionar bastando agora dar-lhe a ordem para iniciar. Essa ordem pode ser efectuada com “Alt”+”F8” seguido de “Run”. A Fig. B.13 mostra o ecrã de boas vindas do LPS 2008.

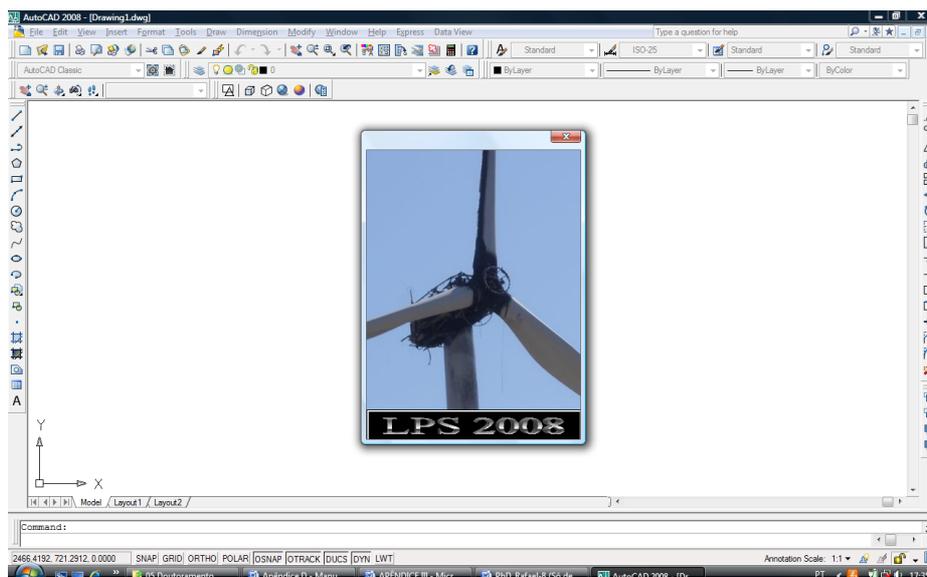


Fig. B.13 – Ecrã de “Boas-Vindas” do LPS 2008

O LPS 2008 está construído sobre um único “Form” no qual se encontram diversos separadores. O primeiro separador intitulado “LPS 2008” encontra-se representado na Fig. B.14. Neste separador o utilizador pode aceder a informações acerca do LPS 2008 e ainda pode escolher o idioma entre o Português e o Inglês.

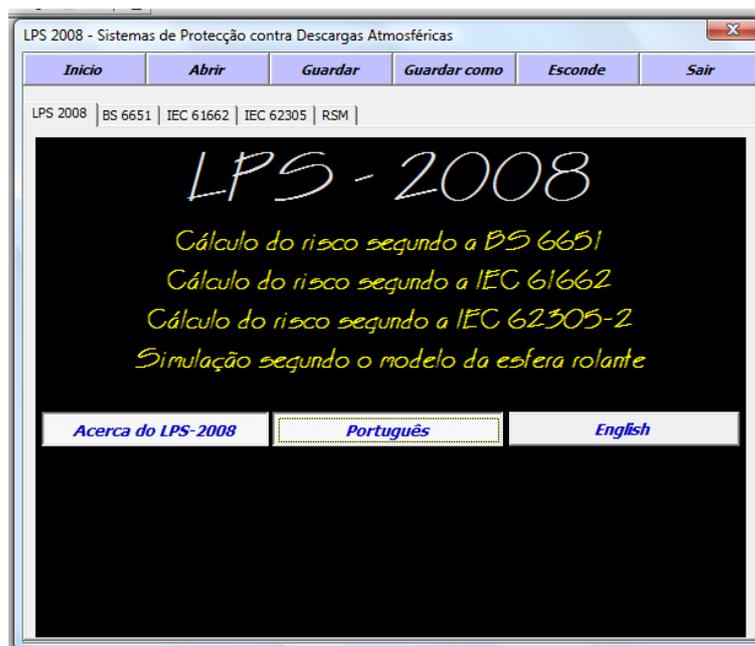


Fig. B.14 – Ecrã inicial do LPS 2008

A análise de risco de danos a um aerogerador típico, conforme descrito na tese, será primeiramente efectuada segundo a “BS 6651” (Fig. B.15). A “BS 6651” é uma norma britânica vocacionada para a protecção de estruturas contra os efeitos das DEA. A introdução de dados faz-se muito simplesmente escolhendo as opções mais adequadas à situação particular do aerogerador. Para efectuar o cálculo da área A_e (1:1), pressione o botão de comando “Cálculo da área A_e (1/1)”. Esta acção fará desaparecer o “Form” do LPS 2008 e em seu lugar aparecerá a área de desenho do AutoCAD. Na linha de comando a mensagem “Select objects” solicita ao utilizador que seleccione a “Polyline” sobre a qual pretende calcular a área. Escolha a “Polyline” do “Layer” “Ae (1/1)” seguido de “Enter”. O “Form” do LPS 2008 reaparece e mostra agora o valor da área pretendida. Por último, pressione o botão de comando “Actualizar o cálculo do risco” para visualizar o resultado da análise segundo a BS 6651.

LPS 2008 - Sistemas de Protecção contra Descargas Atmosféricas

Início | Abrir | Guardar | Guardar como | Esconde | Sair

LPS 2008 | BS 6651 | IEC 61662 | IEC 62305 | RSM

Dados **Classificação dos edifícios e estruturas**

... quanto à utilização da estrutura - A
Fábricas, oficinas e laboratórios

... quanto ao tipo de construção da estrutura - B
Edifícios em estrutura metálica com cobertura de material não condutor

... quanto ao valor do conteúdo da estrutura - C
Centrais eléctricas ou telefónicas, instalações de gás, estações de rádio ou de televisão, etc

... quanto ao grau de isolamento relativamente a estruturas nas imediações - D
Estruturas completamente isoladas ou que excedam o dobro da altura de outras estruturas vizinhas

... quanto à topografia da zona de implantação da estrutura - E
Terreno montanhoso, de altitude entre 300 m e 900 r

... quanto à localização da estrutura por distrito - Ng
Viana do Castelo

Cálculos e resultados

$A_e(1/1) =$

Ae = 42273 m2 Risco = 3.71E-02

Actualizar o cálculo do risco

Conclusões
O edifício/estrutura em análise necessita um IPR

Fig. B.15 – Análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a BS

6651

A análise efectuada segundo a BS 6651 deve ser encarada como uma aproximação grosseira à solução do problema. Um estudo mais pormenorizado sobre a estrutura a proteger pode ser conseguido com o método proposto no relatório técnico IEC 61662 ou na norma internacional IEC 62305-2 que veio substituir o método da IEC 61662. O LPS 2008 permite-nos, de uma forma rápida, obter resultados segundo estes diferentes métodos de análise de risco e assim compará-los.

As Fig. B.16 a B.20 mostram o aspecto dos separadores para introdução de dados para o método da IEC 61662. O utilizador deve escolher as situações que melhor se adaptam à situação do aerogerador em análise, seleccionando-as. O cálculo das diversas áreas faz-se de modo idêntico ao que foi visto no separador “BS 6651”. As Fig. B.21 a B.22 apresentam os ecrãs de resultados numéricos e finalmente a Fig. B.23 mostra o ecrã com as modificações sugeridas pelo LPS 2008 para que a estrutura seja considerada protegida.

Fig. B.16 – Entrada de dados para análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 61662, ecrã D1

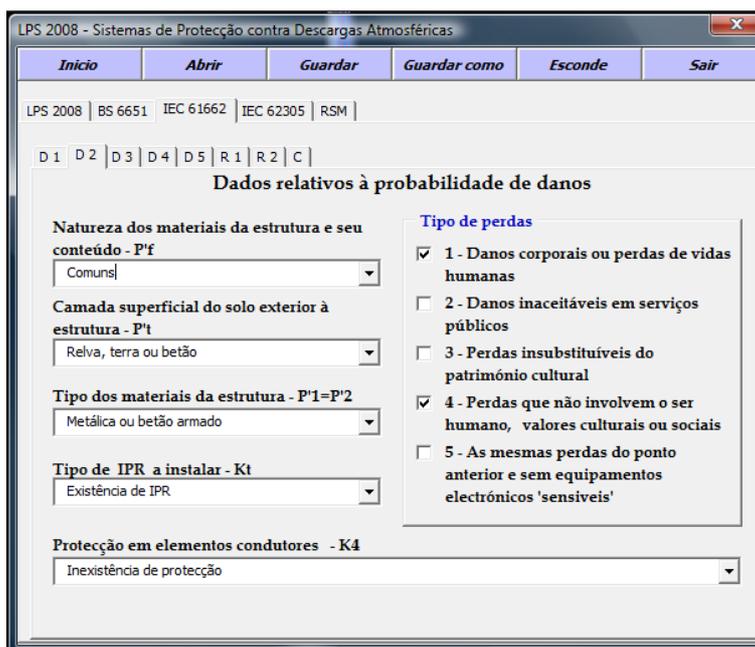


Fig. B.17 – Entrada de dados para análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 61662, ecrã D2

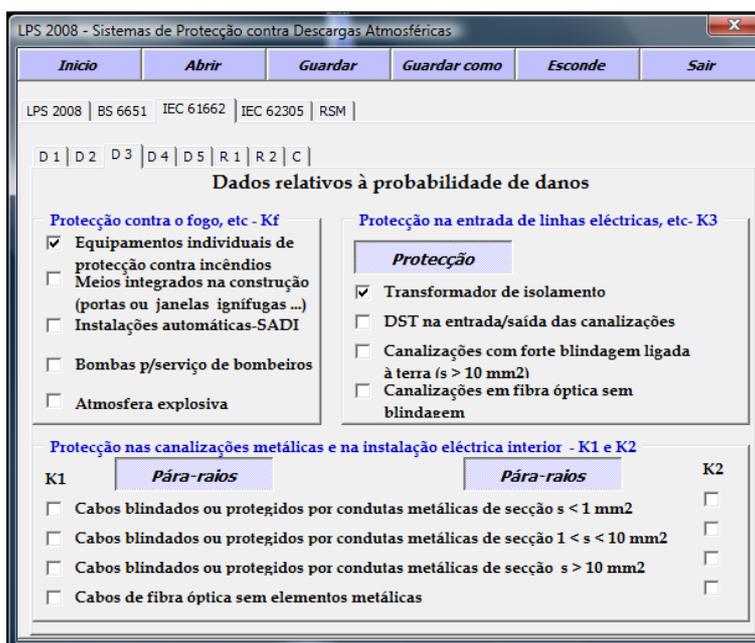


Fig. B.18 – Entrada de dados para análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 61662, ecrã D3

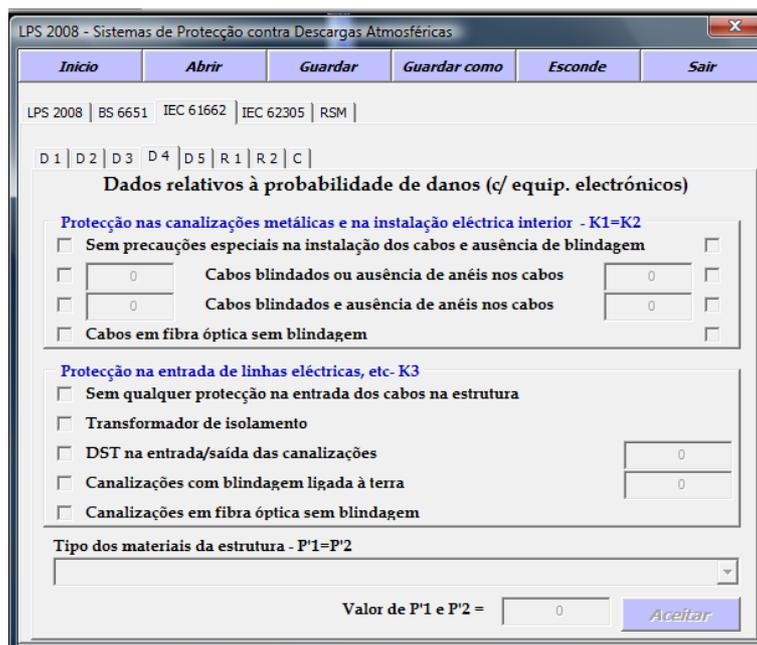


Fig. B.19 – Entrada de dados para análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 61662, ecrã D4

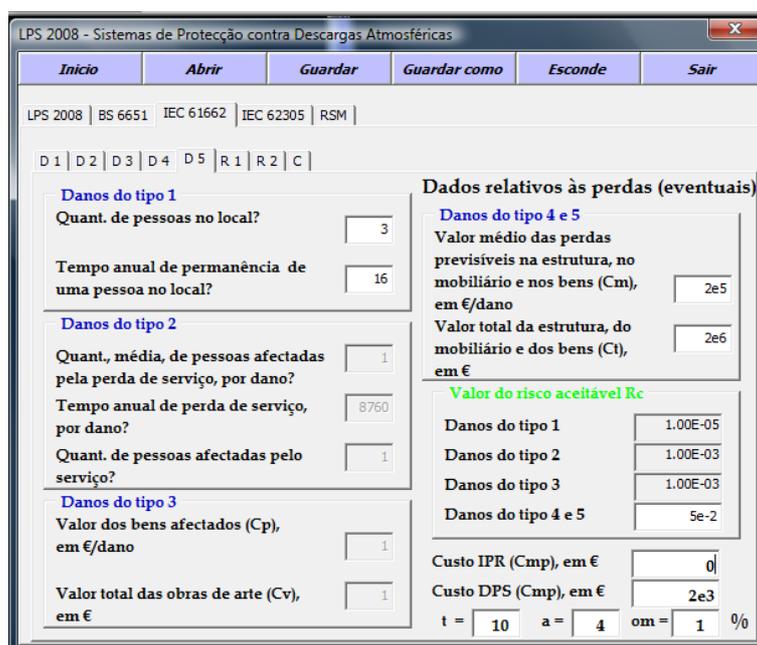


Fig. B.20 – Entrada de dados para análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 61662, ecrã D5

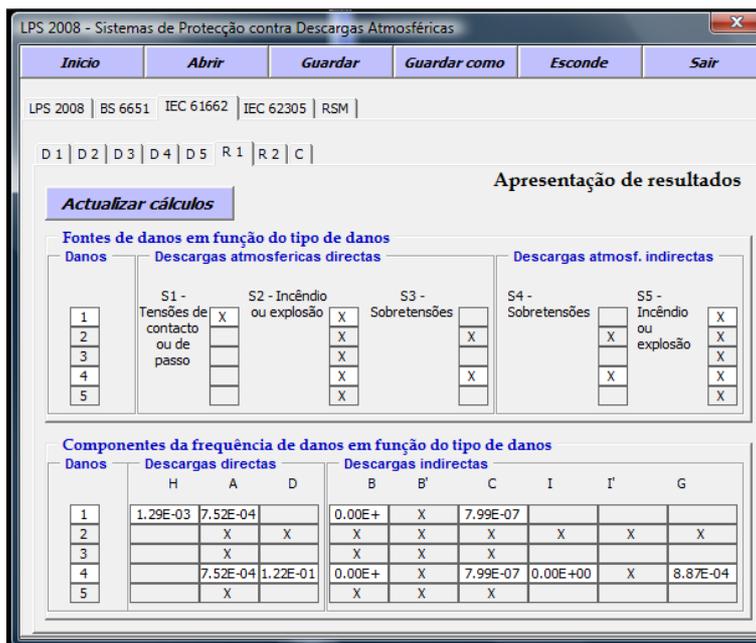


Fig. B.21 – Resultados da análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 61662, ecrã R1

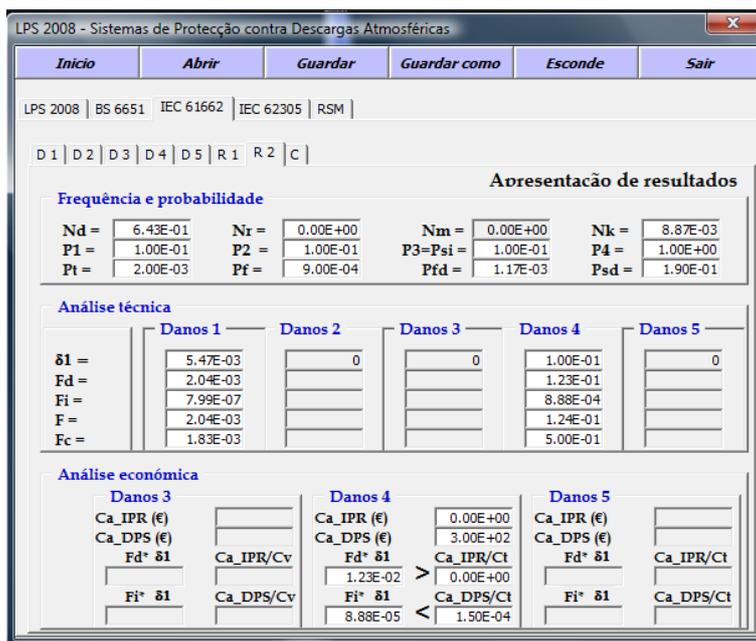


Fig. B.22 – Resultados da análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 61662, ecrã R2

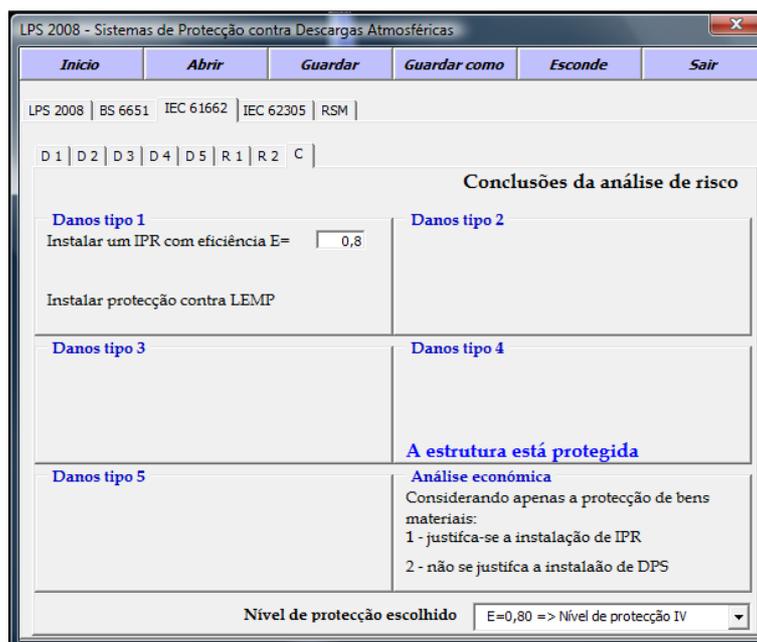


Fig. B.23 – Conclusões da análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 61662, ecrã C

Face às conclusões obtidas, verifica-se que a estrutura não está protegida para os danos do tipo 1 apesar de se ter considerado a existência de uma IPR de nível IV.

O LPS 2008 não assume automaticamente as modificações necessárias. Isto permite ao utilizador um maior grau de liberdade podendo ensaiar diversos “cenários” e inclusivamente inserir valores diferentes dos que constam nas tabelas do programa. As alterações aos dados sugeridas pelo LPS 2008 serão introduzidas nos ecrãs de dados respectivos, conforme se pode observar na Fig. B.24.

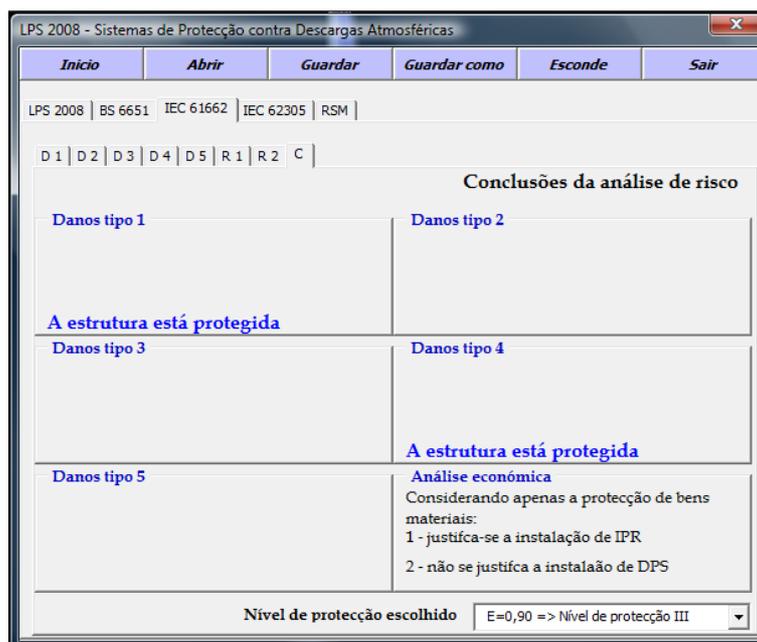


Fig. B.24 – Conclusões da análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 61662 com IPR de nível III, ecrã C

As Fig. B.25 a B.28, mostram o aspecto dos separadores para introdução de dados para o método da IEC 62305-2. O utilizador deve escolher as situações que melhor se adaptam à situação do aerogerador em análise, seleccionando-as. O cálculo das diversas áreas faz-se de modo idêntico ao que foi visto no separador “BS 6651”.

A Fig. B.29 apresenta o ecrã de resultados numéricos e finalmente a Fig. B.30 mostra o ecrã com as modificações sugeridas pelo LPS 2008 para que a estrutura seja considerada protegida.

LPS 2008 - Sistemas de Protecção contra Descargas Atmosféricas

Início | Abrir | Guardar | Guardar como | Esconde | Sair

LPS 2008 | BS 6651 | IEC 61662 | IEC 62305 | RSM

D1 | D2 | D3 | D 4 | R 1 | C1 |

Frequência de DEA | Distrito da estrutura: Viana do Castelo | Ng = 1,69 DEA

Valores indicativos da resistividade do solo: Betão (1 de cimento e 3 de inertes) - 150 | $\rho = 150 \Omega.m$

Canalização enterrada

Área(Ai) = 306186 | Área(AI) = 12247 m² | Altura(H) = 0 m

Área(Adb) = 380459 | Área(Ada) = 0 m² | Altura(Ha) = 0 m

Área(Am) = 0 m² | Altura(Hb) = 0 m

Altura(Hc) = 0 m

Comp.(Lc) = 350 m

Factor de Localização: Estrutura isolada no alto de uma colina ou arriba. | Cdb = 2

Factor de Localização: | Cda = 0

Factor do transformador - Ct: Alimentação por transformador com enrolamentos separados. | Ct = 0,2

Factor ambiental - Ce: Rural. | Ce = 1

Fig. B.25 – Entrada de dados para análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 62305-2, ecrã D1

LPS 2008 - Sistemas de Protecção contra Descargas Atmosféricas

Início | Abrir | Guardar | Guardar como | Esconde | Sair

LPS 2008 | BS 6651 | IEC 61662 | IEC 62305 | RSM

D1 | D2 | D3 | D 4 | R 1 | C1 |

Factores de atenuação

w = 0 m

Blindagem na periferia da estrutura: Nenhuma. | Ks1 = Ks2 = 1

Precauções na instalação - Ks3: Cabo s/ blindagem mas s/ grandes espiras. | Ks3 = 0,2

Tensão suportada pelo equipamento - Ks4: Uw = 1,5 kV | Ks4 = 1

Tipo de solo ou pavimento - ra/ru: Terreno agrícola, cimento <= 1 kOhm | ra=ru = 0,01

Medidas contra incêndios - rp: Sem precauções | rp = 1

Risco de incêndio - rf: Baixo | rf = 0,001

Riscos especiais - hz: Nenhum risco especial | hz = 1

Fig. B.26 – Entrada de dados para análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 62305-2, ecrã D2

Fig. B.27 – Entrada de dados para análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 62305-2, ecrã D3

Fig. B.28 – Entrada de dados para análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 62305-2, ecrã D4

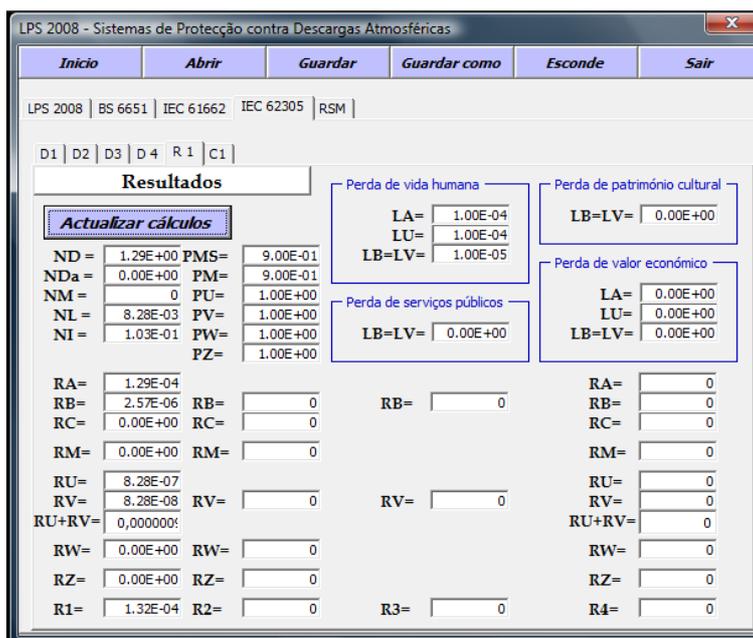


Fig. B.29 – Resultados da análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 62305-2, ecrã R1

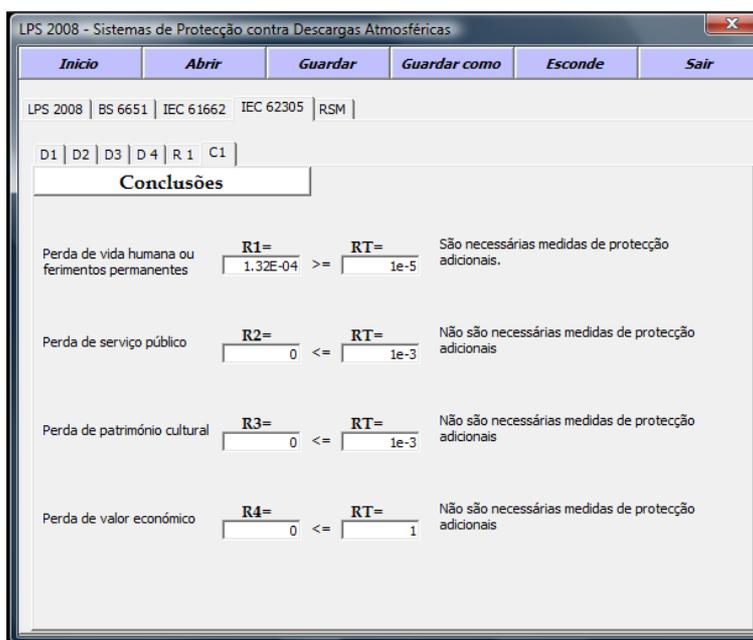


Fig. B.30 – Conclusões da análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 62305-2 com IPR de nível IV, ecrã C1

Face às conclusões obtidas, verifica-se que a estrutura não está protegida apesar de se ter considerado a existência de uma IPR de nível IV.

As alterações efectuadas consistiram na adição de DPST de nível III/IV e equipotencialização da IE. Com estas alterações o aerogerador ficou a estar protegido para as condições de instalação consideradas, conforme se pode observar na Fig. B.31.

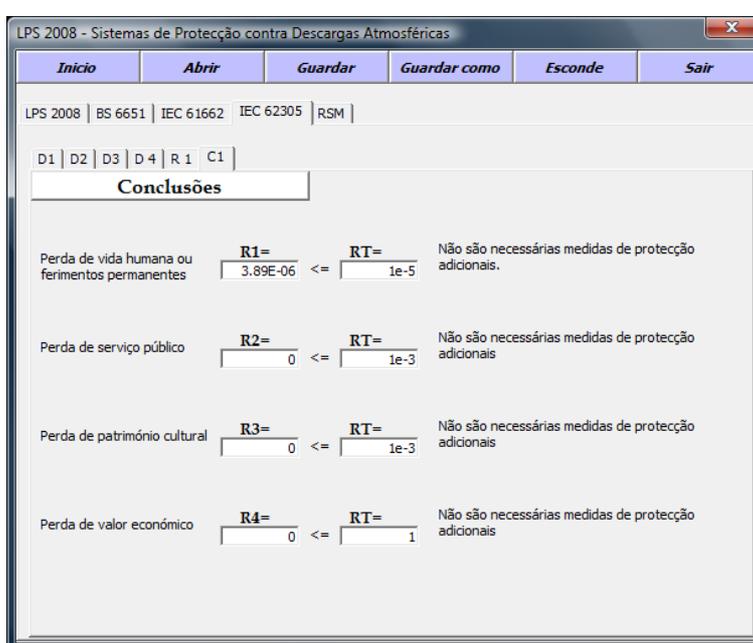


Fig. B.31 – Conclusões da análise do risco de danos a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 62305-2 com IPR e DPST de nível IV, ecrã C1

B.5 Simulação do Modelo RSM com o LPS 2008

Uma vez terminada a análise do risco a que a estrutura está sujeita, bem como definidos os equipamentos necessários para o sistema de protecção necessário, o programa LPS 2008 permite, sem sair da sessão em curso no AutoCAD, simular o modelo da esfera rolante (RSM) para o nível de protecção adoptado.

Esta simulação consiste em mover uma esfera através de um dado volume, que envolve a estrutura a proteger, e assinalar na estrutura os pontos de contacto onde quer que a esfera toque a estrutura, isto é, os pontos vulneráveis a impactos directos de DEA.

O separador “RSM” dispõe de uma caixa onde é possível escolher o nível de protecção para o pára-raios (Fig. B.32). Um botão de comando intitulado “Informações”, mostra-nos dados referentes ao nível de protecção seleccionado.

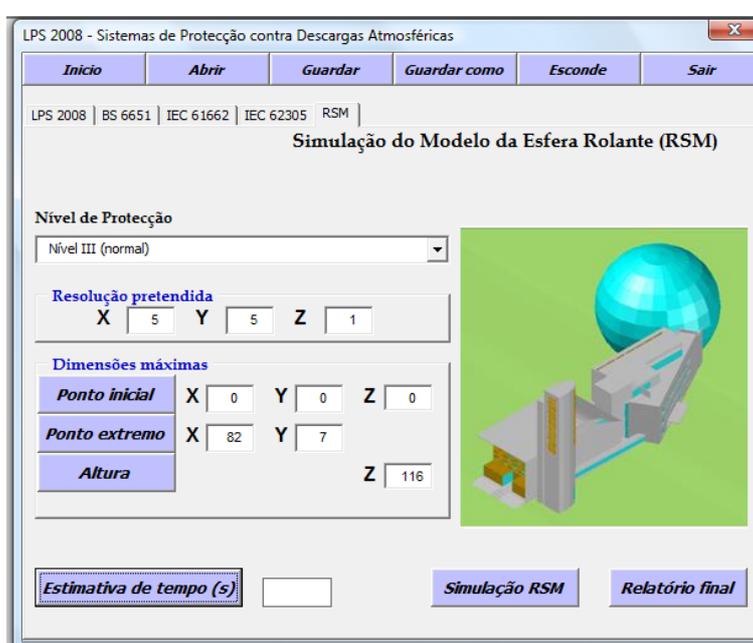


Fig. B.32 – Simulação do RSM a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 62661 com IPR de nível III, ecrã RSM

Para a obtenção da informação sobre os pontos que definem a área de implantação do aerogerador bem como a sua altura só necessita de pressionar os botões de comando respectivos e escolher no desenho, com o ponteiro do rato, os pontos referidos. A informação é automaticamente extraída do desenho e apresentada no separador “RSM” do LPS 2008 sob a forma numérica.

Quando pressionar o botão de comando “Simulação RSM”, o separador “RSM” do LPS 20082 desaparece e a área de desenho do AutoCAD surgirá.

A mensagem “Select objects” é a ultima mensagem deste comando e pretende que o utilizador seleccione o objecto que quer ver confrontado com a esfera.

A simulação do modelo RSM pode demorar um pouco; isso depende muito da complexidade da estrutura que estamos a analisar, bem como das suas dimensões. O resultado da simulação do RSM para os níveis de protecção I e IV com o LPS 2008 é apresentado na Fig. B.33.

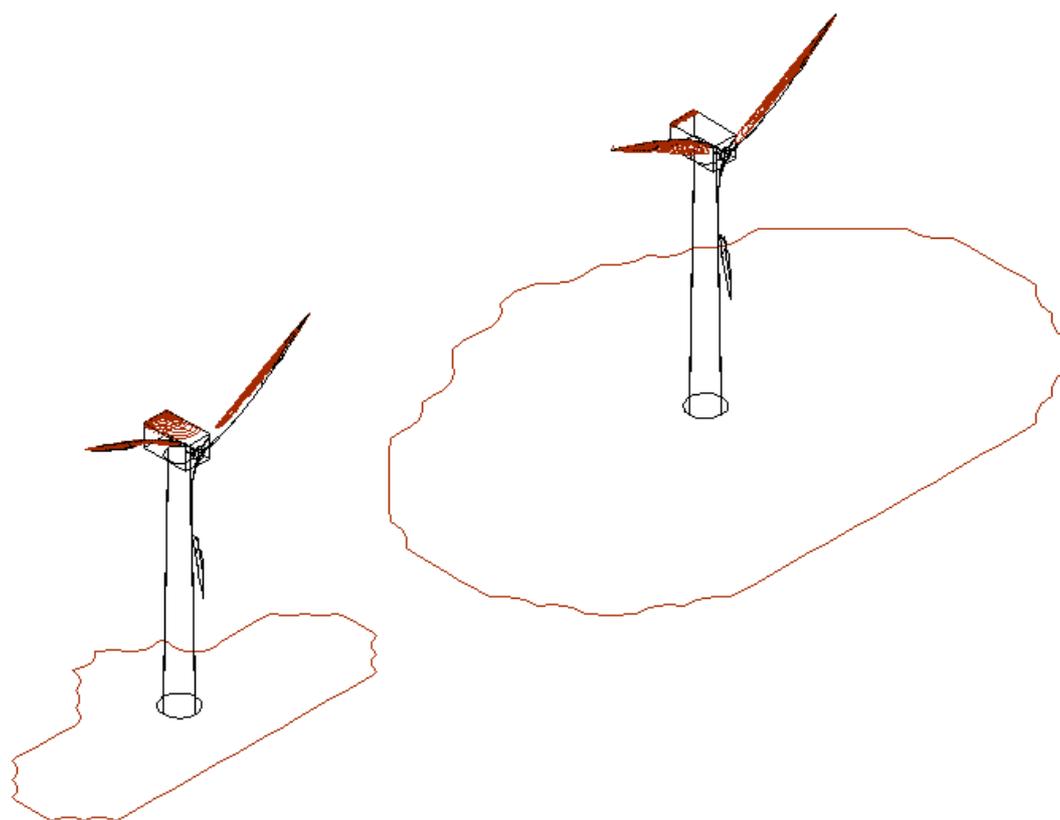


Fig. B.33 – Resultado da simulação do RSM a um aerogerador com 116 m de altura segundo a IEC 62661 com IPR de nível I e IV

De modo a melhor evidenciar as potencialidades da simulação 3D do RSM com o LPS 2008 apresenta-se um outro caso de estudo. A igreja dos Pastorinhos situa-se em Alverca do Ribatejo e o seu aspecto, após modelação em 3D com o AutoCAD, é apresentado na Fig. B.34.

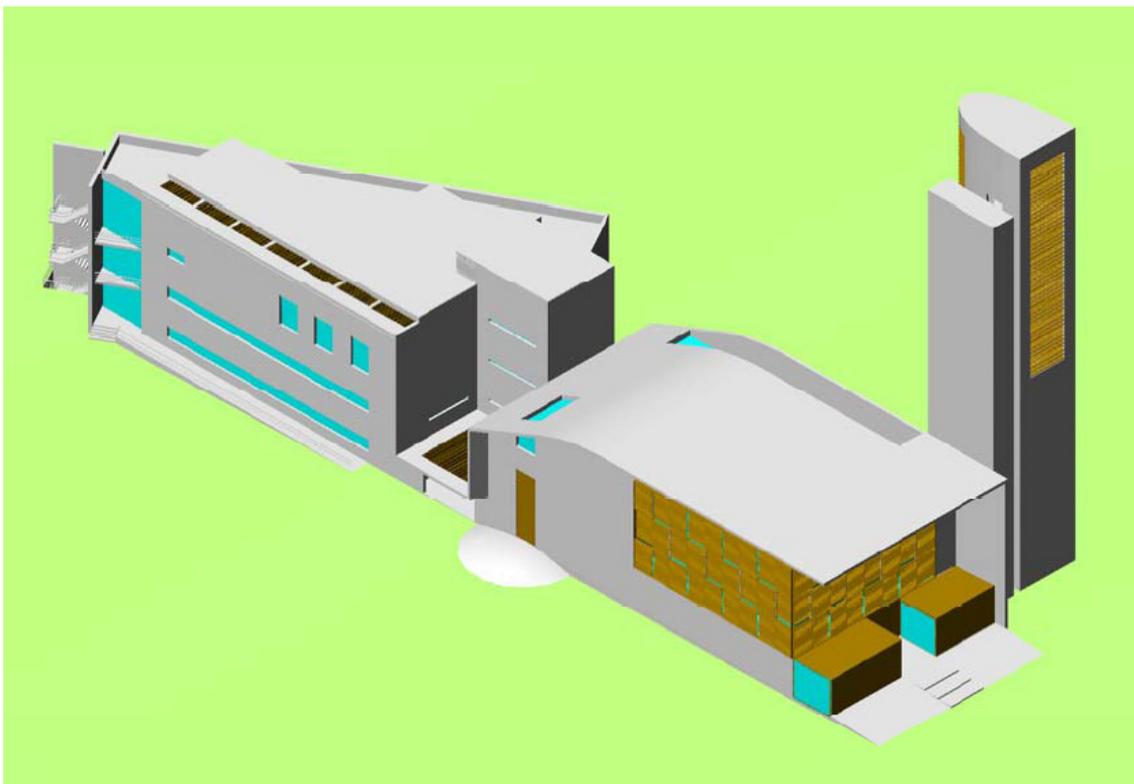


Fig. B.34 – Igreja dos Pastorinhos modelada em 3D com o AutoCAD

O seu sistema de protecção contra as DEA foi projectado tendo em consideração o método de análise de risco de danos do relatório técnico da IEC 61662, que veio a dar origem à norma IEC 62305.

A simulação do RSM deu como resultado, para o nível I de protecção, os pontos vulneráveis apresentados na Fig. B.35 e representados pelas linhas a cor roxo.

Também na Fig. 35 se observa a linha irregular ao nível do solo, que não é plano, marcando a fronteira entre a zona protegida do impacto directo das DEA mas sem qualquer protecção face às influências do campo electromagnético e seus efeitos induzidos em equipamento eléctrico e electrónico, ZP 0B e, a zona não protegida, quer do impacto directo das DEA quer das influências do campo electromagnético e seus efeitos induzidos, ZP 0A.

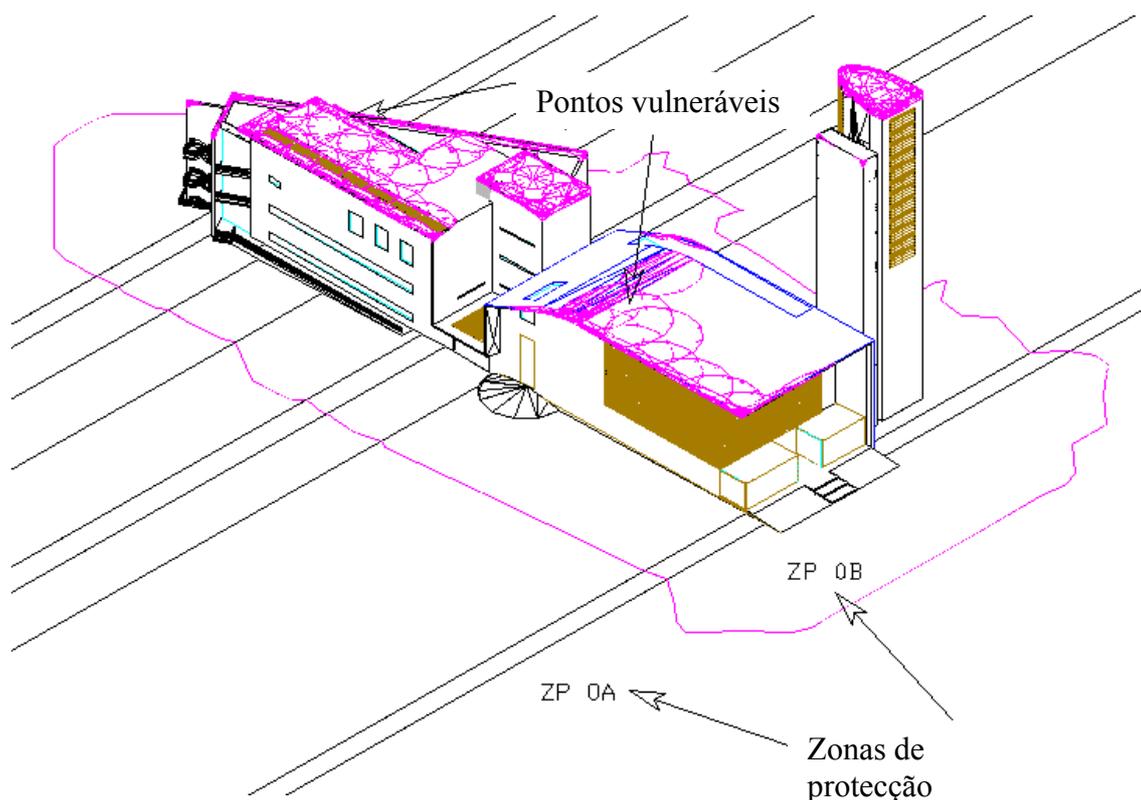


Fig. B.35 – Resultado da simulação do RSM à Igreja dos Pastorinhos

Os resultados da Fig. B.35 permitiram projectar um pára-raios para a igreja dos Pastorinhos o qual é constituído por captos naturais, isto é, elementos metálicos que já faziam parte da estrutura, representados a azul e, por captos artificiais que são todos aqueles elementos metálicos que foram colocados na estrutura com o único fim de proporcionarem protecção contra os efeitos directos das DEA. A IPR projectada tem a aspecto apresentado na Fig. B.36.

É, ainda, possível observar os diversos condutores de descida e sua ligação ao eléctrodo de terra em anel em torno da igreja. A escolha desta configuração para o eléctrodo de terra foi condicionada pelo facto de já não ter sido possível instalar os eléctrodos de terra nas fundações, e pelo facto da igreja se localizar num ambiente densamente urbanizado.

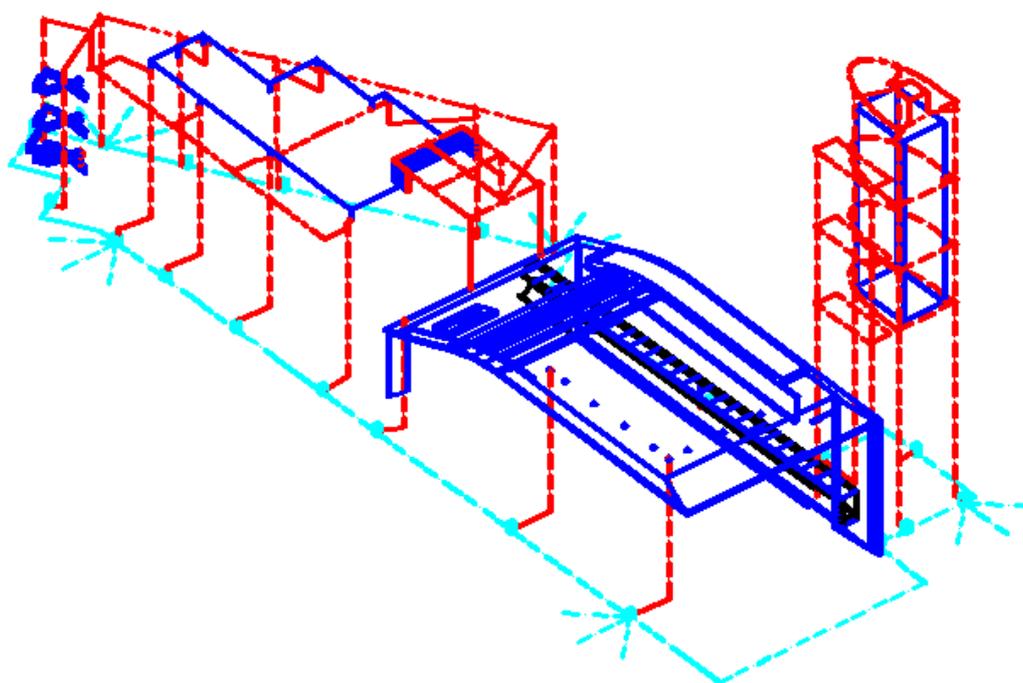


Fig. B.36 – IPR na igreja dos Pastorinhos