

# SIMULAÇÃO EM COMPUTADOR PARA PROTECÇÃO DE PARQUES EÓLICOS CONTRA DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS

R.B. Rodrigues, V.M.F. Mendes

*Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL),  
Departamento de Engenharia Electrotécnica e Automação (DEEA), Lisboa, Portugal,  
[rbrodrigues@deea.isel.ipl.pt](mailto:rbrodrigues@deea.isel.ipl.pt); [vmendes@isel.pt](mailto:vmendes@isel.pt)*

J.P.S. Catalão

*Universidade da Beira Interior (UBI),  
Departamento de Engenharia Electromecânica (DEM), Covilhã, Portugal,  
[catalao@ubi.pt](mailto:catalao@ubi.pt)*

Palavras-chave: Simulação por computador, protecção de parques eólicos, descargas eléctricas atmosféricas.

Resumo: Este trabalho apresenta uma descrição do programa de computador LPS 2008 desenvolvido em Visual Basic pelos autores. Este programa foi especialmente desenhado para a protecção de parques eólicos mas, é suficientemente genérico para aplicação a outras estruturas e serviços. O LPS 2008 funciona em conjunto com o AutoCAD e, não só efectua a análise do risco de danos devidos aos efeitos directos e indirectos das descargas eléctricas atmosféricas, como ainda efectua a simulação em 3D do Modelo da Esfera Rolante. A análise do risco de danos baseia-se nas mais recentes normas IEC e permite ao utilizador: quantificar o risco; compara-lo com valores de referência; e seleccionar as medidas de protecção adicionais mais vantajosas, quer do ponto de vista técnico quer económico. O Modelo da Esfera Rolante identifica os pontos mais vulneráveis de uma estrutura e permite ao utilizador conceber a Instalação de Pára-Raios mais adequada à estrutura em causa.

## 1 INTRODUÇÃO

As Descargas Eléctricas Atmosféricas (DEA) nuvem-terra são um fenómeno natural deveras imprevisível, que pode causar avultados danos materiais, ferimentos e até a morte dos seres vivos. Os danos ocorrem quando as DEA atingem directamente edifícios/estruturas, linhas de energia ou telecomunicações (serviços), ou indirectamente quando atingem o solo na vizinhança dessas estruturas ou linhas de serviços.

Entre 1991 e 1994, 239 pessoas morreram em consequência das DEA nos Estados Unidos da América [1].

Um estudo realizado em Navarra entre 1959 e 1999 mostra que 56% dos prejuízos económicos afectam aparelhos eléctricos e electrónicos no sector doméstico [2].

É pois fundamental implementar medidas de protecção eficazes no sentido de minimizar os riscos

de danos quer materiais quer pessoais. De modo a alcançar esse objectivo, torna-se muito importante o aspecto da compatibilidade entre os dispositivos de protecção e os aparelhos eléctricos e electrónicos que integram as Instalações Eléctricas (IE), tais como os parques eólicos.

Num parque eólico o gerador eléctrico é o componente mais exposto porque é instalado muito acima do solo (70 a 100 m), em locais de elevada altitude (montes ou serras) e expostos a fortes ventos com elevada probabilidade de formação de trovoadas.

Os danos nas torres eólicas têm-se tornado um problema cada vez mais sério à medida que aumenta a potência dos geradores, o que faz aumentar a altura da torre e consequentemente aumenta a probabilidade de ser atingida. Por outro lado, a sua crescente penetração no sistema produtor de energia eléctrica aumenta a vulnerabilidade do sistema de produção/distribuição.

Só na Alemanha, entre 1992 e 1995 foram registados 393 acidentes devidos a DEA em torres eólicas [3].

A parte externa de um parque eólico é constituído por: torres, cabos de média tensão (MT), edifício da subestação (SE), e IE de alta tensão (AT), que são afectadas pelos efeitos directos das DEA. A parte interna aloja a restante IE que é afectada pelos efeitos indirectos das DEA e é composta por máquinas eléctricas: gerador eléctrico, transformador BT/MT e servomecanismos; equipamento electrónico: rectificadores, inversores e sistemas de controlo; e cabos eléctricos para potência e sinal.

As sobretensões transitórias devidas às DEA podem, em certas condições, causar incêndios graves que levam à destruição completa da torre eólica. Mas, mesmo que tal não aconteça, as sobretensões transitórias causam com maior frequência danos que levam à saída de serviço da torre eólica, provocando elevadas perdas de rentabilidade e intervenções não planeadas muito onerosas. Torna-se pois necessário prever medidas de protecção adequadas aos parques eólicos. A necessidade de implementar as referidas medidas de protecção é suportada pelas vantagens económicas que daí advêm e pela correcta avaliação dos riscos inerentes.

A selecção das medidas técnicas de protecção mais adequadas e o investimento que maximiza a rentabilidade do investidor é ditado por uma análise rigorosa do risco de danos. Neste trabalho utiliza-se para a análise de risco de danos o método proposto pela mais recente norma da International Electrotechnical Commission (IEC), IEC 62305-2 [4]. Esta norma está vocacionada para a protecção de pessoas e estruturas, sem restrições em altura, incluindo o seu conteúdo tais como IE e linhas de energia e telecomunicações.

Quando necessário o projecto e instalação de uma instalação de pára-raios (IPR), deve ser feito recorrendo a um modelo conveniente das DEA com suficiente rigor científico mas ainda assim fácil de usar na prática da engenharia. O modelo utilizado neste trabalho é o modelo da esfera rolante (MER), um dos modelos que cabem na conhecida designação de modelo electrogeométrico. O MER é considerado pela IEC [4] como o modelo que melhor se adequa para este tipo de prática. O MER permite a identificação dos pontos vulneráveis de uma dada estrutura a impactos de DEA. Com este conhecimento é possível desenhar a IPR mais adequada à estrutura em causa.

O método IEC para a análise do risco de danos, já referido, tem como principal óbice a necessidade

de elevado número de parâmetros de entrada e também elevado número de cálculos, o que requer muito tempo quando realizado sem recurso ao computador. A morosidade é agravada com a necessidade de proceder a diversas iterações até convergir para a solução óptima e aumenta também a probabilidade de erros de cálculo. Por outro lado, não foi encontrado nenhum programa de computador que permita a simulação em 3D do MER. É prática comum utilizar maquetas da estrutura e da esfera, à mesma escala, e verificar visualmente quais os pontos de contacto entre ambas, os quais serão os pontos vulneráveis.

Para obviar estes inconvenientes desenvolvemos um programa de computador em Visual Basic, o LPS 2008, que funciona em conjunto com o AutoCAD. O LPS 2008 é capaz de realizar a análise de risco de danos de acordo com [4], quer a estruturas quer a linhas de energia ou telecomunicações, de um modo fácil e interactivo o que permite recolher informação numérica de elementos desenhados no ambiente AutoCAD e vice-versa. O LPS 2008 é ainda capaz de simular o MER em 3D necessitando apenas que a estrutura seja modelada em 3D com os comandos do AutoCAD. O ganho em tempo de projecto é manifesto. O LPS 2008 conta com a experiência acumulada de outras versões anteriores testadas quer em meio académico, no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, quer em meio industrial.

## 2 MÉTODO

O método utilizado neste artigo para a análise de risco de danos, devidos a todos os possíveis efeitos das DEA sobre estruturas, linhas de energia e telecomunicações baseia-se na IEC 62305-2 [4]. A IEC 62305-2 é uma versão bastante revista da IEC 61662: 1995-04 e A1: 1996-05 TR 2, Ed.

O objectivo desta parte da IEC 62305 é proporcionar um procedimento de análise deste tipo de risco solidamente estabelecido. Uma vez calculado um valor para o risco de danos que ultrapasse o chamado “risco aceitável”, o método permite a selecção de diversas medidas de protecção e reavalia a situação incorporando as medidas adoptadas. O objectivo é reduzir o valor do risco de modo que este seja inferior ao risco aceitável estabelecido.

Note-se que não é objectivo dos autores explicar em detalhe, neste artigo, o método proposto pela IEC 62305-2. Para os leitores interessados nos detalhes os autores recomendam a leitura atenta da IEC 62305-2.

Deste modo, a explicação que segue deve ser entendida como uma introdução mínima que proporcione o conhecimento essencial para a apresentação do programa LPS 2008.

As DEA, e em particular as descargas nuvem-terra, são consideradas fontes de danos.

As fontes de danos dividem-se em:

- S1 – DEA que atinge directamente uma estrutura;
- S2 – DEA que atinge o solo perto de uma estrutura e/ou perto de uma linha de energia ou telecomunicações ligada à estrutura;
- S3 – DEA que atinge directamente uma linha de energia ou telecomunicações;
- S4 – DEA que atinge o solo perto de uma linha de energia ou telecomunicações ou directamente a uma estrutura ligada à linha.

As DEA podem ser perigosas para os seres vivos, estruturas variadas, edifícios, redes de energia ou telecomunicações e causar os seguintes danos:

- D1 – ferimentos em seres vivos que se encontrem dentro ou nas proximidades de edifícios/estruturas;
- D2 – danos em edifícios/estruturas e no seu conteúdo;
- D3 – avarias em sistemas eléctricos e electrónicos.

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.

Os danos podem não se limitar ao ponto de impacto, mas afectar também a vizinhança num raio de 2 km. Cada tipo de danos, só ou combinado com outros, pode produzir uma perda diferente no objecto que se pretende proteger.

O tipo de perda que pode aparecer depende das características do edifício/estrutura em si e do seu conteúdo.

Os seguintes tipos de perdas devem ser tomados em consideração:

- L1 – Perda de vida humana;
- L2 – Perda de serviços de interesse público;
- L3 – Perda de património cultural;
- L4 – Perda de valor económico (edifício e seu conteúdo, serviços e perda de produção).

De modo a reduzir as perdas devidas às DEA devem ser instaladas medidas de protecção adequadas.

A escolha das medidas de protecção a adoptar deve ser determinada pelo resultado de uma análise de risco rigorosa.

O risco é definido em [4] como sendo a perda média anual numa estrutura ou serviço devida aos efeitos das DEA e depende:

- da frequência de ocorrência - número anual de DEA que influencia edifícios/estruturas e/ou serviços;
- da probabilidade de uma DEA com influência nos edifícios/estruturas e/ou serviços causar danos;
- do valor económico resultante da perda.

A frequência de ocorrência de DEA que pode influenciar edifícios/estruturas e serviços depende das suas características dimensionais e ambientais, mas também da densidade de DEA na região ( $N_g$ ).

A probabilidade de danos depende das características dos edifícios/estruturas e serviços, das características da corrente da DEA e da eficiência das medidas de protecção implementadas. O valor económico anual resultante da perda depende da extensão dos danos e dos consequentes efeitos. As medidas de protecção, dependendo da sua eficácia, podem reduzir a probabilidade de danos ou o valor económico resultante da perda.

O risco  $R$  é calculado em [4] utilizando a seguinte expressão:

$$R = (1 - e^{-N \cdot P \cdot t}) \cdot L \quad (1)$$

em que  $N$  é a frequência de ocorrência anual de DEA que influencia edifícios/estruturas e/ou serviços;  $P$  é probabilidade de uma DEA com influência nos edifícios/estruturas e/ou serviços causar danos;  $L$  é o valor económico resultante da perda; e  $t$  é o período de análise que em geral se considera ser um ano.

Dado que  $N \cdot P \cdot t \ll 1$ , a expressão (1) pode ser simplificada:

$$R = N \cdot P \cdot L \cdot t \quad (2)$$

O risco deve ser calculado para cada tipo de perda de L1 a L4.

As componentes do risco que devem ser calculadas para edifícios/estruturas são:

- R1 – Risco de perda de vida humana;
- R2 - Risco de perda de serviços de interesse público;
- R3 – Risco de perda de património cultural;
- R4 – Risco de perda de valor económico.

As componentes do risco que devem ser calculadas para redes de serviços, energia e telecomunicações são:

- R'1 – Risco de perda de vida humana;
- R'2 - Risco de perda de serviços de interesse público;
- R'3 – Risco de perda de valor económico.

Para calcular  $R$  as componentes mais relevantes do risco devem ser definidas e calculadas.

O valor de  $R$  resulta da soma de todas as componentes calculadas.

É da responsabilidade da autoridade nacional de cada país definir o risco aceitável  $R_T$  para cada tipo de perda. Caso não exista essa definição, e tal é o caso de Portugal, podem-se utilizar os valores representativos de [4], conforme se pode observar na Tabela 1.

Perda de vida humana	$10^{-5}$
Perda de serviços de interesse público	$10^{-3}$
Perda de património cultural	$10^{-3}$

Tabela 1: Valores a considerar para  $R_T$ .

Para mais detalhes sobre a origem destes valores deve ser consultada a BS 6651-1985, bem como outras publicações relevantes sobre estatísticas de acidentes.

O método para avaliar a necessidade de implementar medidas de protecção adicionais deve considerar os seguintes passos:

- Identificar as componentes  $R_i$  constituintes do risco  $R$ ;
- Calcular o valor de cada uma das componentes de risco;
- Calcular o valor de  $R$ ;
- Identificar o valor adequado de  $R_T$ ;
- Comparar os valores de  $R$  e  $R_T$ .

Se  $R \leq R_T$ , não são necessárias medidas de protecção adicionais. Se  $R > R_T$ , são necessárias medidas de protecção adicionais de modo a reduzir o valor do risco até  $R \leq R_T$ .

O método usado no LPS 2008 para identificar os pontos mais vulneráveis de serem atingidos por DEA, em edifícios/estruturas, é o MER, o qual também é adoptado pela IEC 62305.

O MER é um caso particular do conhecido modelo electrogeométrico. No MER, o raio da esfera (equivalente ao comprimento do salto final) está relacionado com o valor de pico da corrente  $I$  da DEA. A expressão matemática experimental (3) foi obtida em [5], e relaciona o raio da esfera com o pico da corrente da DEA.

$$r = 10 \cdot I^{0,65} \quad (3)$$

A determinação dos pontos vulneráveis de serem atingidos por DEA, em edifícios/estruturas, é fundamental para conceber uma IPR eficaz.

### 3 PROGRAMA LPS 2008

O método proposto em [4] para a análise de risco devido às DEA nuvem-terra requer um considerável número de parâmetros de entrada.

Os parâmetros seguintes (apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4) são necessários:

Parâmetro	Símbolo
Dimensões (m)	(L.W.Hb)
Factor de localização	$C_d$
IPR	$P_B$
IPR "shied"	$K_{SI}$
Densidade de DEA	$N_g$

Tabela 2: Características do edifício/estrutura.

Parâmetro	Símbolo
Comprimento (m)	$L_c$
Aéreo/subterrâneo	-
Altura (m)	-
Transformador	$C_t$
Factor de localização	$C_d$
Factor ambiental	$C_e$
Blindagem da linha	$P_{LD} / P_{LI}$
Precauções com a instalação	$K_{S3}$
Tensão suportada pelo equipamento $U_w$	$K_{S4}$
Dispositivos de protecção contra sobretensões	$P_{SPD}$
Dimensões do edifício/estrutura no extremo "a" (m)	(L.W.Ha)
Factor de localização do edifício/estrutura "a"	$C_{da}$

Tabela 3: Características das instalações eléctricas e de telecomunicações.

Parâmetro	Símbolo
Tipo de solo	$r_a$
Risco de incêndio	$r$
Perigo anormal	$h$
Protecção contra incêndio	$r_f$
Protecção de pessoas	$P_A$
Blindagem	$K_{S2}$
Sistemas internos	-
Perda por tensão de contacto e de passo	$L_t$
Perda por danos físicos	$L_f$
Perda por avaria nos sistemas internos	$L_o$

Tabela 4: Características das zonas  $Z_x$  consideradas.

Uma vez conhecidos todos os parâmetros (apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4), são necessárias operações de cálculo e comparações de modo a obtermos o resultado com o valor de  $R$ .

Muitos engenheiros e técnicos consideram este método pouco prático, uma vez que ele requer modelos tridimensionais (3D) dos edifícios, cálculo de áreas com formas complexas e elevado número de cálculos. Por todas estas razões é altamente recomendável a utilização de um computador pessoal, com o qual se possam realizar todas as tarefas com incomparável rapidez e precisão.

A IEC compreendeu este problema e desenvolveu um programa de computador, o SIRAC, o qual é referido na norma IEC 62305-2.

O SIRAC acelera o processo e evita erros de cálculo. No entanto, não dispõe de ferramentas para ajudar o projectista a desenhar e calcular as áreas anteriormente referidas, não é capaz de efectuar a simulação do MER e não contempla todas as situações referidas na IEC 62305-2.

De modo a responder e ultrapassar estas limitações foi desenvolvido em Visual Basic para AutoCAD o programa Lightning Protection Systems (LPS) 2008.

O LPS 2008 está completamente adaptado à nova IEC 62305-2, pode ser usado com qualquer versão do AutoCAD, desde o AutoCAD 2000, permite a criação fácil de modelos 3D, disponibiliza ferramentas para desenhar com rapidez as áreas de influência dos edifícios/estruturas, e calcula num instante qualquer contorno fechado. O LPS 2008 possibilita ainda a simulação do MER em computador, assinalando todos os pontos vulneráveis de edifícios/estruturas para o nível de protecção pretendido conforme proposto em [4].

O LPS 2008 interage com o ambiente de desenho do AutoCAD e facilmente extrai valores numéricos de objectos desenhados, tais como comprimento, áreas, coordenadas, etc. O LPS 2008 também realiza a função inversa, isto é, com base em valores numéricos introduzidos ou internamente calculados, desenha automaticamente objectos 2D e 3D no ambiente de modelação do AutoCAD.

Depois de efectuada a análise de risco anterior, o projectista conhece o nível de protecção mais adequado, que deve utilizar na concepção de um sistema de protecção contra DEA para o edifício/estrutura em causa.

Estão previstos quatro níveis de protecção em [4]. Ao nível de protecção I, mais elevado, corresponde um raio de 20 m para a esfera fictícia e uma probabilidade de danos de apenas 2%, em caso de impacto directo de uma DEA sobre o edifício/estrutura. O raio da esfera fictícia aumenta para 60 m e a probabilidade de danos aumenta para 20% no caso do nível de protecção IV. Considera-se 100% no caso de inexistência de IPR.

O LPS 2008 permite ao projectista seleccionar o nível de protecção desejado, ajustar a resolução do varrimento de modo independente em  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , conhecer as dimensões do edifício/estrutura seleccionando três pontos do modelo 3D, e simular o MER. Durante a simulação do MER o LPS 2008 cria objectos 3D no desenho AutoCAD que assinalam os pontos vulneráveis em função do nível de protecção seleccionado. O projectista pode agora conceber a IPR mais adequada ao edifício/estrutura, protegendo todos os pontos vulneráveis resultantes da simulação.

## 4 RESULTADOS

Como caso de estudo foi escolhida uma torre eólica com 70 m de altura e uma turbina com o diâmetro de rotor de 82 m e 2 MW de potência. A Figura 1 representa a torre eólica descrita. A torre foi considerada instalada na serra da Gardunha, distrito de Castelo Branco.

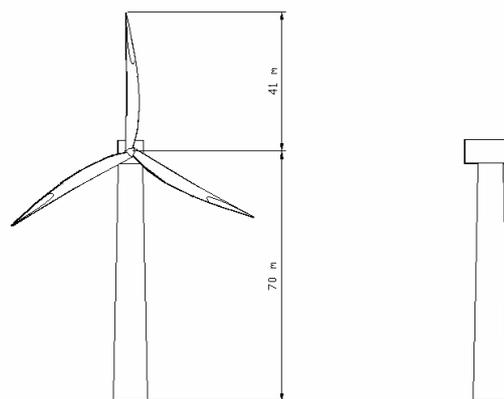


Figura 1: Modelo 3D da turbina eólica considerada.

A análise de risco efectuada com o LPS 2008 demonstrou a necessidade de serem aplicadas medidas de protecção contra DEA e sobretensões transitórias, de modo a reduzir o risco de danos para valores inferiores ao risco aceitável.

A simulação do MER foi aplicada a esta estrutura e, apesar do resultado para o nível de protecção ter sido o nível de protecção I, pretendeu-se aqui também apresentar a simulação para o nível de protecção IV, de modo a possibilitar a comparação.

Na Figura 2 pode observar-se o resultado da simulação do MER. Os pontos assinalados na turbina são os pontos vulneráveis e susceptíveis de serem atingidos por DEA directamente.

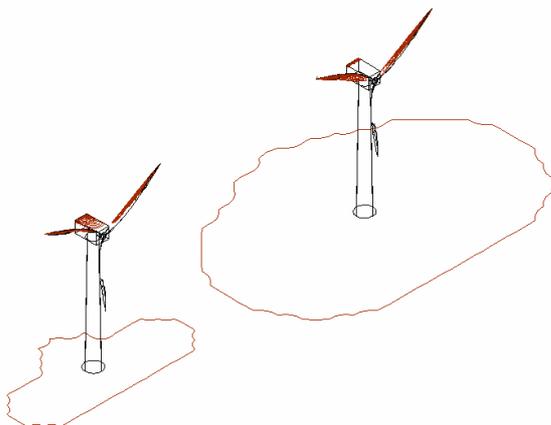


Figura 2: Resultado da simulação do MER com o LPS 2008 para os níveis de protecção I e IV.

A linha de contorno no solo representa o limite entre a zona de protecção OA, situada para fora dessa linha e na qual é possível a um qualquer objecto sofrer um impacto directo, e a zona de protecção OB, situada no interior dessa linha, onde tal não será possível.

## 5 CONCLUSÕES

Apresentou-se o novo programa LPS 2008. O LPS 2008 destina-se à realização da análise de risco de danos, causados por DEA, em edifícios/estruturas, linhas de energia e/ou telecomunicações, à simulação do MER e à concepção de sistemas de protecção contra DEA. O LPS 2008 baseia-se na mais recente normalização internacional e, em particular, na IEC 62305-2.

O LPS 2008 realiza a análise de risco de danos de acordo com o método proposto na IEC 62305-2. O LPS 2008 permite ainda a comparação de resultados com a BS 6651 e a IEC 61662, mais antigas.

O LPS 2008 utiliza o AutoCAD com ferramenta de desenho assistido por computador para modelar objectos 2D e 3D. Esta característica e o seu código, desenvolvido especificamente para este efeito, torna-o único ao ponto de não ser conhecido outro programa que realize a simulação assistida por computador do MER. O LPS 2008 evita assim maquetas em escala reduzida e reduz drasticamente o tempo necessário de projecto.

O LPS 2008 é uma ferramenta fácil de utilizar, que se adapta a todas as situações que envolvam a protecção contra DEA.

## REFERÊNCIAS

- [1] Holle R.L., 2001. U.S. lightning deaths, injuries and damages in the 1890s compared to 1990s, NOAA Technical Memorandum OAR NSSL-106, Oklahoma, USA.
- [2] Alonso, M.A. e Blas, H.A., 2000. An evaluation of lightning effects and economic costs in Navarra (Spain) from 1959 to 1999, *in Proc. of 25th International Conference on Lightning Protection*, Rhodes, Greece.
- [3] Glushakow B., 2007. Effective lightning protection for wind turbine generator, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 22, p. 214-222.
- [4] IEC 62305-2, 2006. Protection against lightning - Part 2: Risk management.
- [5] IEEE PES Transmission and Distribution Committee, 1992. Working group on estimating the lightning performance of transmission lines, USA.