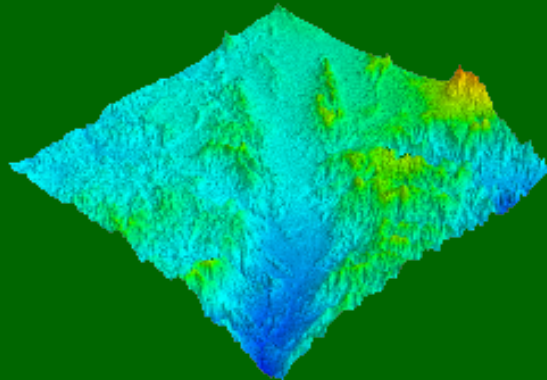




Universidad Complutense de Madrid

Facultad de Física

Master en meteorología y geofísica



Validación de modelos CFD de recurso eólico

Anexo

Paul Van Branteghem

Dirigida por Ricardo García Herrera y Luis Prieto Godino

7 Septiembre 2015



Índice

| | |
|--|-----------|
| I. Ev. del recurso eólico a partir del potencial eólico | I |
| I.a. Velocidad media y variabilidad del viento | II |
| I.b. Turbulencia y velocidad máxima | III |
| I.c. Métodos de evaluación del recurso eólico en una zona de prospección | V |
| I.d. Campañas de medición | V |
| I.e. Modelos para la evaluación del recurso eólico | V |
| I.e.1. Modelos Lineales: WA^sP y <i>WA^sP Engineering</i> | V |
| I.e.2. Modelos CFD: Modelo CFD desarrollado por Iberdrola | VII |
| II. Filtrado de datos | IX |
| II.a. Comparación de los resultados al aplicar el filtrado | X |

I Evaluación del recurso eólico a partir del potencial eólico

Los aerogeneradores o turbinas eólicas producen electricidad utilizando el viento para mover los generadores eléctricos. La energía producida por éstos varía principalmente en función del recurso eólico disponible en el emplazamiento. Para realizar un estudio de la evaluación del recurso eólico en una zona determinada se utiliza el **Potencial eólico**. Este parámetro permite evaluar la cantidad de energía eólica que pasa por unidad de superficie expuesta al viento. La energía del viento es prácticamente cinética, de manera que la potencia que atraviesa una superficie A viene definida por:

$$P_d = \frac{1}{2}\rho A|\mathbf{U}|^3 \approx \frac{1}{2}\rho A|\mathbf{U}_h|^3 \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad del aire, $\mathbf{U} = \mathbf{U}_i$ la velocidad del viento con componentes $\mathbf{U}_i = \mathbf{U}_h + \mathbf{w}$ correspondientes al viento horizontal (\mathbf{U}_h) y vertical (w). En la segunda parte de la ecuación se ha despreciado la velocidad vertical al ser mucho menor que la suma de las componentes horizontales: $|\mathbf{U}_h| \gg |\mathbf{w}|$. Generalmente se habla de densidad eólica que resulta de dividir la ecuación 1 entre la densidad del aire.

Sin embargo, la potencia eólica real no es exactamente como la de la ecuación 1. Esto es debido a que no es posible extraer toda la potencia eólica ya que debe cumplirse la ecuación de conservación de la masa al pasar el aire por el aerogenerador. Así, existe un límite determinado por la *Ley de Betz* de aprovechamiento del potencial eólico. El límite de Betz marca la fracción máxima de potencia teórica (P_d) del viento que se puede transformar independientemente del diseño de la turbina y tiene un valor de $C_p = 0,59$. [Gipe, 2004]

$$P = C_p P_d \quad (2)$$

Existen por lo tanto cuatro parámetros fundamentales que afectan a esta ecuación y que son de gran importancia en la evaluación de la ubicación de un parque eólico: la velocidad media del viento, su variabilidad, la turbulencia y velocidad máxima producida (grandes variaciones energéticas en espacios cortos de tiempo). [Talayero y Telmo, 2008]

I.a Velocidad media y variabilidad del viento

Según la ecuación 1, una de las características principales que define un buen emplazamiento para un parque es que la velocidad media sea elevada. Aunque la velocidad en una zona determinada cambia constantemente, existen escalas bien definidas en la variabilidad del viento: en las medias anuales, estaciones, diarios, sinópticos (debidos al estado del tiempo) o turbulentos. Estos últimos tienen un carácter especial ya que producen cargas de fatiga que pueden reducir la durabilidad de las componentes de los aerogeneradores. Por ello se analizan por separado en el siguiente apartado I.b *Turbulencia y velocidad máxima*.

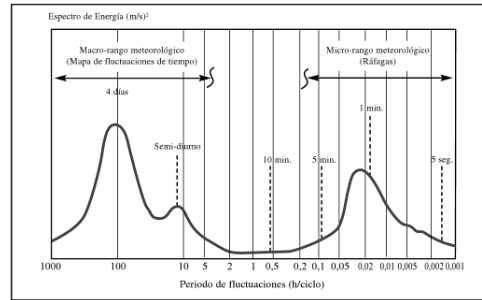


Figura 1: Espectro de Van der Hoven. Fuente: [Talayero y Telmo, 2008.]

Las escalas temporales de la variabilidad del viento se muestran en la figura 1 en el denominado espectro de Van Hoven. En éste se representa el espectro de energía asociado a la variación de la velocidad del viento frente a su frecuencia. El espectro tiene un máximo de frecuencia en torno a las 100 horas/ciclo (que corresponde con frecuencias de 4 días ¹) asociado a variabilidades sinópticas. Bajando en el espectro de frecuencias se encuentra otro máximo más pequeño asociado a la periodicidad semi-diurna (frecuencia de cada 6 horas). El tercer máximo se encuentra en frecuencias de aproximadamente cada minuto y en el que se reflejan los flujos de microturbulencia de escalas de longitud de 1m a 100m. Entre esto dos últimos picos se define un valle que indica bajos contenidos de energía por fluctuaciones de viento, confirmando la escasa interacción entre el clima de viento (macrometeorología) y la turbulencia de la capa límite (micrometeorología). Es por ello, cuando se realizan estadísticas de viento en el rango de la micrometeorología, se suelen utilizar medidas de velocidad del viento promediadas entre intervalos de tiempo que se encuentran en este valle, de manera que integran todo el espectro correspondiente a los flujos de microturbulencia. Generalmente, se realizan observaciones diezminutales u horarias, ya que si las medidas fuesen diarias, se integrarían los dos picos que definen el valle y no se podría estudiar la variabilidad del viento por fenómenos asociados a cada uno de los diferentes picos. [Talayero y Telmo, 2008.]

Para poder caracterizar el comportamiento aleatorio del viento se recurren a herramientas estadísticas como son la distribución de frecuencias por intervalos de velocidad (histogramas de velocidad del viento). La distribución que mejor se ajusta a la distribución de velocidades del viento es la de Weibull. Esta determina que la probabilidad de que el viento sea U viene definida por:

$$p(U) = \frac{k}{C} \cdot \left(\frac{U}{C}\right)^{k-1} \cdot \exp(-(U/C)^k) \quad (3)$$

¹frecuencia[h]=1/Periodo [h/ciclo]

Donde k es un factor de forma y C de escala de la distribución. De esta manera, como el potencial eólico es proporcional al cubo, si multiplicamos la potencia de cada velocidad del viento por la probabilidad de cada velocidad del viento de la distribución de Weibull obtenemos la distribución de energía eólica a diferentes velocidades de viento, es decir, la densidad de potencia.

Por otro lado, la velocidad del viento varía con la altura tendiendo al valor de la cima de la capa límite. Ésta se alcanza aproximadamente en el denominado gradiente de altura, en torno a 1000 metros sobre el nivel del suelo. La variación de la velocidad del viento con la altura depende de la estabilidad atmosférica. Para representar el perfil vertical de viento matemáticamente existen diversas expresiones teóricas. La más común y más simple que relaciona la velocidad del viento con la altura es la *ley de Hellmann* que relaciona las velocidades con las alturas mediante un perfil exponencial de la forma:

$$\frac{U_1}{U_2} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^\alpha \quad (4)$$

Donde U_1 y U_2 son las velocidades horizontales calculadas a la altura h_1 y h_2 correspondientemente. El coeficiente α de la ecuación determina la variabilidad exponencial de la velocidad con la altura. Debido a que generalmente no coinciden las alturas de tomas de datos de las estaciones meteorológicas con las de buje de los aerogeneradores es preciso extrapolar mediante la relación anterior las velocidades del viento. [Talayero y Telmo, 2008.]

I.b Turbulencia y velocidad máxima

La turbulencia, aunque es un concepto de uso cotidiano, es difícil de definir con precisión. [Arya, 1988] la define, en términos simplistas, como movimientos caóticos e irregulares. No obstante, muchos fluidos (por ejemplo en la superficie del mar lejos de los efectos terrestres) pueden tener estas características y no ser turbulentos. De esta manera, [Kundu, 2015] enfatiza el hecho de que muchas veces se la confunda con los flujos con un comportamiento aleatorio. Así [Lesieur, 1987] dice que "la turbulencia es un tópico peligroso, origen de numerosos conflictos entre científicos debido a los diferentes puntos de vista en los que se representa. Sin embargo, existe un acuerdo en la complejidad del mismo". Por lo tanto Arya al igual que Kundu determinan que es más apropiado definirla partir de sus características principales.

La turbulencia posee un carácter irregular y aleatorio que hace de cualquier movimiento del fluido esencialmente impredecible: sin importar cuanto se cuide la reproducción de las condiciones de un experimento, cada descripción del flujo es diferente y no puede ser predicha en detalle. Por esta razón el estudio de la turbulencia se realiza mediante técnicas estadísticas. La turbulencia tiene gran capacidad de mezcla siendo una de las responsables del intercambio de momento, calor y masa en la capa límite atmosférica.

Los campos de velocidades se suceden en las tres dimensiones, siendo muy variables en espacio y tiempo. Consecuentemente la turbulencia al igual que el campo de velocidades es tridi-

mensional y rotacional. Existe un amplio espectro de escalas espaciales y temporales turbulentas. Los *eddies* más grandes tienden a disiparse en forma de cascada, existiendo una transferencia de las propiedades del flujo desde las escalas mayores a las más pequeñas. La disipación de la energía cinética del movimiento turbulento es continua, convirtiéndose en energía interna o calor debido a la viscosidad del fluido. Es por ello que para mantenerse la turbulencia tiene que haber un aporte continuo de energía sino decaería rápidamente. De estas características citadas, la rotacionalidad, difusividad, y la tendencia a disiparse de la turbulencia, la distinguen de cualquier movimiento aleatorio ondulatorio. [Arya, 2001 y Kundu, 2015]

Para el tratamiento matemático de la turbulencia, Reynolds propuso descomponer las componentes de la velocidad viento (\mathbf{U}) en una parte promedio junto con una perturbada relacionada con la turbulencia:

$$u_i = \bar{u} + u'_i \quad v_i = \bar{v} + v'_i \quad w_i = \bar{w} + w'_i \quad (5)$$

Donde u_i, v_i, w_i son los valores instantáneos de la velocidad, \bar{u}, \bar{v} y \bar{w} los valores medios y u', v' y w' los fluctuantes. La descomposición de Reynolds permite relacionar la parte fluctuante con la varianza de las componentes del viento:

$$\sigma(u)^2 = \frac{1}{N} \sum_l^N (u_l - \bar{u})^2 = \frac{1}{N} \sum_l^N u_l'^2$$

siendo l los valores en un intervalo de tiempo determinado para promediar. Por lo tanto se deduce que para cada componente del viento:

$$\sigma(u)^2 = \overline{u'^2}; \quad \sigma(v)^2 = \overline{v'^2}; \quad \sigma(w)^2 = \overline{w'^2}. \quad (6)$$

A partir de esta descomposición se definen dos parámetros que permiten cuantificar la turbulencia: La Intensidad turbulenta (IT) y la Energía Cinética Turbulenta (TKE) que se definen respectivamente como:

$$IT_u = \frac{\sigma(u)}{|\mathbf{U}|} \quad IT_v = \frac{\sigma(v)}{|\mathbf{U}|} \quad IT_w = \frac{\sigma(w)}{|\mathbf{U}|} \quad (7)$$

$$TKE = \epsilon/m = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) = \frac{1}{2} (\sigma(u)^2 + \sigma(v)^2 + \sigma(w)^2) \quad (8)$$

donde $|\mathbf{U}|$ es el módulo del viento y u, v, w sus componentes. La *IT* varía en función de las condiciones de estabilidad atmosféricas en la denominada Capa Límite. Esta capa, cercana a la superficie, se ve sometida a la influencia (básicamente friccional) de la tierra. En condiciones de estabilidad nocturna, con condiciones de estabilidad atmosférica, los valores de la *IT* son menores al 10%. En caso de tener una atmósfera neutra, la *IT* aumenta hasta un 5% más mientras que

si las condiciones son inestables, es mayor de un 15%. También varía en función de la altura, decreciendo a medida que nos alejamos del suelo. Por otro lado la energía del flujo turbulento viene definida por la TKE. La producción de esta energía depende principalmente de la cizalla del viento (S) así como de la flotabilidad (B). Su disipación se produce debido a términos viscosos (D). Puede existir además un término de transporte (T_R) producida entre diferentes regiones del flujo. De esta manera la producción de energía cinética turbulenta se puede expresar como:

$$\frac{\partial TKE}{\partial t} = S + B - D + T_r \quad (9)$$

Por lo tanto, si la $\frac{\partial TKE}{\partial t} < 0$ la turbulencia se disipa, mientras que si $\frac{\partial TKE}{\partial t} > 0$ la turbulencia se desarrolla.

En la generación de la turbulencia juega un papel importante la orografía del terreno (cambios de elevación) y la rugosidad que pueda presentar el emplazamiento. En áreas cuya superficie es muy accidentada y con muchos obstáculos se genera mucha turbulencia, donde los flujos de aire son muy irregulares produciéndose remolinos y vórtices.[Arya, 2001]

I.c Métodos de evaluación del recurso eólico en una zona de prospección

La evaluación del recurso eólico se realiza principalmente mediante campañas de medición y modelos lineales o numéricos avanzados (CFD). Estos permiten obtener los parámetros necesarios para evaluar el potencia eólico en una zona.

I.d Campañas de medición

Los registros de velocidad del viento y dirección del viento, se realizan mediante la utilización de anemómetros y veletas respectivamente. Estos aparatos se colocan en torres de medición a una determinada altura sobre el nivel del suelo y se extraen observaciones durante un periodo plurianual, permitiendo conocer las condiciones climatológicas en determinados puntos de un posible emplazamiento de un parque eólico. El principal problema es que el área de estudio está limitado a las proximidades de las estaciones, situación que se complica cuanto más complejo es el terreno ya que menos representativas las torres al haber más variabilidad del flujo.[Gipe, 2004]

I.e Modelos para la evaluación del recurso eólico

I.e.1. Modelos Lineales: WA^sP y $WA^sP Engineering$

Los modelos más utilizados que utilizan simplificaciones lineales son WA^sP y $WEng$. Aunque el método de cálculo es diferente, el esquema de funcionamiento para los dos, es igual, y se puede ver en la figura 2 a la derecha. Para su inicialización el modelo necesita por un

lado parámetros relativos a la climatología local y por otro estáticos que definan el terreno de prospección. Estos últimos definen la topografía y rugosidad superficial de terreno y obstáculos que afecten a la zona de estudio, mientras que los primeros dan las condiciones iniciales de viento para la resolución de las ecuaciones. Para ello se introducen observaciones de dirección y velocidad de viento realizadas con una estación *master*. A partir de este, el modelo interpola el campo de vientos en toda la zona de estudio. El modelo también permite introducir un viento generalizado idealizado sin necesidad de la utilización de una estación *master* y generar la climatología del viento a partir de éste. Este método permite calcular Atlas de viento y condiciones idealizadas que con los datos de la estación no se podría. Para la resolución de los campos de viento, los programas lineales tienen como base de cálculo una simplificación (linealización) de las ecuaciones en tres dimensiones de Navier-Stokes. Así por ejemplo, para la extrapolación a nivel vertical de los datos meteorológicos, WA^SP aplica un perfil logarítmico siguiendo la ley de potencia. [WA^SP , 2015]

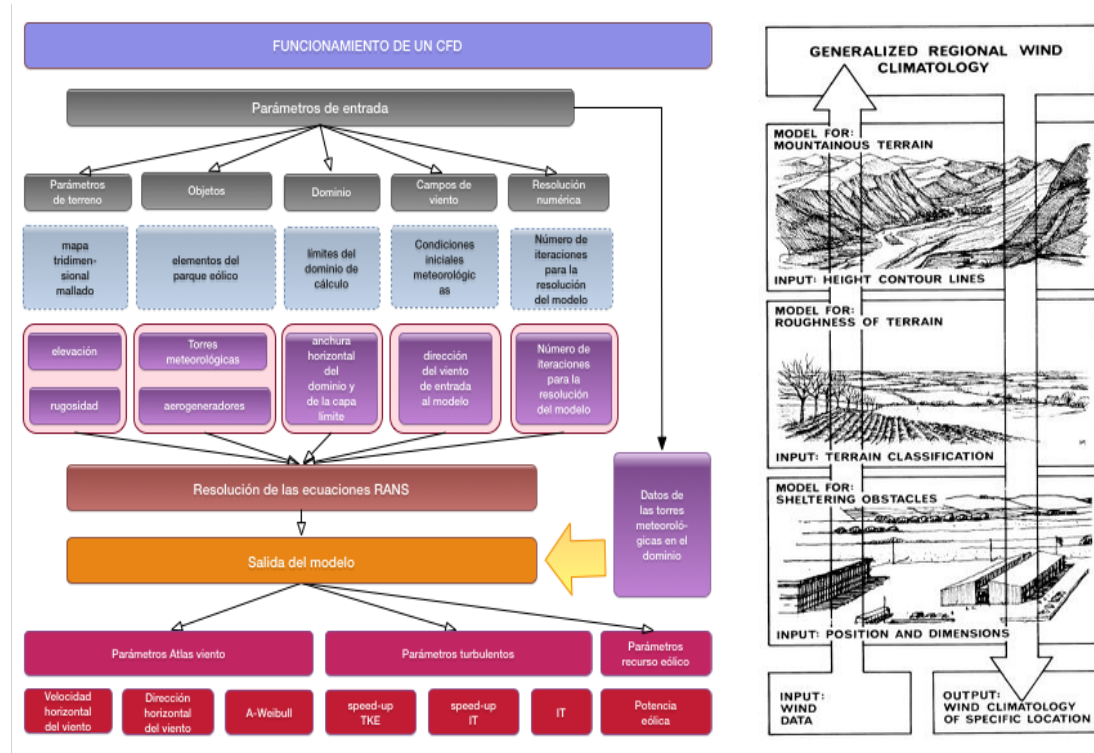


Figura 2: Esquema general de funcionamiento de un CFD (izquierda) junto con el del modelo lineal WA^SP (derecha). Esquema CFD basado en: Talayero y Telmo, 2008 b) y esquema WA^SP Fuente: WA^SP , 2015.

I.e.2. Modelos CFD: Modelo CFD desarrollado por Iberdrola

El esquema de funcionamiento de un CFD se presenta en la figura 2. Igual que $WASP$, utilizando mapas vectoriales topográficos de alta resolución y condiciones iniciales del viento (generalizado o a partir de observaciones), el modelo CFD reconstruye el mapa de vientos para una zona determinada. Sin embargo, los CFD resuelven las ecuaciones tridimensionales de *Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS)* mediante diferencias finitas [Talayero y Telmo, 2008]. En el método de diferenciación finita la región de simulación se divide en rectángulos de longitud $\delta x \times \delta y$. Se configura así una rejilla en la que cada punto de intersección se denomina punto de malla. Igualmente los pasos temporales son discretizados en intervalos de δt , de manera que las derivadas parciales involucradas en las ecuaciones diferenciales son remplazadas por sus aproximaciones en diferencias finitas y son resueltas en los puntos de malla. [Makridis, 2012]

La resolución de estas ecuaciones no-lineales de momento, energía y transporte de masa hace de los CFD una herramienta más potente y fiable para la modelización de los flujos de viento. Esto permite que en terrenos complejos, donde se presentan cambios más abruptos en la orografía y la rugosidad, el CFD resuelva los flujos de viento, incluyendo recirculaciones y otros procesos que dependen de términos de segundo orden que los modelos lineales no son capaces de reproducir.

El modelo numérico avanzado para la evaluación del recurso eólico desarrollado en el proyecto *SEDAR* es un modelo CFD que utiliza un método de resolución de la turbulencia denominado modelo $k - \epsilon$ que se define a continuación. Las *RANS* definidas por el método $k - \epsilon$ son:

$$\begin{aligned} \nabla \mathbf{U} &= 0 \\ \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} - \nabla \cdot (\nu_t \nabla^s \mathbf{U}) + \nabla p + 2\omega \times \mathbf{U} &= \mathbf{f} \\ \frac{\partial k}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla k - \nabla \cdot \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \cdot \nabla k \right) &= P_k - \epsilon \\ \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \epsilon - \nabla \cdot \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \cdot \nabla \epsilon \right) &= \frac{\epsilon}{k} (C_1 P_k - C_2 \epsilon) \end{aligned} \quad (10)$$

Donde \mathbf{U} es la velocidad del viento media obtenida sobre un largo tiempo de integración, ν_t la viscosidad *eddy*, p la presión, ω la velocidad de rotación de la Tierra, f el parámetro de Coriolis, k la energía cinética turbulenta, P_k la producción de la energía cinética turbulenta y C_1 y C_2 constantes de la parametrización.

El término $2\omega \times \mathbf{U}$ es el término debido a la fuerza de Coriolis proveniente de las ecuaciones no inerciales de rotación de la Tierra. El símbolo $\nabla^s \mathbf{U}$ denota la tasa de deformación del tensor $\nabla^s \mathbf{U} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{U} + \nabla^T \mathbf{U})$. La energía cinética turbulenta k (definida como $k = \langle \frac{1}{2} \mathbf{U}'_i \cdot \mathbf{U}'_i \rangle$, donde \mathbf{U}'_i son las fluctuaciones de cada componente cartesiana de la velocidad) y ϵ la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta. En el modelo $k - \epsilon$, el término de viscosidad *eddy* viene dado por la relación:

$$\nu_t = C_\mu k^2 / \epsilon \quad (11)$$

y la producción de la energía cinética turbulenta por:

$$P_k = 2\nu_t \nabla^2 \mathbf{U} : \nabla^2 \mathbf{U} \quad (12)$$

Donde el producto $:$ representa el producto diádico. Los valores de las constantes C_1 , C_2 , σ_k y σ_ϵ que aparecen en las ecuaciones *RANS* dependen del modelo $k - \epsilon$ implementado y de las condiciones utilizadas en las diferentes capas de la atmósfera. Para obtener las soluciones aproximadas de estas ecuaciones, el modelo realiza una serie de iteraciones definidas por el usuario. [Iberdrola, 2014] Posteriormente, estos resultados generados por el modelo se pueden combinar con las observaciones de otras torres meteorológicas situadas en el dominio, permitiendo definir el comportamiento del viento más cercano a la realidad en las celdas correspondientes a cada aerogenerador del parque eólico.

II Filtrado de datos

Aunque los vientos de direcciones distintas a la predominante son poco frecuentes, se realiza un estudio eliminándolos para determinar si la distribución de viento de la figura ?? se ve afectada por éstos. Los resultados del filtrado se observan en la figura 3, donde se muestra el histograma y rosa de los vientos normalizados. Se observa que la dirección de los vientos medios se desvían más del valor del modelo *CFD* (del orden de 2 grados más) y que en este caso, el valor del modelo no entra dentro del intervalo de confianza. Sin embargo, en la distribución de velocidades se elimina uno de los picos bimodales que caracterizaban la figura ?? y que estaba asociado con los vientos del Noroeste. A diferencia del caso anterior, el modelo infrastima la velocidad del viento de la estación master y la diferencia absoluta entre estos dos valores es menor.

Después de haber realizado un filtrado, se ha estudiado la calidad de la predicción con el filtro añadido y sin él. Sin embargo, con la introducción del filtro los resultados generales son peores y por ello a continuación se expone el estudio realizado sin el filtro. ²

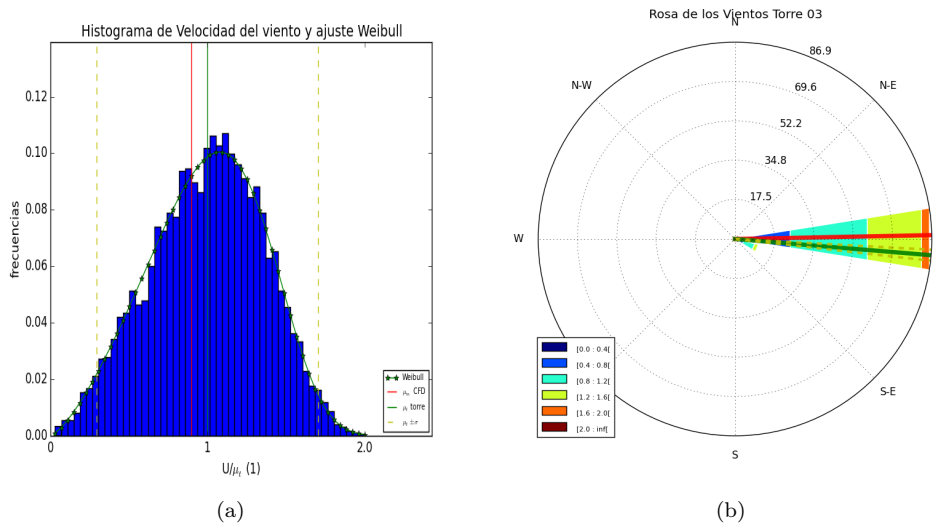


Figura 3: a) Histograma de las medidas diezminutales filtradas de la velocidad del viento de la torre master relativas a la media, junto con el valor medio de las observaciones (verde) y el valor del modelo en el punto de malla más cercano a la torre (rojo). Las líneas amarillas definen el intervalo de confianza para $k=1.96$. b) Rosa de los vientos de las observaciones de la torre master en las que los colores definen las velocidades del viento relativas a la media. Se muestra la dirección media observada (rojo), del modelo (verde) y el intervalo de confianza para $k=1.96$ (amarillo).

²En el Anexo se muestra la tabla comparativa entre los resultados con y sin el filtro

II.a Comparación de los resultados al aplicar el filtrado

En la siguiente tabla se muestran los atributos calculados con el *CFD* con y sin filtro. Se observa que en general, los resultados son peores cuando se aplica el filtro, exceptuando el Speed-up de la TKE y la velocidad del viento absoluta que se ven levemente mejorados.

| VARIABLES | MÉTODOS | MAE | RMSE | ER | R ² | p |
|-------------------------------|-------------|------|------|-------|----------------|------|
| Speed-Up Velocidad del viento | Sin filtro | 0.11 | 0.14 | -0.11 | 0.35 | 0.03 |
| | Filtrado | 0.27 | 0.28 | -0.26 | 0.11 | 0.28 |
| Speed-Up IT | Sin filtrar | 0.17 | 0.22 | 0.12 | 0.22 | 0.10 |
| | filtrado | 0.33 | 0.41 | 0.33 | 0.11 | 0.22 |
| Speed-Up TKE | Sin filtrar | 0.21 | 0.27 | 0.09 | 0.14 | 0.20 |
| | Filtrado | 0.17 | 0.78 | -0.05 | 0.19 | 0.13 |
| Velocidad del viento | Sin filtrar | 2.21 | 2.30 | -2.21 | 0.35 | 0.03 |
| | Filtrado | 1.92 | 2.06 | -1.78 | 0.11 | 0.28 |
| IT | Sin filtrar | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.22 | 0.10 |
| | Filtrado | 0.06 | 0.07 | 0.06 | 0.13 | 0.22 |
| TKE | Sin filtrar | 0.64 | 0.70 | 0.64 | 0.17 | 0.21 |
| | Filtrado | 0.71 | 0.78 | 0.72 | 0.19 | 0.13 |

Tabla 1: Atributos para la evaluación de la calidad del modelo *CFD* con y sin el filtro de las variables absolutas y Speed-Up de la Velocidad del viento, la TKE e IT comparados con la media climatológica a partir de medidas diezminutales de viento. Los atributos son: Error relativo (*ER*), Error cuadrático medio (*RMSE*), Error absoluto Medio(*MAE*), cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson (*R*²) y valor *p*.