

Seminario de Investigación - Informe I

Caracterización de la Interacción del Viento con la Superficie Terrestre

Pablo Cárdenas Zamorano

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile

20 de abril de 2016

Resumen El objetivo de este informe es explicar de manera breve todas las componentes que se desarrollan en la interacción entre las masas de aire en movimiento y la superficie de la tierra. Si bien, se reconoce que existe un profundo marco teórico, se explicará, evitando formulación matemática extensiva, los mecanismos por los cuales se altera el viento, las aproximaciones de la capa límite y la estabilidad de esta (turbulencia).

1. Naturaleza del Recurso Viento

En primer lugar se analizará el comportamiento del viento, y las causas que originan este. Se conoce que el movimiento de las masas de viento en la superficie terrestre están impulsadas por los gradientes de presión que ocasionan los cambios diferenciales de temperatura por la radiación solar en la tierra. Esto permite que, en un modelo muy idealizado, el aire se mueva desde las zonas mas cálidas (zona cercana al ecuador), hacia las mas frías (los polos), sin embargo, junto con esto, tenemos las fuerzas de coriolis debido a la rotación de la tierra, la cual genera patrones de circulación en este movimiento ideal.

Se tiene entonces, a grandes rasgos, una caracterización bastante certera acerca de como se genera el viento en nuestra atmósfera (de manera muy global), sin embargo este modelo no permite establecer aproximaciones, en términos de predicción de viento a corto plazo, ya que el recurso viento de por si es un fenómeno **altamente variable** en escalas geográficas y temporales mucho mas pequeñas que el ciclo radiativo solar.

Se analizarán entonces los tipos de variación y las escalas en que estas afectan al viento.

1.1. Variaciones Geográficas

Los movimientos producidos por la radiación solar y las fuerzas de coriolis, se distorsionan debido a la presencia de los continentes y a las masas de agua que rodean el planeta. De manera local, la complejidad de un terreno a estudiar puede alterar completamente la velocidad media del viento y su dirección.

La presencia de cimas o valles generan cambios en la velocidad locales que se traducen en cambios de presión, de la

misma manera terrenos con muchos obstáculos, como bosques o edificios, desplazan la capa límite atmosférica provocando que los vientos mas fuertes se encuentren mas arriba de lo normal, además de la turbulencia inducida en su estela.

1.2. Variaciones Temporales

Para poder estimar correctamente la magnitud del viento en una zona, es necesario conocer de qué manera este puede variar en la escala temporal. Se tiene entonces un espectro de frecuencias para la variabilidad del viento, en donde se reconocen los cambios de largo plazo, los diurnos y aquellos que se dan de manera mas instantánea y se asocian a la turbulencia. Cada uno de estos funcionan a causa distintos mecanismos físicos y se pueden tratar de manera independiente para la estimación de alguna zona, según el tipo de proyecto a realizar.

1.2.1. Inter-Anuales

Corresponden a las variaciones que ocurren en periodos de tiempo superior a un año. En esta clasificación entran los fenómenos que afectan directamente al método natural de movimiento de aire por radiación solar, por lo cual se puede nombrar al cambio climático u otro fenómenos climáticos extraños. Además, como observación, cabe destacar que aun es difícil hacer predicciones de largo plazo, aun con una amplia base de datos histórica de velocidad de viento, ya que aun hay incerteza con respecto a los mecanismos que alteran la temperatura de la tierra.

1.2.2. Anuales

Las variaciones anuales en la velocidad media del viento corresponden básicamente a los cambios térmicos provocados en la superficie debido a la rotación de la tierra con respecto al sol, en otra palabras, existen claramente variaciones en el viento (y el clima en general) según las estaciones del año. De manera general, se puede esperar tener una velocidad promedio mayor en verano, mientras que en invierno los valores son menores (esto se explica por la estabilidad de la capa límite y su relación con los gradientes térmicos). Esta generalización depende mucho de la zona a estudiar y puede ser afectado en gran medida por la complejidad del terreno.

1.2.3. Diarias

También conocidas como diurnas. La dirección y magnitud del viento se ven afectadas por la simple rotación de la tierra con respecto a su eje, por lo cual se aprecian grandes diferencias entre el comportamiento de día y el de noche, siendo el primero (particularmente a medio día) donde los gradientes térmicos pueden generar corrientes de viento mas elevadas.

1.2.4. Micro Escala

Por convención, entran dentro de esta categoría, aquellas variaciones que fluctúan en la escala de tiempo menor a los 10 minutos. Básicamente en este punto, la relevancia central se halla en los fenómenos de turbulencia asociados a la estabilidad del flujo, los cuales tienen relación con las distintas condiciones de rapidez, efectos superficiales, fuerzas de coriolis y gradientes térmicos con los que interactúa el flujo. Si bien la turbulencia es por definición caótica, un acercamiento estadístico permite aproximar de buena manera el comportamiento del flujo a esta escala. Tales aproximaciones se detallaran en las siguientes secciones.

Dentro de esta escala se puede incluir también a las ráfagas (*gusts*) que surgen en las corrientes. Estadísticamente corresponden a los valores extremos que puede alcanzar el viento en periodos cortos de tiempo y son de vital importancia en los parámetros constructivos de turbinas, ya que pueden someter a estas a esfuerzos cíclicos no previstos y generar fallas por fatiga.

2. Capa Límite Atmosférica

2.1. Estabilidad

Antes de proceder a definir de manera resumida los efectos de turbulencia que se generan dentro de la capa límite, es necesario revisar el concepto de estabilidad de esta.

La estabilidad en la atmósfera depende exclusivamente de los efectos térmicos en esta. En específico, si los gradientes térmicos en la dirección positiva de la altura es mayor que el gradiente térmico adiabático provocado por el cambio en la presión estática, se habla de atmósfera estable, y la relación con la turbulencia radica en que una atmósfera estable tiene la capacidad de “estabilizar” las perturbaciones que se puedan generar en cualquier componente del vector velocidad.

Los valores del gradiente térmico adiabático es variable según la ubicación de la zona a muestrear, sin embargo si se considera el campo de presión hidroestático y aplicando conocimientos de termodinámica, se puede demostrar que:

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_{adi} = \frac{-0,98 \text{ }^{\circ}\text{C}}{100 \text{ m}}$$

Se clasifican entonces 3 tipos de estratificación para la estabilidad:

Estratificación Inestable: El gradiente térmico es menor que el adiabático, lo que hace que las capas de aire no vuelvan a su condición anterior. Esto genera una capa límite gruesa con vórtices de gran escala que aceleran los procesos de mezcla y de transferencia de momentum, además las componentes fluctuantes de la velocidad son menores.

Estratificación Neutra: Los gradientes térmicos y el adiabáticos se anulan. Es la situación de vientos intensos provocados por la turbulencia debido a rugosidad en el terreno.

Estratificación Estable: El gradiente adiabático permite volver a la condición anterior el movimiento por el gradiente térmico. En este caso la turbulencia de la capa está dominada por los efectos viscosos y el esfuerzo cortante en el viento puede tomar valores considerables.

2.2. Turbulencia

Si bien la estabilidad de la capa límite, afecta de manera directa al comportamiento turbulento del viento (generación y destrucción progresiva de vórtices y disipación de la energía cinética), el viento es por si, un fenómeno turbulento y esto se ve a través del comportamiento errático de la velocidad en las escalas temporales pequeñas (menores a 10 minutos).

Para esta escala, se tiene entonces que la velocidad se puede modelar como un promedio mas su componente oscilante:

$$u = U + u'$$

Y conviene también definir una función de densidad de probabilidad asociada. Basado en la experiencia y los datos empíricos, la distribución que mejor modela estas fluctuaciones en el corto plazo corresponde a una normal. Se tiene entonces:

$$p(u) = \frac{1}{\sigma_u \sqrt{2\pi}} \exp - \left[\frac{(u - U)^2}{2\sigma_u^2} \right]$$

Donde σ_u corresponde a la desviación estándar de los valores medidos de velocidad del viento.

Para terminar de caracterizar la turbulencia del viento, se utiliza la intensidad de turbulencia. Se define como:

$$TI = \frac{\sigma_u}{U}$$

Y los valores típicos para este parámetro van desde los 0,1 hasta los 0,4, siendo los valores mayores para las velocidades mas bajas, aunque esta afirmación esta bastante condicionada al tipo de terreno con el cual se enfrenta el viento.

2.3. Altura y Perfil de Capa Límite

Entonces, se reconoce el comportamiento estadístico del viento, ahora hace falta encontrar una expresión matemática que modele a la capa límite en función de los valores promedio de velocidad de viento. De manera global, se estima que la capa límite planetaria es del orden de 1 [km] y dentro de esta es necesario aproximar un perfil. Sin recurrir a mayor justificación matemática (las cuales se pueden encontrar en las fuentes), en la actualidad se suelen utilizar dos aproximaciones:

Perfil Logarítmico:

$$U(z) = \frac{U_*}{k} \ln \frac{z}{z_0}$$

Donde $U_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ se define como la velocidad de fricción y $k = 0,4$ es la constante de Von Karman. Además z_0 corresponde a la rugosidad de la superficie y se encuentra tabulado para diferentes tipos de terrenos.

Perfil de Potencia:

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha$$

Donde $U(z_r)$ es una velocidad de referencia a la altura z_r y α es una constante que depende del tipo de terreno, aunque se suele utilizar $\alpha = 1/7$ (muy parecido a flujo turbulento sobre placas planas).

En la práctica ambas aproximaciones se suelen utilizar obteniendo resultados bastante parecidos y reales, aunque los errores pueden llegar a ser del orden de un 13 % con respecto a datos medidos.

2.4. Importancia del Terreno

Primero, se puede clasificar el tipo de terreno en terreno plano o terreno complejo. El discriminante para poder entrar en una u otra categoría, va a depender tanto de las características geométricas como de la dirección que pueda llevar el viento en la zona. A grosso modo se puede hablar de terreno plano, cuando existen pequeñas irregularidades (en comparación al alto de capa límite), tal es el caso de bosques, o pequeñas colinas.

Por el otro lado, el terreno complejo contiene elevaciones y/o depresiones de grandes dimensiones, como cerros, valles o cañones y también se puede subdividir en dos tipos:

pequeña y gran escala, según su comparación con la capa límite.

La cantidad de efectos y las consecuencias que generan las diferencias en la “suavidad” del terreno han y están siendo ampliamente estudiadas por investigadores, por lo cual a continuación viene un listado no extensivo sobre las mas importantes.

- Terreno plano con obstáculos: Relevante en el desprendimiento de la capa límite y la recuperación de la estela.
- Terreno plano con cambio en la rugosidad superficial: como es el caso de pequeños bosques en la zona.
- Elevaciones y depresiones en terreno complejo: tanto a pequeña como a gran escala.

3. Predicción del Viento

Una síntesis importante de todo lo que se ha hablado en el documento, es que, actualmente se posee el conocimiento y el poder computacional como para poder hacer estimaciones certeras frente al recurso viento. El uso principal uso de estas estimaciones es poder estimar el potencial eólico de un lugar geográfico, ya que la potencia que se puede extraer es directamente proporcional a U^3 .

Frente a este escenario lo que se hace es realizar un análisis estadístico con respecto a los datos obtenidos en terreno y junto con esto, obtener estimadores, principalmente de la velocidad media del viento. La función de densidad de probabilidad que mejor modela la velocidad del viento en intervalos de tiempo largo (de la escala de los años) es la distribución Weibull, aunque también suele usarse la distribución Rayleigh.

Otra observación importante con respecto a este tema, es la importancia de poder estimar las probabilidades de viento extremo, ya que estos valores son los que limitaran el diseño de turbinas en la zona.

Referencias

- [1] Manwell, J., McGowan, J. & Rogers, A., (2009), *Wind Energy Explained. Theory, Design and Application*, 2nd Edition.
- [2] Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D. & Bossanyi, E., (2011), *Wind Energy Handbook*, 2nd Edition.
- [3] Ehrlich, R., (2013), *Renewable Energy, A First Course*.