

# Cálculo de Velocidad de Referencia para Vientos Extremos



Autor: Alberto González Almuiña

# Índice

<b>1. Vientos Extremos</b>	<b>1</b>
1.1. La norma IEC 61400-1 Ed.3 . . . . .	1
1.1.1. Extreme Wind Speed Model (EWM) . . . . .	2
1.1.2. Extreme Operating Gust (EOG) . . . . .	3
1.1.3. Extreme Direction Change (EDC) . . . . .	5
1.1.4. Extreme Coherent Gust with Direction Change (ECD) . . . . .	6
1.2. Métodos de cálculo de $V_{ref}$ . . . . .	7
1.2.1. Algoritmos EWTS . . . . .	7
1.2.2. Distribución de valores extremos generalizada (GEV) . . . . .	8
1.2.3. Método de Plotting Positions . . . . .	9
1.2.4. Método del Período Máximo . . . . .	10
1.2.5. Método de las Tormentas Independientes . . . . .	12
1.3. Función Vext . . . . .	14

# 1. Vientos Extremos

Uno de los aspectos fundamentales a la hora de seleccionar un aerogenerador es la caracterización del régimen de vientos extremos en el emplazamiento. Estos vientos pueden causar un exceso de cargas sobre la máquina, lo que conlleva un mal funcionamiento de la misma o incluso la rotura de alguna de sus partes. Es importante diferenciar entre dos tipos de vientos extremos en función de la escala temporal: por un lado, se tiene la escala diezminutal, en la que se suelen tomar las medidas habitualmente. Estos extremos son más fáciles de asimilar por los mecanismos del aerogenerador, como puede ser el pitch, que protege a la máquina. Por otro lado, se tiene la escala segundal, vientos que pueden cambiar bruscamente de dirección y/o velocidad y pueden afectar a la estructura interna debido a las cargas producidas por fatiga. En esta sección se introducen los modelos propuestos por la norma IEC y nos centramos en el primero de ellos (modelo de velocidades extremas), dejando los otros tres modelos para una sección aparte. Las velocidades extremas se calculan por diversos métodos y finalmente se hace una comparación con lo predicho por la norma.

## 1.1. La norma IEC 61400-1 Ed.3

La norma IEC trata de estandarizar las definiciones y procedimientos necesarios para el correcto diseño y funcionamiento de un aerogenerador durante la vida útil del mismo. En el terreno de los vientos extremos, la norma aporta cinco modelos que se mencionan a continuación:

1. Extreme Wind Speed Model (EWM)
2. Extreme Operating Gust (EOG)
3. Extreme Direction Change (EDC)
4. Extreme coherent gust with direction change (ECD)
5. Extreme Wind Shear (EWS)

En este trabajo nos hemos centrado en los cuatro primeros ya que hemos considerado que son los de más interés para esta tesis. A continuación se hace una pequeña introducción de cada uno de ellos, explicando brevemente en qué consisten y cuáles son las ecuaciones matemáticas que los sustentan.

### 1.1.1. Extreme Wind Speed Model (EWM)

Este modelo puede ser tanto estable como turbulento y se basa en la velocidad de referencia ( $V_{ref}$ : velocidad máxima diezminutal con un período de retorno de 50 años a altura de buje) y en una desviación estándar fija ( $\sigma_1 = 0,11 \cdot V_{hub}$ ) para definir cuatro variables en función de la altura  $z$ , que se introducen a continuación:

- $V_{e50}(z)$ : velocidad media máxima segundal con un período de retorno de 50 años
- $V_{e1}(z)$ : velocidad media máxima segundal con un período de retorno de 1 año
- $V_{50}(z)$ : velocidad media máxima diezminutal con un período de retorno de 50 años
- $V_1(z)$ : velocidad media máxima diezminutal con un período de retorno de 1 año

A continuación se muestran las ecuaciones dadas por la norma para su cálculo y una tabla con las clases estandarizadas por la norma:

$$V_{e50}(z) = 1,4 \cdot V_{ref} \cdot \left( \frac{z}{z_{hub}} \right)^{0,11} \quad (1)$$

$$V_{e1}(z) = 0,8 \cdot V_{e50}(z) \quad (2)$$

$$V_{50}(z) = V_{ref} \cdot \left( \frac{z}{z_{hub}} \right)^{0,11} \quad (3)$$

$$V_1(z) = 0,8 \cdot V_{50}(z) \quad (4)$$

La norma también aporta unos valores de referencia para la velocidad e intensidad de turbulencia máximos que debe soportar cada clase de aerogenerador (A,B o C) en base al emplazamiento. Se pueden ver estos valores en la siguiente tabla:

Wind turbine class		I	II	III	S
$V_{\text{ref}}$	(m/s)	50	42,5	37,5	Values specified by the designer
A	$I_{\text{ref}}$ (-)	0,16			
B	$I_{\text{ref}}$ (-)	0,14			
C	$I_{\text{ref}}$ (-)	0,12			

Figura 1: Valores de referencia para las clases de turbina

### 1.1.2. Extreme Operating Gust (EOG)

En este modelo, la norma predice la ocurrencia de ráfagas simétricas. La velocidad del viento llega en torno a una velocidad constante para descender ligeramente, posteriormente subir hasta alcanzar un pico máximo, volver a descender y finalmente subir ligeramente hasta volver a la velocidad inicial. La norma define una magnitud de ráfaga a altura de buje ( $V_{gust}$ ) que dependerá de la clase de la turbina.

Se define matemáticamente el valor de  $V_{gust}$  dado por la norma IEC del siguiente modo:

$$V_{gust} = Min \left\{ 1,35 \cdot (V_{e1} - V_{hub}); \quad 3,3 \cdot \left( \frac{\sigma_1}{1 + 0,1 \cdot \left( \frac{D}{\Lambda_1} \right)} \right) \right\} \quad (5)$$

dónde:

- $V_{hub}$ : Velocidad a altura de buje
- $\sigma_1 = I_{ref} \cdot (0,75 \cdot V_{hub} + b)$ ;  $b = 5,6$  m/s
- $D$ : Diámetro del rotor de la turbina
- $\Lambda_1$ : Parámetro de escala, definido como sigue:

$$\Lambda_1 = \begin{cases} (0,7 \cdot z) m & z \leq 60 \\ 42m & z \geq 60 \end{cases} \quad (6)$$

Se muestra a continuación la ecuación que nos da el cambio de velocidad temporal:

$$V(z, t) = \begin{cases} V(z) - 0,37 \cdot V_{gust} \cdot \sin\left(\frac{3 \cdot \pi \cdot t}{T}\right) \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T}\right)\right) & \forall 0 \leq t \leq T \\ V(z) & \text{Otro caso} \end{cases} \quad (7)$$

dónde  $V(z)$  es la velocidad a una determinada altura  $z$  dada por la ley potencial del viento, definida como sigue:

$$V(z) = V_{hub} \cdot \left( \frac{z}{z_{hub}} \right)^\alpha \quad (8)$$

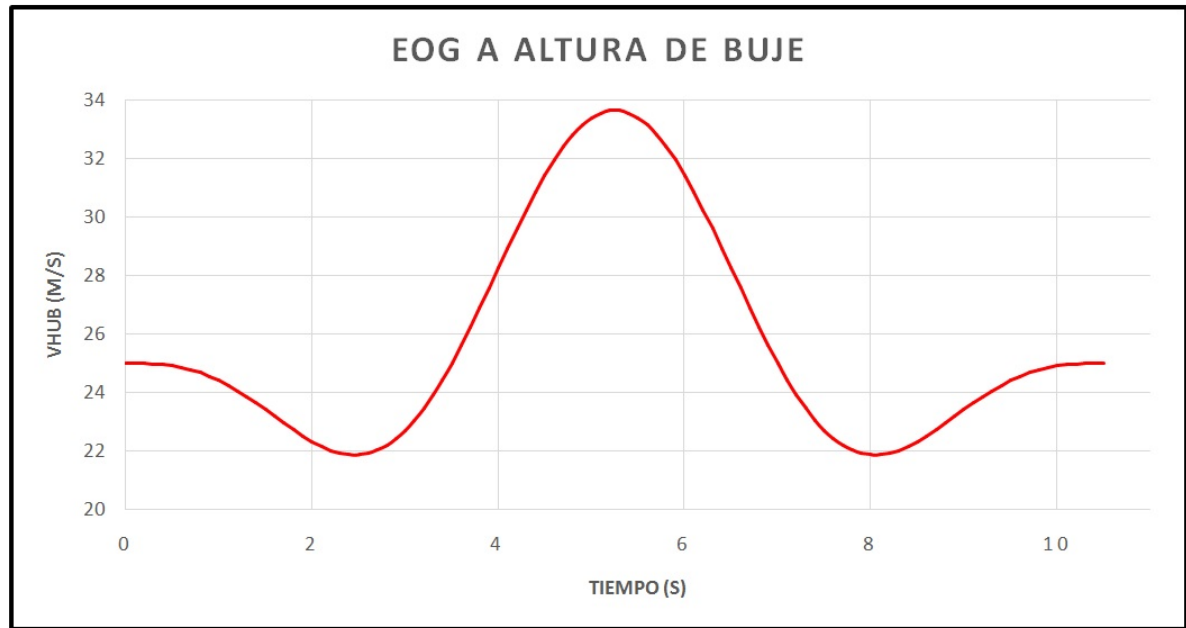


Figura 2: EOG con  $V_{hub} = 25$  m/s, clase IA,  $D=42$  m

### 1.1.3. Extreme Direction Change (EDC)

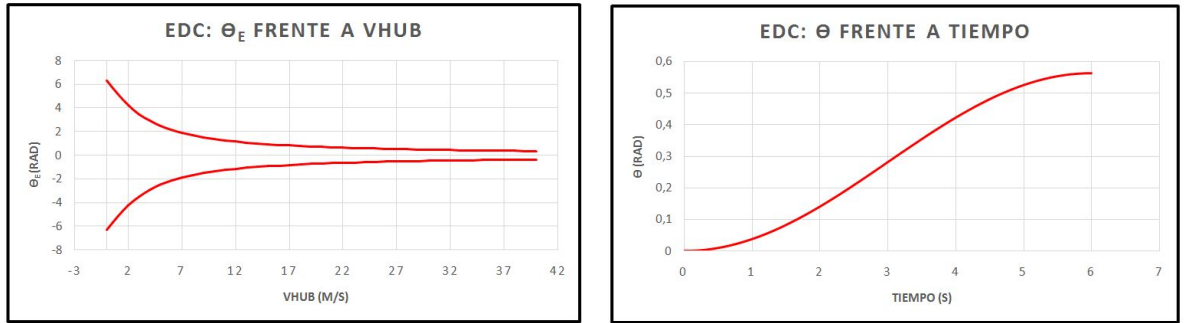
Este modelo asume un cambio de dirección brusco en un período de tiempo de seis segundos. Una vez que este cambio se produce, la dirección permanece constante en los segundos posteriores. A continuación se define la magnitud de cambio de dirección extrema ( $\theta_e$ ) dada por la norma (los parámetros que no se definan, son equivalentes a los del modelo anterior):

$$\theta_e = \pm \arctan \left( \frac{\sigma_1}{V_{hub} \cdot \left( 1 + 0,1 \cdot \left( \frac{D}{\Lambda_1} \right) \right)} \right) \quad (9)$$

A partir de esta magnitud se puede obtener el cambio de dirección en función del tiempo:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0^\circ & t < 0 \\ \pm 0,5 \cdot \theta_e \cdot \left( 1 - \cos \left( \frac{\pi \cdot t}{T} \right) \right) & 0 \leq t \leq T \\ \theta_e & t > T \end{cases} \quad (10)$$

Debe elegirse el signo que produzca el cambio más brusco de dirección de ambos. También es importante resaltar que cuánto mayor sea la velocidad del viento a altura de buje, menor es el cambio de dirección que se produce, tendiendo a un valor constante a partir de una determinada velocidad (como puede dilucidarse de la ecuación 23).



(a) Variación de  $\theta_e$  con  $V_{hub}$

(b) Variación de  $\theta$  con  $t$

Figura 3: Modelo EDC

#### 1.1.4. Extreme Coherent Gust with Direction Change (ECD)

Este modelo predice un cambio brusco en la velocidad y dirección del viento de forma simultánea en un período de tiempo de 10 segundos. Se define el cambio de velocidad a partir de la siguiente ecuación:

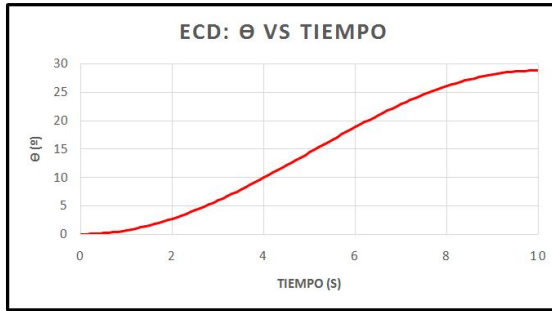
$$V(z, t) = \begin{cases} V(z) & t < 0 \\ te/V(z) + 0,5 \cdot V_{cg} \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{T}\right)\right) & 0 \leq t \leq T \\ V(z) + V_{cg} & t > T \end{cases} \quad (11)$$

dónde  $V_{cg} = 15$  m/s,  $V(z)$  la velocidad a una altura  $z$  dada por la ley potencial del viento (ecuación 22) y  $T=10$  s. Este cambio de velocidad debe ir acompañado con un cambio de dirección comprendido entre  $0^\circ$  y  $\theta_{cg}$ , definido como sigue:

$$\theta_{cg}(V_{hub}) = \begin{cases} 180^\circ & V_{hub} < 4 \text{ m/s} \\ \left(\frac{720}{V_{hub}}\right) & 4 < V_{hub} < V_{ref} \end{cases} \quad (12)$$

El cambio de dirección simultáneo viene dado por la siguiente ecuación:

$$\theta(t) = \begin{cases} 0^\circ & t < 0 \\ \pm 0,5 \cdot \theta_{cg} \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{T}\right)\right) & 0 \leq t \leq T \\ \pm \theta_{cg} & t > T \end{cases} \quad (13)$$



(a) Variación de  $V(z, t)$  con  $t$



(b) Variación de  $\theta$  con  $t$

Figura 4: Modelo ECD



## 1.2. Métodos de cálculo de $V_{ref}$

### 1.2.1. Algoritmos EWTS

Los algoritmos EWTS fueron introducidos por la European Wind Turbine Standards II [?] en el año 1998. Se utilizan para estimar la velocidad de referencia y se diferencian del resto de algoritmos en que no utilizan ningún pico de velocidad de la serie inicial. El cálculo puede realizarse a partir de la velocidad media de la serie y del valor  $K$  de la distribución de Weibull. La base teórica de este método es suponer que la serie de velocidad sigue una distribución de este tipo, de modo que el ratio entre su velocidad media y su velocidad de referencia viene dado por el parámetro de forma. Existen tres variantes de este algoritmo: EWTS Exacto, EWTS Gumbel y EWTS Davenport.

El algoritmo EWTS Exacto utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{V_{ref}}{V_{ave}} = \frac{1}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right)} \cdot \left[ -\ln \left[ 1 - \exp \left( \frac{\ln \left( 1 - \frac{1}{T_r} \right)}{n} \right) \right] \right]^{\frac{1}{K}} \quad (14)$$

dónde  $T_r$  es el período de retorno.

El algoritmo EWTS Gumbel se basa en la siguiente ecuación:

$$\frac{V_{ref}}{V_{ave}} = \frac{(\ln(n))^{\frac{1}{K}-1}}{K \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right)} \cdot \left[ K \cdot \ln(n) - \ln \left( \ln \left( 1 - \frac{1}{T_r} \right) \right) \right] \quad (15)$$

Finalmente, tenemos el algoritmo EWTS Davenport. Este método suele sobreestimar el ratio entre las dos velocidades en comparación con los dos métodos anteriores.

$$\frac{V_{ref}}{V_{ave}} = \frac{(\ln(n))^{\frac{1}{K}-1}}{c_1 \cdot K \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right)} \cdot \left[ c_1 \cdot c_2 \cdot K \cdot \ln(n) - \ln \left( \ln \left( 1 - \frac{1}{T_r} \right) \right) \right] \quad (16)$$

$$c_1 = 1 + \frac{K-1}{K \cdot \ln(n)} \quad (17)$$

$$c_2 = 1 + \frac{\ln \left( K \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{K}\right) \cdot \ln(n)^{\frac{K-1}{K}} \right)}{K \cdot \ln(n) - (K-1)} \quad (18)$$

Es interesante mencionar que la recomendación de la norma IEC para el ratio entre  $V_{ref}$  y  $V_{ave}$  es 5, es decir, la velocidad de referencia sería cinco veces mayor que la media. Si se representan en una gráfica los valores de este ratio para los tres algoritmos en función del parámetro de forma, se puede observar como para valores de  $K$  comprendidos entre 1.5 y 2 (entre los que se suelen encontrar los vientos europeos), el valor del ratio se sitúa aproximadamente en cinco. Se puede ver en la siguiente gráfica:

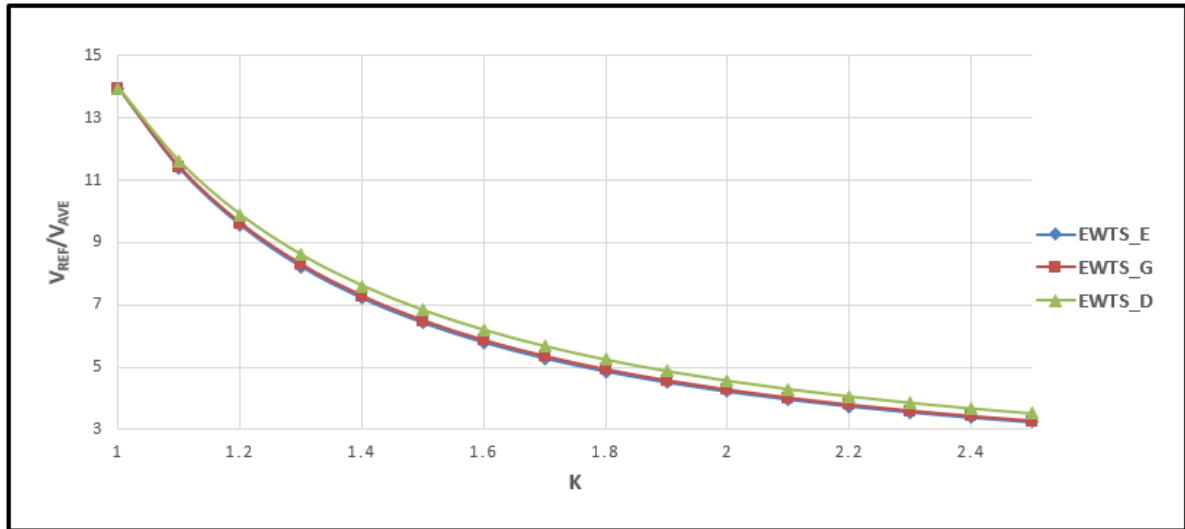


Figura 5: Ratio  $\frac{V_{ref}}{V_{ave}}$  en función del parámetro  $K$

### 1.2.2. Distribución de valores extremos generalizada (GEV)

Las series de velocidad del viento se suelen ajustar a una distribución de Weibull, la cuál permite calcular la probabilidad de superar una velocidad dada a partir de la distribución de probabilidad. Sin embargo, para velocidades extremas, este mecanismo tiene un gran inconveniente. Este tipo de velocidades representan la zona de la cola de la distribución, una zona en la que usualmente se tiene una baja densidad de datos. Este hecho hace que la incertidumbre en el cálculo asociado a este tipo de velocidades sea muy superior a la asociada a velocidades en la zona central de la distribución. Una posible solución es utilizar la teoría clásica de valores extremos en una serie de máximos de la variable aleatoria (en este caso, la velocidad del viento) obtenidos a partir de la serie inicial. La condición indispensable para poder utilizar este método es que los máximos obtenidos sean independientes entre sí, es decir, los eventos que producen los máximos deben ser independientes.

La función de distribución acumulada GEV tiene tres parámetros: el parámetro de forma ( $K$ ), el parámetro de escala ( $\alpha$ ) y el parámetro de localización ( $\beta$ ) y viene determinada por la siguiente ecuación matemática:

$$F(x) = \exp \left[ - \left( 1 + K \cdot \left( \frac{x - \beta}{\alpha} \right) \right)^{-\frac{1}{K}} \right] \quad (19)$$

Dependiendo del valor de  $K$ , se tienen tres tipos distintos de distribución, siendo la más utilizada en eólica la distribución de Gumbel, cuando  $K=0$ . A partir de esta función, se puede obtener una estimación del valor de  $V_{ref}$  dado por la siguiente ecuación:

$$V_{ref} = \beta - \alpha \cdot \ln [-\ln (F(x))] \quad (20)$$

El principal problema de la ecuación 34 reside en la necesidad de estimar los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  así como en la estimación de  $F(x)$ . A partir de esta ecuación, se pueden utilizar diferentes mecanismos para obtener una estimación de la velocidad de referencia. Para lograrlo, se suelen combinar varios mecanismos: plotting positions con el método de período máximo, plotting positions con el método de las tormentas independientes (MIS) o método de las tormentas independientes con estimación de los parámetros de la distribución de Gumbel mediante el método de los momentos o máxima verosimilitud.

### 1.2.3. Método de Plotting Positions

Este método permite hacer una estimación de la función de distribución acumulada para una determinada función, en este caso, la de Gumbel. Para poder aplicar este método se necesita obtener una serie de máximos a partir de la serie de datos inicial, de ahí la necesidad de combinar este mecanismo con otro (como MIS o Período Máximo) que los localice (estos métodos son explicados con detalle posteriormente). Una vez que se dispone de esta serie, la idea es ordenar los valores de la misma de menor a mayor y obtener las estimaciones de  $F(x_i)$  a partir de las siguientes ecuaciones:

$$F(x_i) = 1 - \frac{i}{N + 1} \quad (21)$$

$$F(x_i) = 1 - \frac{i - 0,44}{N + 0,12} \quad (22)$$

Dónde la ecuación 35 es la fórmula de Weibull y la ecuación 36 la fórmula de Gringorten. Estas dos ecuaciones son las ampliamente recomendadas por la bibliografía existente [?, ?, ?] para la distribución de Gumbel. Sin embargo, es necesario ser conscientes de que aunque esta distribución es la que mejor se ajusta en una gran parte de los casos, se podrían encontrar ante situaciones en las que esto no fuese cierto y la serie se ajustase mejor a una distribución GEV de otro tipo (con el parámetro  $K \neq 0$ ). En este caso, habría que usar otras fórmulas distintas, ya que las mencionadas aquí dejarían de ser una buena aproximación y, por lo tanto, la velocidad de referencia obtenida a partir de ellas también.

Una vez se tiene la serie de máximos de velocidades con su correspondiente estimación de  $F(x)$ , se puede linealizar la ecuación 34 de la siguiente manera:

$$y = \ln [-\ln (F(x))] \implies V_{ref} = \beta - \alpha \cdot y \quad (23)$$

De esta forma se consiguen ajustar nuestros datos a la ecuación de una recta cuya intersección es el parámetro de localización ( $\beta$ ) y cuya pendiente es el valor negativo del parámetro de escala ( $\alpha$ ). El último paso para obtener una estimación de la velocidad de referencia (a partir de la ecuación 34), una vez conocidos los parámetros de la distribución, es estimar  $F(V_{ref})$ . Para ello, y al igual que para obtener la serie de máximos mencionada anteriormente, se necesita recurrir a uno de los métodos que se explican a continuación.

#### 1.2.4. Método del Período Máximo

Este algoritmo se utiliza para obtener una serie de máximos a partir de los valores de velocidad iniciales. Para ello, se selecciona un período de tiempo (habitualmente un mes o un año) y se recorre la serie de velocidad seleccionando los picos de viento con la frecuencia seleccionada. La principal ventaja de este método es que es sencillo de implementar y además, debido a la baja frecuencia de selección, se garantiza que se cumpla uno de los requisitos fundamentales de la distribución GEV, es decir, la independencia de los máximos. Sin embargo, este método también posee inconvenientes importantes. Los más destacables son la necesidad de un período muy extenso de datos medidos (si la frecuencia es anual se recomiendan 20 años, con un mínimo de 10 para que el método pueda ser aplicable [?]) y la pérdida de información al seleccionar tan sólo un valor por período. De hecho, es habitual que se eliminen valores máximos en un período mayores que los valores seleccionados en otros.

A continuación se puede ver un ejemplo del funcionamiento de este algoritmo:

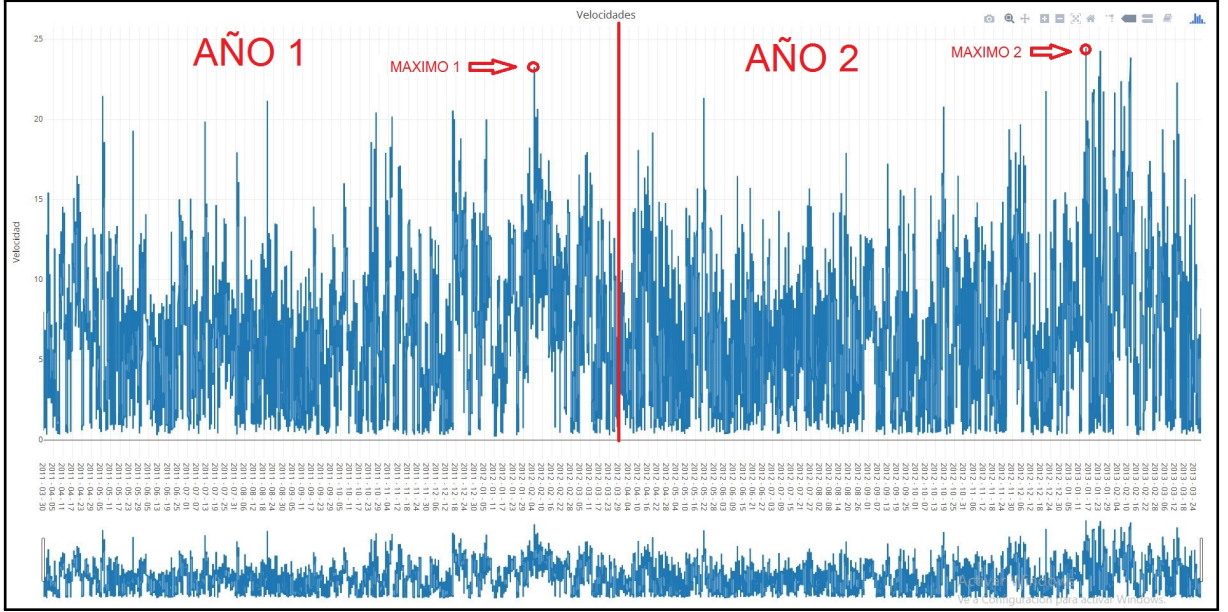


Figura 6: Ejemplo del algoritmo periodo máximo para 2 años

Se observa cómo 16 días después del máximo del año 2 se tiene un pico de velocidad superior al máximo del año 1, perdiéndose una valiosa información. También es importante mencionar que debe introducirse una separación mínima entre los máximos al algoritmo para poder garantizar su independencia. Aunque en este método es menos probable que suceda (cómo en el de las tormentas independientes, por ejemplo) podría darse la situación de que el máximo 1 cayera en el 31 de Diciembre y el máximo 2 en el 1 de Enero del año siguiente, por lo que ambas medidas estarían claramente relacionadas, posiblemente por un mismo evento (medidas muy cercanas a la línea roja de la gráfica, que es la que separa a los dos años).

Una vez seleccionados los máximos del modo que se ha explicado, se necesita obtener  $F(V_{ref})$  para estimar la velocidad de referencia. Usando este método se tiene una medida anual, por lo que sustituyendo en la fórmula de Weibull de plotting positions para un período de retorno de 50 años, se obtiene el siguiente resultado:

$$F(V_{ref}) = 1 - \frac{50}{51} \simeq 0,02$$

De este modo, una vez conocido el valor de la función de distribución acumulada y el valor de los parámetros de la distribución (calculados por el ajuste de plotting positions, momentos o máxima verosimilitud), la estimación de  $V_{ref}$  queda de la siguiente manera:

$$V_{ref} = \beta - \alpha \cdot \ln[-\ln(0,02)] \quad (24)$$

### 1.2.5. Método de las Tormentas Independientes

Este método se puede considerar una mejora del método anterior para intentar solucionar el inconveniente de dejar picos importantes sin seleccionar. De esta manera, se consigue obtener una serie con más densidad de datos para ajustarlos posteriormente a una distribución GEV (normalmente de tipo Gumbel). El algoritmo recorre la serie de velocidad registrando los máximos con una frecuencia de  $x$  días (este valor suele encontrarse entre 3 y 7 días). El inconveniente de esta técnica es que es difícil asegurar la independencia entre los datos seleccionados, por lo que debe introducirse un parámetro que ponga una distancia mínima de separación entre los valores registrados (habitualmente de 2 días). Finalmente, se someten los valores seleccionados a pasar por un filtro que escoge los valores superiores a un determinado límite de velocidad (para no quedarnos con datos que puedan ser no considerados picos). La elección de estos tres parámetros (días, días de separación y límite) no es trivial y ha sido analizada en este trabajo con detenimiento. A continuación se presentan unas gráficas donde, paso por paso, se explica el funcionamiento de este algoritmo:

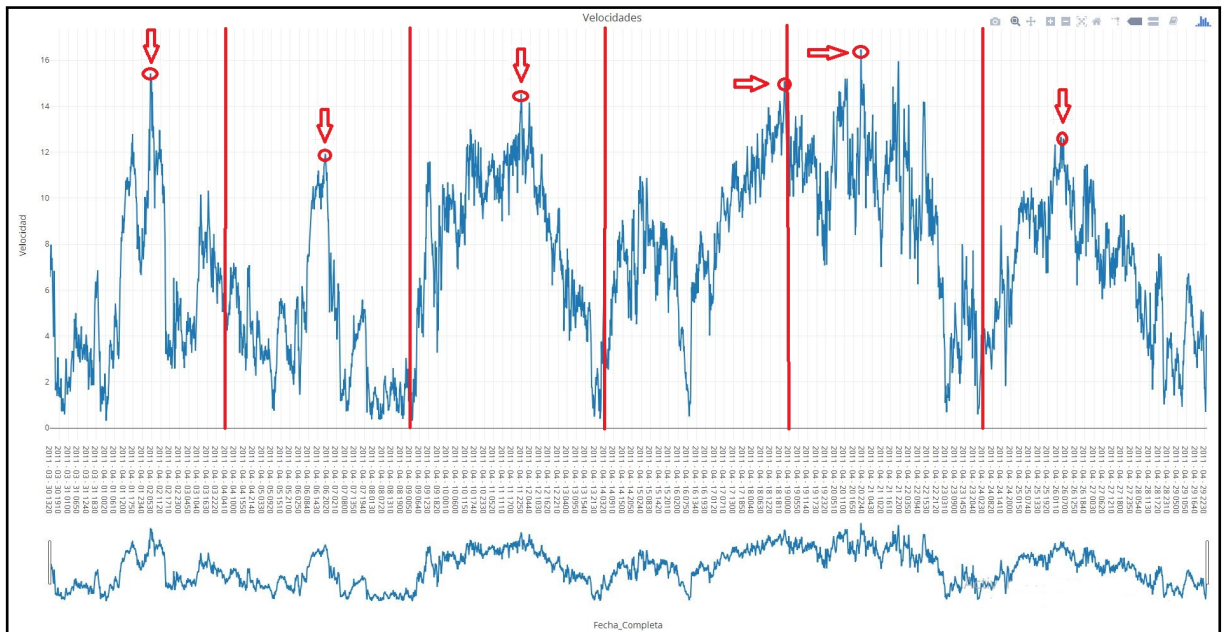


Figura 7: Paso 1: Seleccionamos el máximo por cada período.

En la gráfica se puede ver un mes completo de datos separados en períodos de cinco días (líneas rojas en la imagen) y los máximos seleccionados en cada uno de esos períodos (círculos rojos en la imagen). Posteriormente, se debe comprobar si esos máximos cumplen el criterio de separación entre máximos y el valor umbral de velocidad.

En este ejemplo se han usado 2 días de separación mínima y un límite de velocidad de 14 m/s. Se muestra el resultado final en la siguiente gráfica:

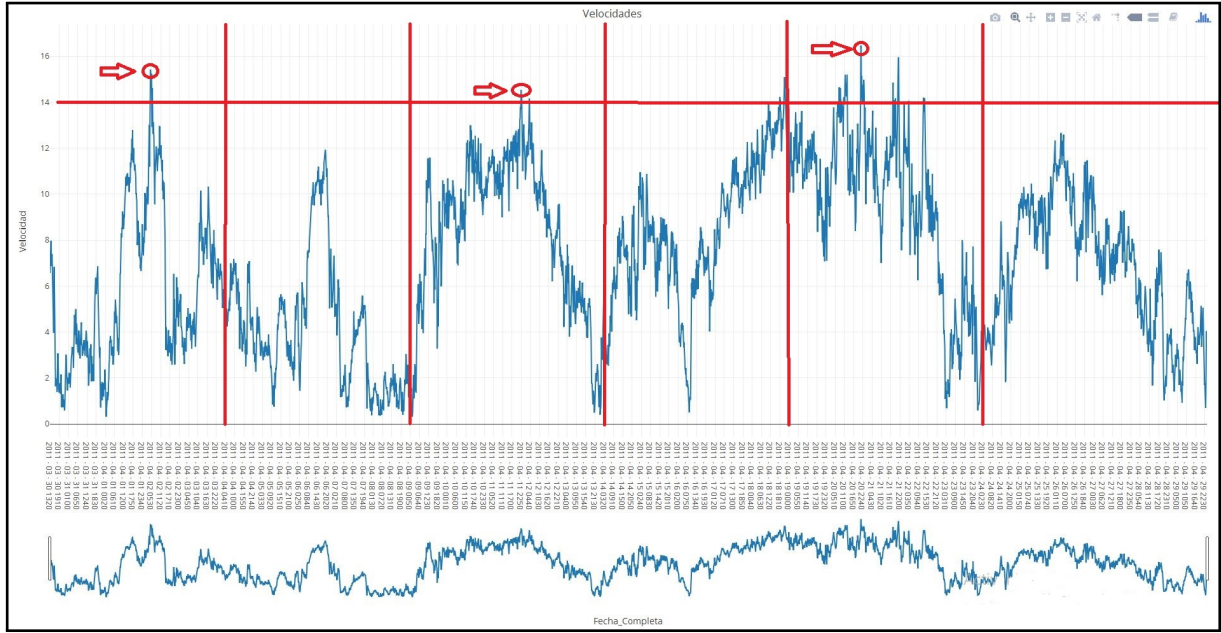


Figura 8: Máximos seleccionados después de aplicar todos los criterios

Después de aplicar los criterios elegidos, se puede observar como el número de máximos iniciales se ha quedado en la mitad, pasando de 6 datos a 3, por lo que se deben ajustar estos parámetros para obtener el mayor número posible de picos de velocidad siempre que sean independientes entre sí. En general, se suele utilizar 3 días de separación debido a que suele ser el tiempo de duración de una borrasca (fenómeno que produce este tipo de vientos de manera más común). Por otro lado, no parece haber ningún valor predefinido para el valor umbral de la velocidad a partir de criterios exclusivamente meteorológicos.

Finalmente, una vez obtenida la serie de máximos, se necesita estimar la función de distribución acumulada para la velocidad de referencia,  $F(V_{ref})$ . El procedimiento consiste en obtener el número de tormentas por año dividiendo el número de datos obtenidos por el algoritmo entre el número de años del período de selección. Una vez obtenido este valor, se multiplica por el período de retorno para el que queramos calcular la velocidad (50 años en este caso) y se aplica la fórmula de Weibull:

$$F(V_{ref}) = 1 - \frac{(Tormentas/año \cdot T_r)}{1 + (Tormentas/año \cdot T_r)}$$

Otra posible forma de hacerlo es obteniendo el número de tormentas por cada año y haciendo un ajuste entre las tormentas y los años. Mediante esta correlación puede obtenerse el número de tormentas para 50 años y obtener la función de distribución acumulada por plotting positions. Una vez obtenido este valor y los parámetros de la distribución de Gumbel (por plotting positions, momentos o máxima verosimilitud) se sustituye en la ecuación 34 para estimar un valor de  $V_{ref}$ .

### 1.3. Función Vext

Vext es una función que se ha programado, mediante el software estadístico R para poder automatizar los métodos de cálculo de vientos extremos explicados en la sección 5.2, tanto para medidas diezminutales como secundales. A continuación se muestra una tabla con los argumentos de la función y una breve explicación de cada uno de ellos:

Argumento	Explicación
velocidad	Vector con los datos de velocidad sobre el que se realizarán los cálculos
fecha	Vector con la fecha correspondiente a cada dato en formato AAAA-MM-DD (con cualquier separador válido) para el método Periodic Maxima
Tr	Período de retorno en años
method	Método para obtener parámetros de Weibull para algoritmos EWTS. Puede ser: “Mom”, “LS”, “Wasp”, “MLE” ó “MMLE”.
equation	Ecuación para obtener la velocidad máxima. Puede ser: “EWTS_E”, “EWTS_G”, “EWTS_D”, “Tormentas”, “Gumbel” ó “Periodic_Maxima”.
dias	Frecuencia de recorrido de la serie de la velocidad para Tormentas en días.
dias_sep	Días mínimos de separación entre los máximos encontrados por Tormentas.
limite	Velocidad umbral para seleccionar los máximos en Tormentas
tipo_per	Puede ser “Año” ó “Mes”. Para la ecuación “Periodic_Maxima”.
prob_method	Para estimar la ADF. Puede ser 1 (fórmula de Weibull) ó 2 (fórmula de Gringorten). Se usa en “Tormentas” ó “Periodic_Maxima”
gumbel_method	Para estimar parámetros de Gumbel. Puede ser “moments” ó “MLE”. Se usa en la ecuación “Gumbel”.
diezmin	“TRUE” si velocidad es diezminutal, “FALSE” si es segundal.

Cuadro 1: Argumentos explicados de la función Vext

Es importante señalar que los algoritmos EWTS sólo admiten valores diezminutales, ya que el parámetro  $n$  que aparece en las ecuaciones no está definido para valores secundales. También mencionar que la ecuación “Gumbel” es la que obtiene la velocidad extrema mediante el cálculo de los parámetros de la distribución por momentos o máxima verosimilitud y mediante el método de las tormentas. La diferencia con la ecuación “Tormentas” radica en que esta utiliza el método de las tormentas también, pero estima las probabilidades por el método de plotting positions. Finalmente, añadir que el vector de velocidad utilizado en la función debe estar previamente filtrado (es decir, el programa acepta valores NA, pero rechazará valores superiores a 90, ya que están fuera de un rango razonable de velocidad y los errores suelen ser señalados por valores de esta magnitud). En cualquier caso, la función está diseñada para anticiparse a los problemas más comunes que puedan surgir y se interrumpirá mostrando un mensaje en pantalla señalando el error encontrado.



Se adjunta a continuación la salida del programa para la ecuación “Tormentas”, donde se puede observar el gráfico del ajuste, el valor de  $V_{ref}$  y el valor de  $R^2$ :

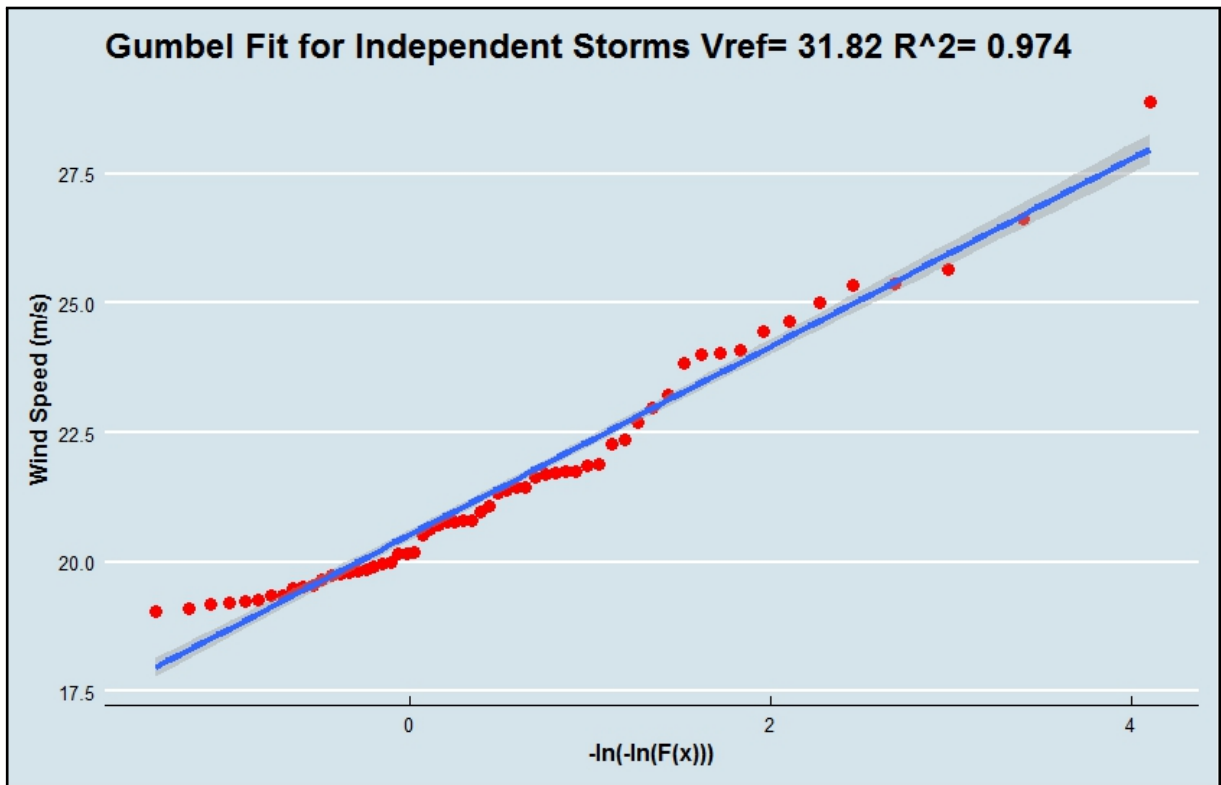


Figura 9: Salida de Vext para la ecuación “Tormentas”