

# Análise de ventos extremos em distribuições de Weibull

Altina Ribeiro<sup>(1)</sup>, Ricardo Guedes<sup>(1)</sup>, Paulo Pinto<sup>(2)</sup>, Miguel Ferreira<sup>(1,3)</sup>

<sup>1</sup>MEGAJoule – Consultoria em Energias Renováveis  
Rua Eng. Frederico Ulrich, 2650 4470-605 Moreira da Maia - PORTUGAL  
Tel: +351 220 915 480 Fax: +351 229 488 166 email: megajoule@megajoule.pt

<sup>2</sup>IPB – Instituto Politécnico de Bragança  
Quinta de Santa Apolónia, Apartado 134 5300 Bragança - PORTUGAL  
Tel: +351 273 303 154 Fax: +351 273 313 051 email: pp@ipb.pt

<sup>3</sup>UMP – Universidade Moderna do Porto  
Rua Augusto Rosa, 24 4000-098 Porto - PORTUGAL  
Tel: +351 222 073 230 Fax: +351 221 026 039 email: mferreira@umoderna.pt

## Resumo

O desempenho de um aerogerador depende da correcta adequação das suas características estruturais ao local para onde se prevê a sua instalação. A norma internacional IEC 61400-1 define diversas classes de segurança resultantes das solicitações que os equipamentos deverão suportar. Essas classes são determinadas em função de determinados parâmetros característicos do regime de ventos à altura do rotor. Destes parâmetros, a velocidade máxima esperada para um período de 50 anos assume especial importância, quer pela particular dificuldade na sua determinação, quer pelo papel crucial que pode desempenhar na classificação dos aerogeradores. Existem ferramentas estatísticas para a extrapolação de eventos extremos, nomeadamente as baseadas nas metodologias de *Gumbel*. Sendo consensual que as séries cronológicas da velocidade do vento são também descritas de forma muito aceitável com base numa outra distribuição estatística, a distribuição de *Weibull*, é fácil fundamentar o interesse na aplicação desta mesma distribuição para a determinação de velocidades extremas.

O presente trabalho consistiu no estudo das estimativas de valores extremos da velocidade do vento efectuadas a partir da distribuição de *Weibull* culminando na organização gráfica dos resultados e interpretações consequentes. Procurou-se demonstrar o mérito desta abordagem por aplicação a casos de estudo e, até certo ponto, validar os resultados por comparação com uma metodologia de referência.

**Palavras-chave:** Ventos extremos, Classes IEC, Distribuições de *Gumbel* e *Weibull*

## 1. Introdução

A classificação de segurança dos aerogeradores é uma disciplina indispensável no planeamento de um aproveitamento eólico. As solicitações a que uma turbina estará sujeita podem obrigar a opções mais conservadoras, em prejuízo da sua produtividade. A problemática das características do vento para as quais um aerogeradores deve ser projectado é abordada pela Norma IEC61400 – 1, referência mais conhecida sobre esta matéria [1]. As quatro classes de segurança aí definidas dividem as solicitações de acordo com intervalos de características do vento, à altura de instalação do rotor,

nomeadamente no que se refere aos valores de velocidade extrema a 50 anos, velocidade média anual e intensidade de turbulência.

TABELA I – CLASSES DE SEGURANÇA IEC 61400 – PARTE 1

Classes subclasses	I		II		III		IV	
	A	B	A	B	A	B	A	B
Vel. máxima a 50 anos [m/s]	50,0		42,5		37,5		30,0	
Vel. média [m/s]	10,0		8,5		7,5		6,0	
Intensidade de turbulência a 15 m/s [%]	18	16	18	16	18	16	18	16

Para além das classes apresentadas (tabela I) é ainda compreendida a chamada classe S, onde se enquadram aerogeradores projectados para solicitações que não se associam a qualquer uma das quatro classes definidas.

Dos parâmetros em jogo, a velocidade máxima esperada para períodos de 50 anos é, sem dúvida, aquele cujo nível de incerteza nas estimativas é superior. A sua estimativa obriga ao recurso a técnicas de extrapolação sofisticadas e aconselha ao recurso a conjuntos de dados extensos, tipicamente superiores a 10 anos, que em geral não estão disponíveis.

Actualmente, as metodologias de extrapolação que derivam da distribuição de *Gumbel* são as mais utilizadas. Por outro lado, é consensual que o regime médio de velocidades do vento é descrito de forma muito aceitável por distribuições de *Weibull*. A aplicação dessa distribuição encontra-se disseminada pela maior parte das referências teóricas ou normativas desta área e por quase todas as ferramentas a que os projectistas e analistas recorrem (com especial enfoque nos programas de simulação do escoamento atmosférico mais utilizados).

Com este trabalho pretendeu-se avaliar os valores extremos extrapolados a partir de distribuições de *Weibull* e a sua aplicação ao caso das intensidades do vento. Pretende-se com tal informação permitir, de forma mais directa e eficaz, uma primeira avaliação das velocidades máximas expectáveis para um determinado regime de vento, especialmente em casos em que a informação é demasiado escassa para que haja vantagem no recurso a outros métodos mais aprofundados. Procurou-se avaliar as limitações decorrentes dessa aplicação e apresentar as conclusões resultantes.

## 2. Distribuições de valores extremos

A análise dos valores extremos em amostras de variáveis estocásticas é usualmente efectuada com recurso a uma família de distribuições que é conhecida como *Distribuição Generalizada do Valor Extremo*. As distribuições de *Weibull*, *Fréchet* e *Gumbel* são três casos particulares desta distribuição<sup>1</sup> [2]. As expressões seguintes apresentam as funções densidade de probabilidade de *Weibull* (1) e *Gumbel* (2) [2].

$$W(x) = e^{-\left(\frac{x}{A}\right)^k} \quad (1)$$

$$G(x) = e^{-e^{-\frac{x-\psi}{\mu}}} \quad (2)$$

<sup>1</sup> De acordo com a teoria de valores extremos de *Fisher-Tippett* existem três tipos de distribuições de valores extremos, Tipo I, ou de *Gumbel*, tipo II, ou de *Fréchet* e Tipo III, ou de *Weibull*. No entanto trabalhos posteriores desenvolvidos por *Jenkinson*, consideram estas distribuições assintóticas como casos particulares de uma *Distribuição Generalizada de Valor Extremo* [2].

Com  $A$ ,  $k$  e  $\psi$ ,  $\mu$  factores de escala e de forma das distribuições de *Weibull* e de *Gumbel*, respectivamente.

Embora este seja ainda um assunto em debate, a distribuição de *Gumbel* é tradicionalmente a mais utilizada para descrever regimes extremos de variáveis climatéricas, em especial de velocidades do vento. No entanto, a informação exigida para a aplicação desses métodos carece de registos cronológicos de dados climatéricos, preferencialmente de extensão superior a 10 anos, e pressupõe a definição, várias vezes empírica, de ocorrências extremas de vento, caso a caso. Um método muito utilizado é o denominado método de *Gumbel* modificado, recorrendo adicionalmente à técnica de selecção de ocorrências por *peak over threshold* [2]. Não existem muitas referências que abordem a questão da incerteza associada à extrapolação de ocorrências de distribuições de *Gumbel* para períodos alargados. Ainda assim, algumas referências baseadas em dados de vento de Portugal Continental apontam para valores que podem variar entre 4 % e 7 % para períodos de extrapolação entre 2 e 10 anos, sabendo que a incerteza será tanto mais grave quanto menor for o período de dados utilizado para estimativa [3, 4], e mais longo o período de extrapolação.

Por sua vez, a distribuição de *Weibull* descreve de forma muito aceitável os regimes médios de velocidades do vento, considerando a globalidade das ocorrências [5]. Embora inicialmente definida para também representar ocorrências extremas [2], desde a publicação dos trabalhos desenvolvidos no âmbito do “Atlas Europeu do Vento” que, na avaliação do potencial eólico, os regimes de vento são caracterizados por esta distribuição [5].

A extrapolação de extremos para qualquer uma destas distribuições depende da definição de período ou tempo de retorno, sendo este o intervalo de tempo mínimo que decorre entre dois acontecimentos extremos. Para um tempo de retorno,  $\tau$ , definido em anos considera-se, de acordo com a literatura, a seguinte expressão:

$$\tau = \frac{1}{1-H(x)} \frac{M}{m} \quad (3)$$

Sendo  $H(x)$  a função densidade de probabilidade,  $m$  o número de observações que a distribuição descreve e  $M$  o período de anos a que essas observações se referem.

Da equação (3) resolvida em ordem à variável  $x$  (que para os casos em apreço corresponde a valores de velocidade do vento), obtém-se o valor máximo esperado para uma população descrita pela distribuição e para o tempo de retorno considerado. Assim, a combinação das expressões (1) e (3) resulta na expressão (4) que possibilita o cálculo do valor máximo de  $x$  esperado para uma população descrita por uma distribuição de *Weibull*, com factores  $A$  e  $k$ , num período de retorno de  $\tau$ .

$$x_{\max} = A \left( -\ln \left( 1 - \frac{M}{m} \times \frac{1}{\tau} \right) \right)^{\frac{1}{k}} \quad (4)$$

### 3. Extrapolação de ocorrências extremas para distribuições de *Weibull*

A expressão (4) foi aplicada para uma gama de distribuições de *Weibull* com factores de escala,  $A$ , compreendidos entre 3 e 13 m/s, factores de forma,  $k$ , de 1,00 a 3,00 e considerando o tempo de retorno referido na norma IEC, 50 anos. A figura 1 apresenta os resultados, onde se salientaram os limites dispostos nas classes IEC. Na figura representam-se igualmente os valores médios da velocidade das distribuições.

A evolução ao longo das gamas de  $A$  e  $k$  não surpreende quem está familiarizado com a distribuição de *Weibull*. Para factores de forma constantes, os valores extremos

aumentam no sentido do aumento do valor do factor de escala, em virtude da “deslocação” da distribuição para valores mais altos de velocidade. Para parâmetros  $A$  constantes, a diminuição do factor de forma, que significa uma maior dispersão da população para níveis acima do valor médio, leva a um aumento dos valores extremos. A partir dos resultados da figura 1 pode ser elaborada uma “Carta” das classes IEC correspondentes a cada par  $A$  e  $k$ , desde que para isso sejam tidos também em conta os valores médios da velocidade correspondentes, em cada caso. A figura 2 ilustra o referido.

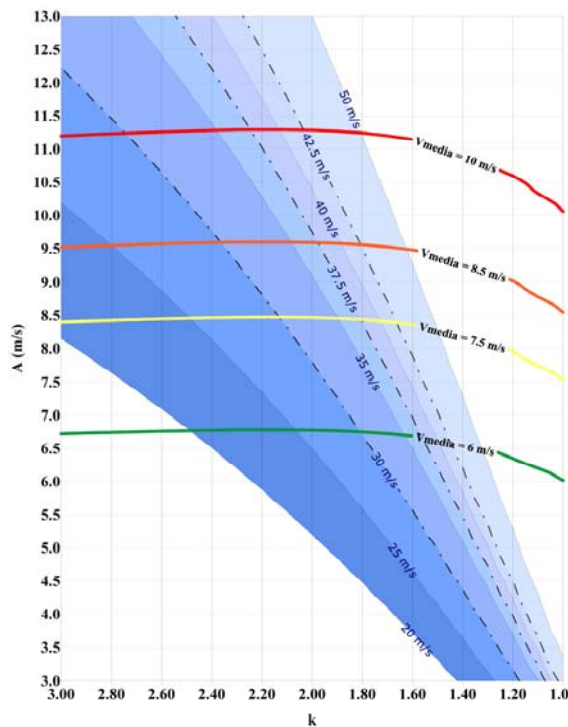


Fig. 1 - Velocidades médias e extremas a 50 anos para distribuições de *Weibull*

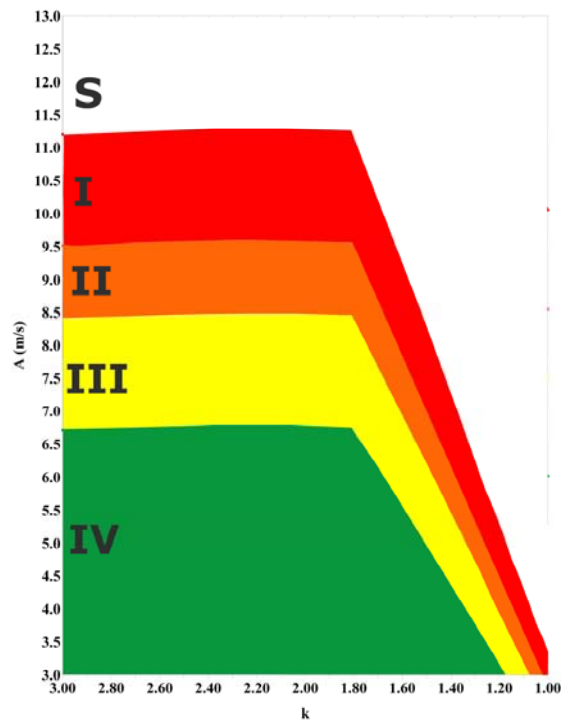


Fig. 2 - “Carta” de classes IEC para distribuições de *Weibull*

Conforme se verifica, para valores de factor de forma superiores a 1,80 são as velocidades médias que limitam a escolha das classes de aerogeradores. Perante factores de forma inferiores a esse valor as velocidades extremas impõem a adopção de uma classe mais conservadora aquela já imposta pela velocidade média.

#### 4. Casos de teste

O recurso à distribuição de *Weibull* para extrapolar valores extremos de velocidade, e consequente classificação segundo a norma IEC, foi testado com dados de 13 estações de medição localizadas em Portugal Continental. Para avaliação dos resultados, consideraram-se como referência os resultados obtidos da aplicação de metodologias derivadas da distribuição de *Gumbel*. Em nenhum dos casos o período de registos é superior a três anos. Foram extrapolados valores para períodos de retorno de 50 anos. O método alternativo considerado foi o denominado método de *Gumbel* modificado, com a técnica de “filtragem” de dados de *peak over treshhold*. Foram efectuadas várias estimativas, para diferentes valores do limite inferior de velocidade, *treshhold*, sendo tomada para comparação a média desses resultados.

Os resultados são apresentados nas figuras seguintes, quer em termos das velocidades estimadas (fig. 3), quer em termos dos desvios entre as estimativas de *Weibull* em relação às de *Gumbel* (fig. 4). Na tabela II mostra-se a classificação IEC correspondente em cada caso, considerando também as velocidades médias do regime de ventos.

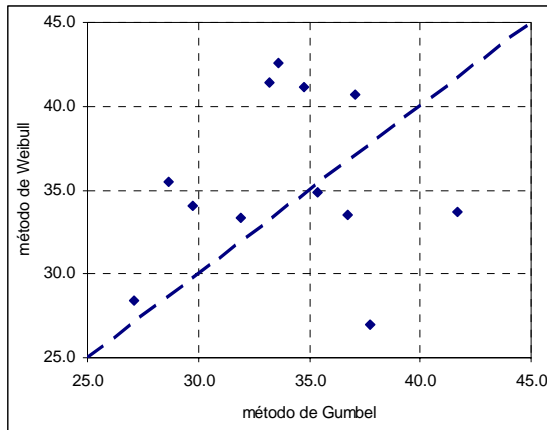


Fig. 3 - Valores extremos extrapolados

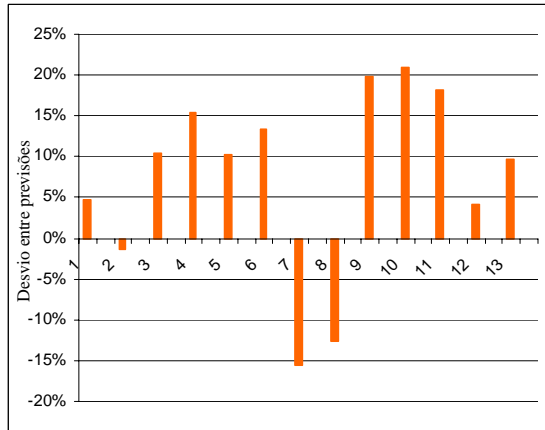


Fig. 4 - Desvios dos valores extremos distribuição de *Weibull* vs *Gumbel*

TABELA II – CLASSES IEC APURADAS

Classe IEC	Estações												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Método de <i>Gumbel</i>	III	III	II	III	III	III	II	II	III	III	III	III	II
Método de <i>Weibull</i>	III	III	I	II	II	III	II	III	II	I	III	III	II

Os desvios apresentados para muitos dos casos são consideráveis. O desvio médio da estimativa de *Weibull* foi de 12 %, situando-se todos os valores entre +21 % e -15,5 %. Ainda assim, tendo em conta os valores de incerteza que geralmente se assume para a aplicação de metodologias de *Gumbel*, os desvios assinalados estão dentro da gama de variação originada pela incerteza. Outro aspecto a salientar é o facto de, em apenas dois casos haver uma clara sub estimativa do valor extremo em relação à estimativa de referência. Assim, na maioria dos casos, as estimativas de *Weibull* resultam mais conservadoras, em favor da segurança na opção da tecnologia. A mesma conclusão se retira ao atentar-se à tabela II. Aí, em apenas um dos casos as estimativas de *Weibull* se traduzem em resultados menos conservadores.

## 5. Conclusões

O recurso a valores extremos extrapolados por distribuições de *Weibull* pode ser, do ponto de vista do projectista muito interessante, ao permitir uma interpretação mais expedita das variáveis em jogo na classificação IEC e mesmo para a mais pronta escolha da classe adequada.

Contudo, do trabalho apresentado, fica igualmente a ideia de que as incertezas poderão não ser desprezáveis. Ainda assim, a extrapolação de extremos a partir de distribuições de *Weibull* quando comparada com o resultado de metodologias de *Gumbel*, usadas como referência, mostram uma tendência para a sobre estimativa dos valores extremos, remetendo esses resultados para o “lado” da segurança. Mais ainda, quando para análise

estão em causa períodos de dados de extensão reduzida, os desvios aproximam-se da ordem de grandeza semelhante à da incerteza das metodologias de referência.

Em face das dúvidas que a análise suscita, os resultados têm de ser lidos com prudência, e o uso de técnicas mais aprofundadas não deverá, à partida, ser rejeitado. Contudo espera-se que, em casos em que o factor de forma que descreve o regime de ventos se situa acima de 1,80, ou quando a reduzida extensão dos dados disponíveis não permita melhorias significativas nas estimativas com outras técnicas, esse investimento se venha a revelar infrutífero, não contribuindo para alterar a classificação já determinada.

A validação e a generalização da utilização da “carta” de ventos extremos aqui proposta pressupõem o aprofundamento da validade da metodologia, analisando os resultados da sua aplicação para novos casos e para períodos de dados de longa duração.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Norma Internacional IEC 61400-1
- [2] Ana Guajardo, "Análisis, modelación y predicción de episodios de sequía". Univ. Zaragoza.
- [3] Fernandes *et al*, "Variantes da Metodologia de *Gumbel* na determinação de ventos extremos classes dos aerogeradores". ENER'04, Simpósio sobre Energias Renováveis em Portugal, Vol1, pp1.151-1.156, Maio de 2004, Figueira da Foz, Portugal.
- [4] E. Simiu & R. Scanlan, "Wind effects on structures". Wiley-Interscience, 1986.
- [5] Ib Troen & Eric Petersen, "European Wind Atlas". 1989, Dinamarca.
- [6] E. J. Gumbel, "Statistics of Extremes". 1958, Columbia University Press.
- [7] E. Simiu *et al*, "Wind load estimates based on *Gumbel* distribution of dynamic pressures: an assessment". Structural Safety, Vol 23, No.3, 221-229, 2001.