

Anexo **1**

Extrapolación espacial del viento

Los modelos matemáticos para la extrapolación espacial del viento son algoritmos matemáticos complejos, nada fácil de implementar. Estos modelos tienen acotado su uso a un tipo de orografía determinada, que cumpla multitud de relaciones.

La extrapolación espacial de velocidades de viento por parte de la aplicación habría requerido de datos minuciosos acerca del terreno del enlazamiento del parque, además de numerosas restricciones en el tipo de orografía. Se perdería en tal caso la generalidad de la herramienta RECOENERGY, una de sus características más importantes.

Los datos de viento son conocidos y celosamente guardados por los promotores de parques eólicos. Así pues, si se conocen datos del recurso eólico en distintos puntos del terreno destinado a albergar el futuro parque eólico, estos se dejan como datos de entrada a la aplicación a través de una matriz que relacione los datos de viento. Esta matriz se denomina “matriz de correlación”. La matriz de correlación, relaciona las velocidades del viento en los emplazamientos conocidos, con la velocidad del viento en cualquier otro punto del parque.

La construcción de esta matriz requiere la extrapolación espacial de los datos conocidos. En algunos casos con perfiles de terrenos suaves y sencillos podemos encontrar una solución rápida basada en hipótesis que simplifican el problema. Sin embargo cuando el perfil del terreno no cumple las restricciones anteriores la solución a las ecuaciones que rigen el movimiento del aire requiere de largos tiempos de computación.

A3.1.- Variaciones espaciales del recurso eólico. Efectos del terreno y perturbaciones del flujo.

Se considera un terreno como llano cuando las diferencias de elevación entre el lugar de referencia y el terreno circundante en un radio de 12 km son inferiores a 60 m y cuando la relación entre la altura y anchura de las elevaciones en un radio de 4 km es inferior a 0.02.

Ahora bien, cuando el terreno del emplazamiento del parque eólico deja de ser plano, la rugosidad del terreno y la presencia de obstáculos se encargan de modificar el perfil vertical del viento.

- Influencia de la rugosidad

a) Si un determinado tipo de característica de terreno (árboles, arbustos, edificios, etc.) con una altura media h_c se encuentra densamente distribuido por el terreno, y si la altura mínima del rotor sobre el suelo es z_r , este tipo de superficie puede ser considerada, para $h_c/z_r \leq 0.75$ como de una rugosidad equivalente igual a $z_0 = 0.056 \cdot h_c^{1.37}$

b) Si un obstáculo individual de altura h_c se encuentra a menos de $20 \cdot h_c$ del emplazamiento y $h_c/z_r \leq 0.33$, el efecto se considera irrelevante. Asimismo, si se encuentra a más de $20 \cdot h_c$, independiente de la relación h_c/z_r .

c) Un cambio en la rugosidad superficial del terreno de z_0 a z_0' provoca un cambio del perfil vertical del viento, generándose un capa límite interna. La altura de esta capa límite varía con la distancia x a partir del cambio de rugosidad según la expresión.

$$h(x) = (0.75 - 0.03 \cdot \ln(\frac{z_0'}{z_0})) \cdot x^{0.8} \cdot z_0'^{0.2}$$

- Influencia de los obstáculos del terreno

Los efectos provocados por los obstáculos del terreno como elevaciones, colinas, etc. pueden ser de aceleración si el obstáculo es de forma y pendiente relativamente suaves, o producirse efectos de reducción si se trata de crestas o bordes agudos.

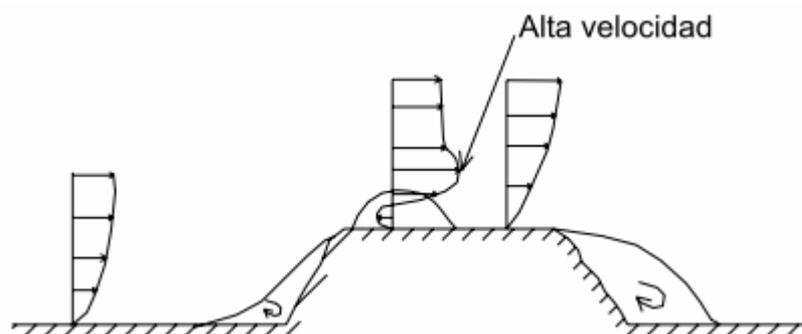


Figura A3.1: Influencia de un obstáculo de pendientes suaves.
Fuente: Universidad de Zaragoza

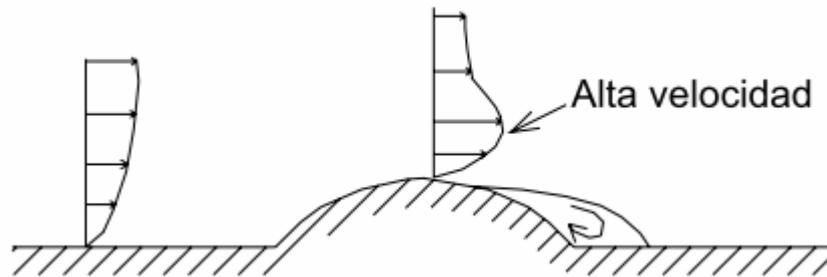


Figura A3.2: Influencia de un obstáculo de pendientes abruptas.
Fuente: Universidad de Zaragoza

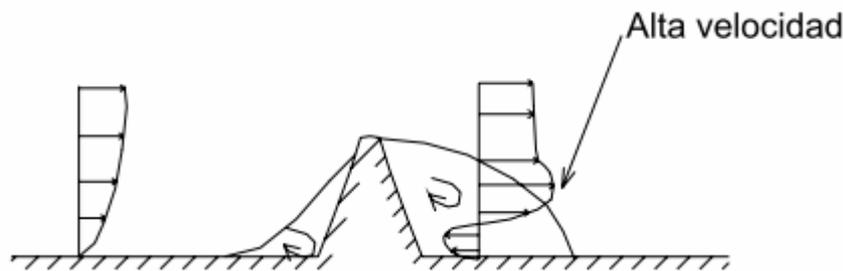


Figura A3.2: Influencia de un obstáculo en forma de cresta.
Fuente: Universidad de Zaragoza

Los estudios aerodinámicos de terrenos indican que sobre las colinas de forma triangular o sinusoidal la velocidad del viento aumenta casi un 100% cerca de la cima, pero que el aumento de velocidad cae rápidamente hasta hacerse casi nulo a una altura aproximadamente igual a la mitad de la anchura de la colina.

Asimismo, las estelas generadas por edificaciones, arbolado, etc. Se caracterizan por reducir la velocidad y aumentar la turbulencia.

A3.1.- Evaluación espacial del recurso eólico.

Como hemos visto debido a la variabilidad espacial del recurso eólico, los datos de viento de los observatorios sólo pueden usarse para evaluar su entorno más cercano. Incluso cuando no existen grandes efectos topográficos superficiales. Por tanto son necesarias técnicas para evaluar el efecto de la topografía sobre las características del viento en puntos distintos al de la estación de medida. En unos pocos casos sencillos existen expresiones algebraicas que permiten cuantificar el

efecto de la topografía sobre el campo de vientos. En otros habrá que recurrir a modelos físicos o numéricos.

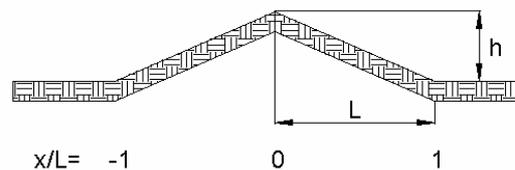
A3.1.1.- Perturbaciones por pequeños accidentes del relieve.

La velocidad del viento se ve afectada por obstáculos como pueden ser pequeños accidentes orográficos (colinas, acantilados, valles, etc.). Las observaciones ponen de manifiesto importantes cambios de velocidad del viento con la altura. Especialmente, cuando el campo de vientos se ve interrumpido por una elevación (acantilado, colina, cortado...), se produce un incremento de velocidad, de tal modo que a una altitud determinada la velocidad del viento sobre el obstáculo es mayor que la que se da corriente arriba del mismo.

Para algunos casos sencillos de perturbaciones bidimensionales del campo de vientos existe solución analítica (Jackson y Hunt 1975). Estas soluciones describen dos capas que se solapan a una altura. En la capa superior ($z > \ell$), el incremento de velocidad a una altura z , relativo a la velocidad a la misma altura corriente arriba es:

$$\Delta S = \frac{\Delta U(z)}{U}(z) = \sigma(x, z) \frac{h}{L} \frac{\ln\left(\frac{L}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{l}{z_0}\right)}$$

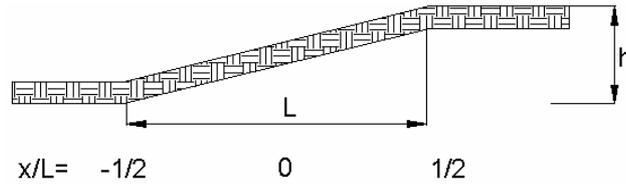
donde $\sigma(x, z)$ es una función que depende de la forma del accidente del relieve, h es la altura del mismo, L la longitud del obstáculo y z_0 la longitud de rugosidad superficial.



$$\sigma(x, z) = \frac{1}{2\pi} * \ln \frac{\left[\left(\frac{x}{L} - 1 \right)^2 + \left(\frac{z}{L} \right)^2 \right] * \left[\left(\frac{x}{L} + 1 \right)^2 + \left(\frac{z}{L} \right)^2 \right]}{\left[\left(\frac{x}{L} \right)^2 + \left(\frac{z}{L} \right)^2 \right]^2}$$

Figura A3.2: Perfil de obstáculo triangular y solución para $\sigma(x, z)$

Fuente: P.S. Jackson & J. C. R. Hunt, 1975



$$\sigma(x, z) = \frac{1}{2\pi} * \ln \left[\frac{\left[\left(\frac{x}{L} - \frac{1}{2} \right)^2 + \left(\frac{z}{L} \right)^2 \right]}{\left[\left(\frac{x}{L} - \frac{1}{2} \right)^2 + \left(\frac{z}{L} \right)^2 \right]} \right]$$

Figura A3.3: Perfil de rampa triangular y solución para $\sigma(x, z)$

Fuente: P.S. Jackson & J. C. R. Hunt, 1975

Por ejemplo, para una colina bidimensional de sección triangular puede usarse esta expresión sencilla:

$$\Delta S = C \frac{h}{L}$$

donde C tiene un valor entre 3 y 4,5

Por debajo de ℓ el perfil perturbado es el logarítmico. La altura a la que produce la separación de capas puede obtenerse mediante:

$$\frac{l}{z_0} = 0.3 \left(\frac{L}{z_0} \right)^{0.67} \Delta$$

Aunque esta formulación es válida sólo para condiciones bidimensionales, también se puede aplicar en casos más generales, como flujo oblicuo sobre colinas bidimensionales (ΔS sólo se refiere entonces a la componente perpendicular de la velocidad del viento) o incluso tridimensional.

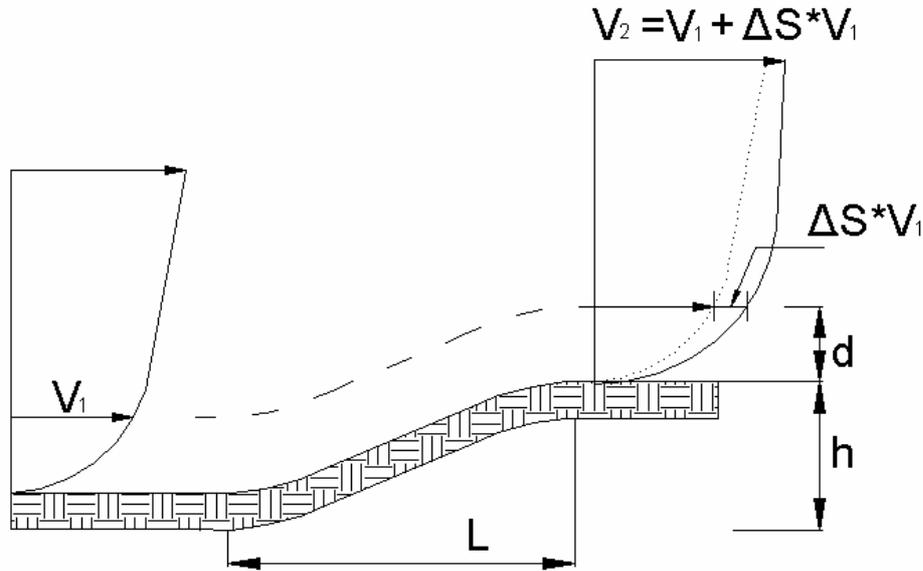


Figura A3.4: Incremento de velocidades. Fuente: Ciemat

A3.1.2.- Modelización física.

La modelización física emplea básicamente el túnel de viento para la evaluación del flujo de aire sobre modelos a escala de la topografía o de los obstáculos. Dado que los modelos empleados son varios órdenes de magnitud más pequeños que los reales, no es evidente que todos los resultados obtenidos sean extrapolables.

La modelización física puede emplearse razonablemente cuando la región modelizada no sea mayor de unas pocas decenas de kilómetros, la porción de atmósfera sea sólo de unos centenares de metros sobre el terreno y la capa límite sea neutra o inestable. Las dimensiones verticales de los accidentes del relieve deben ser menores que la profundidad de la capa límite atmosférica (la capa de la atmósfera donde son observables las transferencias turbulentas de calor y cantidad de movimiento), es decir su altura debe ser de sólo unos centenares de metros.

Este método es de difícil utilización y no está al alcance de la mayoría de los usuarios, lo que unido a la incertidumbre de los resultados hace que ya apenas se utilice.

A3.1.3.- Modelos numéricos.

Este tipo de modelos trata de encontrar soluciones para las ecuaciones que describen el movimiento del aire en la atmósfera y sus interacciones con la superficie. La exactitud de estos modelos dependerá en último término de la corrección y densidad de datos de entrada utilizados y de la validez de sus hipótesis matemáticas.

Las ecuaciones que describen el movimiento del aire en la atmósfera son las de un fluido viscoso, comprensible, en un campo gravitatorio:

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho}\bar{V}P - \bar{g} - \bar{F}_c + \bar{F}_v$$

donde los dos último términos del segundo miembro son las fuerzas de Coriolis y viscosas. Además han de cumplirse las ecuaciones de conservación de la masa, de la energía y del vapor de agua en la atmósfera.

Encontrar la solución para las seis ecuaciones (3 de movimiento, una de conservación de masa, otra de energía y otra de vapor de agua) dentro de un volumen dado de atmósfera, no es factible, por lo que se realizan simplificaciones, Una de las de mayor éxito es la que se limita a obtener un campo de vientos que cumpla únicamente la ecuación de continuidad. Los modelos basados en esta hipótesis son los llamados modelos de conservación de la masa (Mass-consistent models).

Modelos de conservación de la masa.

Este método parte de todas las observaciones de viento en la zona a analizar. A partir de ellas se realiza una estimación inicial del campo de vientos en cada punto de una malla tridimensional que cubra la región, mediante un criterio de interpolación. Este campo inicial

$$\bar{V}_0(u^0, v^0, w^0)$$

es ajustado por un proceso iterativo en cada punto de la red tridimensional, hasta obtener otro

$$\bar{V}(u, v, w)$$

que satisface la ecuación de conservación de la masa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{V}) = 0$$

En los puntos próximos a la superficie se obliga al vector viento a ser paralelo a la superficie terrestre. El modelo asume además la densidad del aire constante con lo que las ecuaciones quedan reducidas a

$$\text{div} \bar{V} = 0$$

Todos los cálculos se realizan dentro de un volumen de control cuyos límites inferiores están determinados por la topología del terreno.

Para obtener la solución ajustada por mínimos cuadrados se emplea el método variacional. Se establece el funcional

$$E(u, v, w, \lambda) = \int_V \left[\alpha_1^2 (u - u^0)^2 + \alpha_1^2 (v - v^0)^2 + \alpha_1^2 (w - w^0)^2 + \lambda \left(\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} \right) \right] d\text{vol}$$

donde x e y son las direcciones horizontales, z es la dirección vertical; u, v, w son las componentes de la velocidad ajustada; u^0, v^0, w^0 son las correspondientes velocidades observadas; $\lambda(x, y, z)$ es el multiplicador de Lagrange y los valores α_1 son los módulos de precisión de Gauss.

Sobre la correcta utilización de los modelos de conservación de la masa conviene tener en cuenta que:

- los datos de viento para input del modelo deben proceder de una red de observatorios suficientemente densa para dar una idea general de las características del flujo a través de la región modelizada.
- deben utilizarse únicamente si la resolución de la malla es suficiente para ver los grandes rasgos de la topografía.
- en caso de efectos no debidos a la topografía, de escala menor a la región modelizada, es precisa una red de observaciones todavía más densa.
- favorecer los buenos resultados del modelo el que las condiciones de contorno sean suficientemente homogéneas, por ejemplo en el caso de islas.

- la región modelizada debe incluir todos los accidentes topográficos relevantes para el flujo del viento en la región.

Como comentarios a este tipo de modelos puede decirse que describen adecuadamente el campo de vientos cuando el factor dominante del mismo es la topografía. En este caso los resultados obtenidos son buenos en valor promedio anual, reproducen las mismas características de los datos de entrada y sirven para valorar cualitativamente unas zonas frente a otras. Entre sus ventajas está que el tiempo de ordenador requerido no es excesivamente grande, la posibilidad de utilización de datos de varios observatorios y la finalidad de los resultados. Sin embargo hay que recordar que los resultados de la simulación corresponden a promedios de celda y no reflejan rasgos topográficos de escala menor. Por otro lado el modelo considera únicamente la ecuación de conservación de la masa.

Modelos avanzados.

Los modelos de conservación de la masa tienen importantes limitaciones cuando se dan efectos de estratificación de la atmósfera, separación de flujo, pendientes muy acusadas o turbulencias, tanto en terrenos sencillos como en topografías complejas. Por ello se están desarrollando modelos que consideren las ecuaciones del movimiento: modelos 3D Navier-Stokes (3D N-S) y sean capaces de predecir zonas de recirculación y efectos de estratificación. Sin embargo, es una desventaja los largos tiempos de computación requeridos.

A3.1.4.- El modelo WA⁵P

Este modelo ha sido el utilizado en la elaboración del Atlas Eólico Europeo. Fue desarrollado por Riso National Laboratory de Dinamarca.

Fundamentos.

La capa atmosférica más próxima al suelo, capa límite planetaria (PBL), tiene un espesor que oscila entre los 100 metros en las noches claras y más de dos kilómetros

en días de verano. La parte inferior de ella se denomina capa superficial y ocupa aproximadamente un 10% de la capa límite.

Para situaciones de interés en energía eólica no se consideran casos de vientos bajos sino sólo aquellas en que la capa límite alcanza alrededor de 1 Km. En estos casos, en la capa superficial, sobre terreno homogéneo, puede utilizarse el perfil logarítmico de variación del viento con la altura:

$$V(z) = \frac{V.}{K} \ln \frac{z}{z_0}$$

En estas condiciones, el equilibrio entre las fuerzas de presión, de Coriolis y de fricción lleva a una relación entre la velocidad geostrófica y la de fricción conocida como ley de arrastre geostrófico sobre la que se ha desarrollado el modelo *WASP*:

$$V_g = \frac{V.}{K} \sqrt{\left(\ln\left(\frac{V.}{fz_0}\right) - A\right)^2 + B^2}$$

$$\text{sen } \alpha = \frac{BV.}{KV_g}$$

donde α es el ángulo entre el viento en superficie y el geostrófico, A y B son constantes empíricas (A=1.8, B=4.5 para atmósfera neutra).

Esquemáticamente puede decirse que el modelo, a partir de una hipótesis, basada en la observación del terreno, del valor de z_0 puede obtener, a partir de una medida de viento a la altura z, el valor de $V.$ y de ahí el valor de V_g . De esta manera, a partir de una serie de medidas podría obtenerse una serie de valores del viento geostrófico y su dirección. Para evaluar el recurso eólico en otro emplazamiento, con otro valor de rugosidad z_0 , se efectúa la hipótesis de que el viento geostrófico que le corresponde es el mismo y entonces bastaría calcular el valor correspondiente de la serie de $V.$ y de α a partir de las ecuaciones y obtener $V.$ y su correspondiente dirección.

El modelo incorpora varios submodelos cuyo objetivo es el de calcular las perturbaciones sobre el viento producidas por obstáculos, por la naturaleza del terreno y por la orografía. De esta forma calcula un hipotético viento sin perturbar a partir del cual se efectúa el cálculo posterior de lo que el modelo llama ATLAS el modelo efectúa el proceso inverso y puede calcular el viento esperado en un emplazamiento con unos determinados obstáculos, rugosidad y relieve.

Entre las ventajas que presenta este modelo están:

- facilidad de uso.
- necesidad de sólo un observatorio.
- buen tratamiento del efecto de obstáculos, cambios de rugosidad y topografías sencillas.

Y entre sus inconvenientes:

- facilidad de uso. El modelo produce resultado aún con datos no correctos. Utiliza "default data". (Este inconveniente no es culpa de *WASP* sino del usuario).
- se basa en distribuciones de viento del tipo Weibull, lo cual no siempre es cierto.
- no da buenos resultados en topografías complejas, donde no se cumple la ecuación de equilibrio geostrofico.
- no es capaz de predecir efectos de separación de flujo.
- no tiene en cuenta efectos de estabilidad ni de variaciones diarias o estacionales del viento.

Por todo ello debe limitarse su uso a topografías no muy complejas y a la realización de depuración de los datos de las observaciones producidas por obstáculo o rugosidad superficial.