



Escuela de Verano  
para estudiantes de Enseñanza Media  
4 al 27 de enero 2010

Universidad de Chile  
Escuela de Verano 2010  
Curso Energías Renovables I

# Guía Teórica: Experiencia Eólica

Escrita por: Javier Gavilán

## Enero 2010



## 1. Introducción

En la última década las energías renovables han cobrado gran importancia debido a la preocupación por el cambio climático, y como los países han aumentado sus emisiones de gases de invernadero a medida que su población ha aumentado. Estos efectos han levantado la alarma sobre un amenazante panorama que vendría dentro de varios años más, el cual podría amenazar la subsistencia del hombre. Sumado a los problemas del cambio climático, se encuentra el alza de los precios de combustibles fósiles, los cuales se espera que comiencen a escasear para el año 2050. Es por ello que el uso de energías renovables ha sido cada vez más frecuente y se espera que siga en aumento.

Dentro de las variadas opciones de ERNC (energías renovables no convencionales), se encuentra la energía eólica, en donde se aprovecha la energía que poseen los vientos que se trasladan sobre la superficie terrestre, a diferentes alturas.

## 2. Los vientos como recurso energético

Casi la totalidad de lo que ocurre en la Tierra, referente a lo climático, es debido a la radiación solar. Esta cantidad de energía que el sol nos irradia se transforma en una multitud de efectos diferentes que influyen sobre el aire generando vientos:

### 1) *Las diferencias de temperaturas en la Tierra:*

Cuando los rayos de Sol alcanzan la superficie de la Tierra, ésta se calienta, pero no de forma uniforme. El aire caliente se eleva desde el ecuador y flota hacia los polos dejando espacio para que los vientos fríos del norte y del sur soplen hacia el ecuador.

### 2) *La continua rotación de la Tierra alrededor de su propio eje:*

Si el globo no rotase, el aire simplemente llegaría al Polo Norte y al Polo Sur, para posteriormente descender y volver al ecuador.

3) En la superficie terrestre, existe una gran diferencia en la velocidad con que se calientan la tierra y el mar. El aire caliente que hay sobre la tierra se eleva hacia el cielo, donde se enfría.

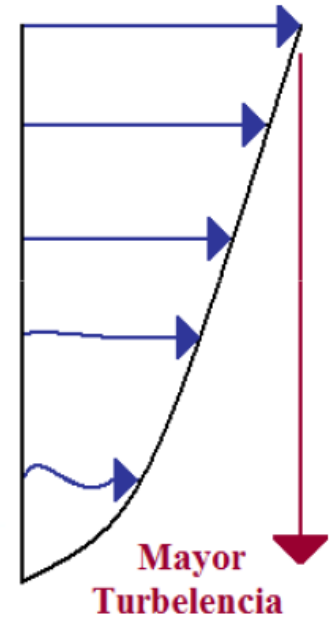
***En general, los vientos se producen cuando el aire se mueve desde zonas de altas presiones hacia otras de bajas presiones.***

## 2.1 El viento y la turbulencia

El viento de una determinada zona geográfica no es constante, sino que variable por zona climática, hora, día, mes, etc.. Uno de los factores más importantes a considerar dentro de la variabilidad del viento es la altura.

*La velocidad del viento en la superficie es menor que a mayor altura, debido al roce que se genera entre la superficie y el viento, lo que genera que el aire que se mueve entre ambas superficies se “frene” produciendo turbulencias (o sea, el viento pierde energía).*

**MENOR VELOCIDAD**



La velocidad del viento para determinada altura se puede estimar si se conoce una altura de referencia y la rugosidad del terreno:

$$v(h) = v_{ref} \frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{ref}}{z_0}\right)}$$

$h$ : Altura a la que se desea conocer la velocidad

$h_{ref}$ : Altura de referencia

$z_0$ : Rugosidad del terreno

$v_{ref}$ : Velocidad de referencia, a la altura de referencia

Otras causas de la turbulencia son los obstáculos que se encuentran sobre el terreno, estos pueden ser: árboles, edificios, cerros, etc..



Figura 1: Turbulencia producida por obstáculos.

Sin embargo, lomas con pendientes (inclinación) menores a  $20^\circ$  puede acelerar el viento.

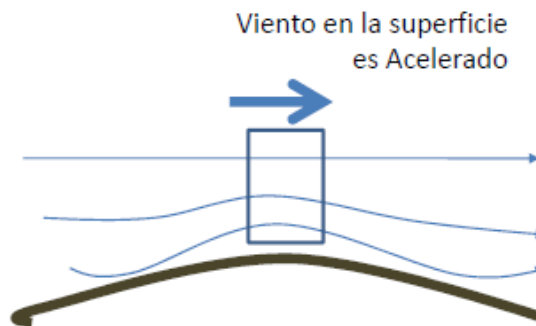


Figura 2: Turbulencia donde el viento se acelera.

**En conclusión, mayor turbulencia menor recurso eólico (menos energía o potencia para generación).**

## La geografía y características locales tienen gran efecto en el comportamiento del Viento

A continuación se muestran gráficos de variabilidad de la velocidad de los vientos para distintas condiciones:

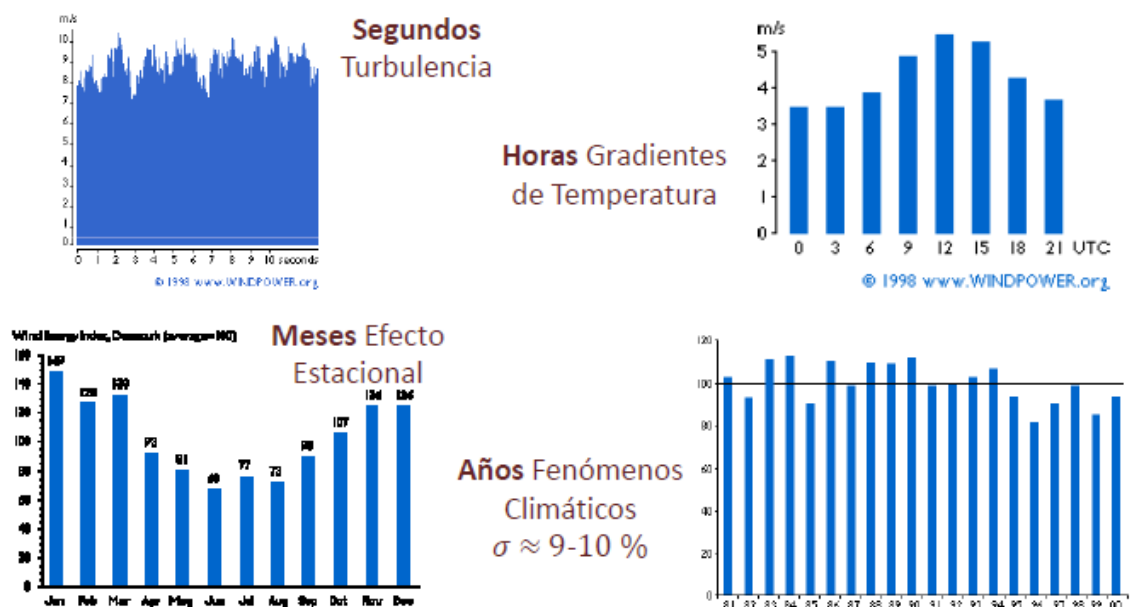


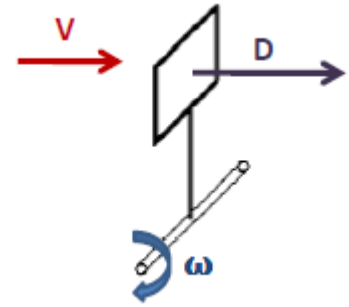
Figura 3: Distintos gráficos sobre la variabilidad del viento.

### 3. Un poco de aerodinámica

- **Fuerza de Arrastre (Drag):**

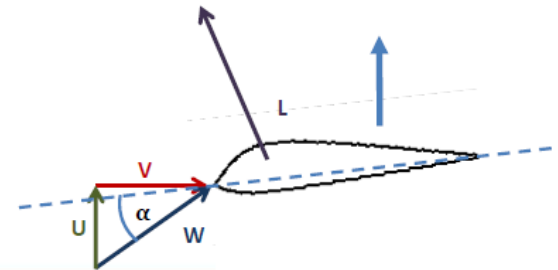
Actúa en una superficie perpendicular a la dirección del viento.

Fuerza paralela al viento.



- **Fuerza de Arranque (Lift):**

Fuerza perpendicular a la velocidad relativa del viento  $w$ .



Toda Turbina esta sujeta  
a Fuerzas de Arrastre y  
Arranque a la ves



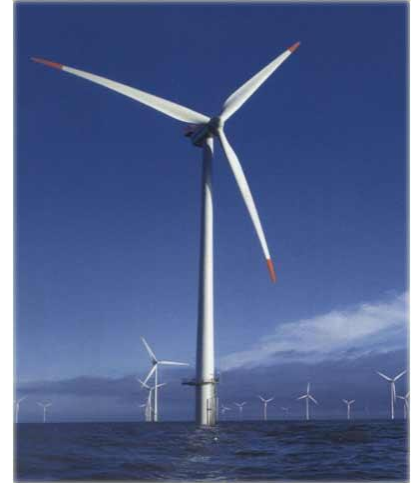
El Truco esta en como  
maximizar cada fuerza  
por separado

## 4. La turbina eólica

Existen dos tipos de turbinas para la generación eólica, cada una de ellas tiene sus ventajas y desventajas:

### *Turbina de eje horizontal:*

- Mayor eficiencia aerodinámica.
- Diseño que permite maximizar la potencia de generación.
- Fuerza de arranque (lift).



### *Turbina de eje vertical:*

- Multi-direccionalidad.
- Fuerza de arrastre (drag).



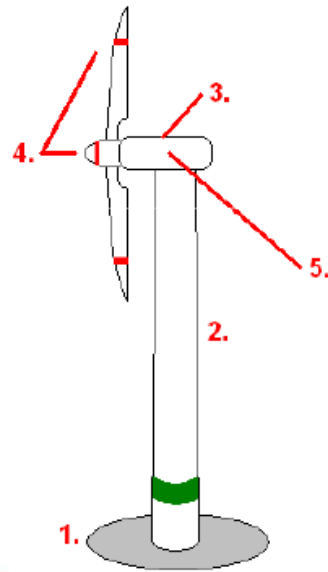
El tipo de turbina más utilizado es la horizontal, debido a que se maximiza la potencia que se puede generar.

Se utilizan en general 2 o 3 aspas por generador, porque se puede generar mayor energía a grandes velocidades del viento. Además, a mayor número de aspas significan un aumento en los costos de construcción de cada una y se necesita una fuerza del viento mayor.

Teóricamente la máxima potencia extraíble es de un 49% de la potencia del viento. Este valor se obtiene considerando conceptos de energía cinética y ecuación de Bernoulli para fluidos.

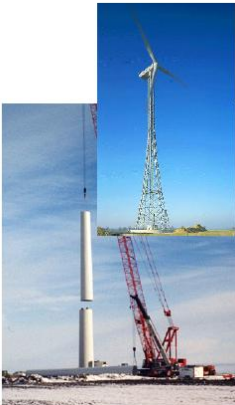
## 4.1 Componentes de una turbina de eje horizontal

1. Fundación
2. Torre
3. Cabeza (Nacelle)
4. Rotor y Aspas
5. Generador y Equipos Eléctricos



### 4.1.1. Fundación

La fundación es la base de la torre, la que otorga estabilidad, y el tipo de base depende de la calidad del terreno. Ésta puede ser: Superficial (para suelos rígidos) o de Pile (para suelos blandos).



### 4.1.2. Torre

Como se vio que a mayor altura implica mayor generación de energía, las torres más altas generarán más. Sin embargo, el costo aumenta en gran medida a mayores alturas.

Los materiales con los que se construyen las torres pueden ser de: metal, hormigón o acero tubular.

#### 4.1.3. Rotor y Aspas

El conjunto de aspas y el rotor son los encargados de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica.

Se usan en general 2 a 3 aspas, siendo éste último el más utilizado.

Los materiales pueden ser tanto de fibra de vidrio, carbono o de madera. Lo importante es que tengan algún nivel de flexibilidad y sean resistentes.

Las aspas tienen sistemas de control para mejorar la incidencia del viento en ellas (y así maximizar la potencia extraída) y, además, poseen sistemas de frenado. Esto último es para proteger el generador de vientos muy fuertes.



#### 4.1.4. Generador y Equipos Eléctricos

El generador puede ser de: inducción, inducción doblemente alimentado, o sincrónico. El generador de inducción es mejor para grandes variaciones de velocidades de vientos y permite que el generador se conecte directamente a la línea de transmisión.

Los equipos eléctricos (o electrónica de potencia) son aquellos que permiten transformar la energía (aumentar o disminuir el voltaje) para que sea inyectada en la red. También hay equipos que permiten transformar la corriente en continua o en alterna, según se requiera.



#### 4.1.5. Cabeza (Nacelle)

En la cabeza se encuentran los equipos que hacen funcionar la turbina: control de aspas, generador, electrónica de potencia. También se incluyen sensores que miden el estado del generador y del clima.

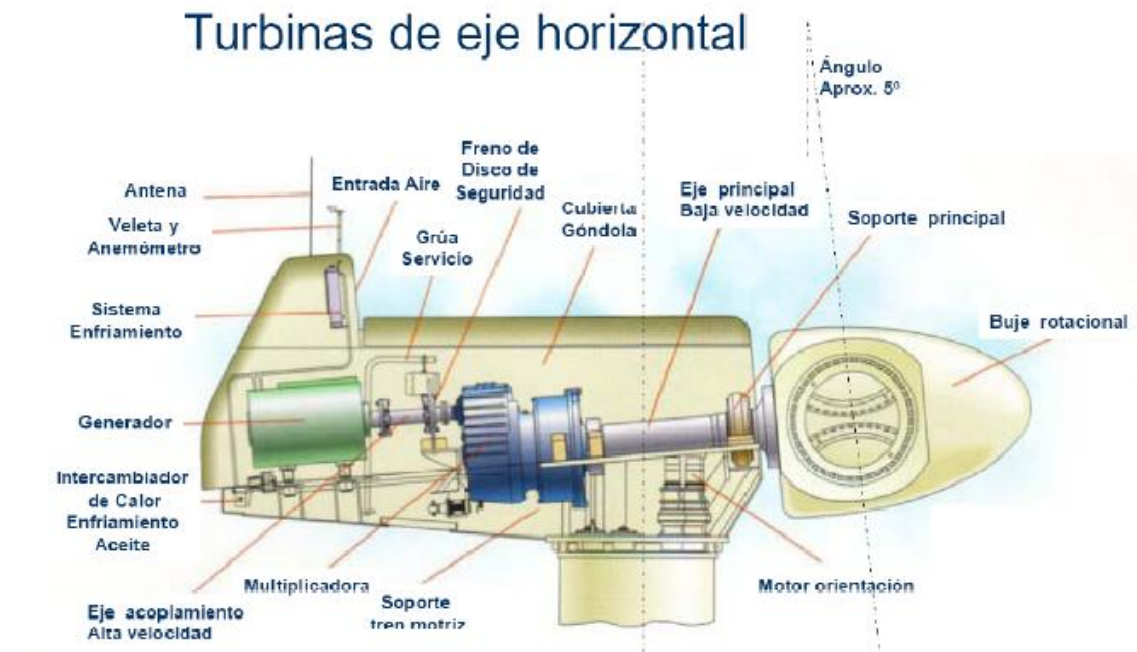
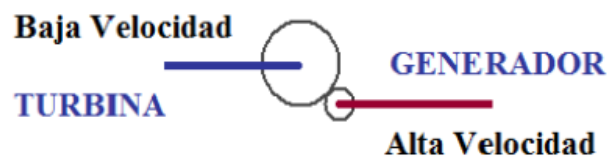


Figura 4: Componentes de un Nacelle.

La góndola contiene los componentes más importantes del aerogenerador, incluyendo el multiplicador y el generador eléctrico. A la derecha de la góndola tenemos el **rotor** del aerogenerador, que está compuesto por las **palas** (muy parecidas al ala de un avión) y el **buje** (la que se acopla al eje).

El **eje de baja velocidad** conecta el buje del rotor al **multiplicador**, el cual permite que el **eje de alta velocidad** que está a su izquierda gire mucho más rápido, lo que permite el funcionamiento del **generador eléctrico**.



El controlador es una computadora que continuamente monitoriza las condiciones del aerogenerador y permite el control del mecanismo de orientación de rotor que mantiene al rotor de frente al viento. En caso de cualquier anomalía (por ejemplo, un sobrecalentamiento en el multiplicador o en el generador), el aerogenerador automáticamente se detiene y da un aviso.

La **unidad de refrigeración** se encarga de mantener al generador a una temperatura prudente adecuada. El **anemómetro** y la **veleta** se dedican a dar información de la velocidad del viento y la dirección de este, al controlador electrónico, respectivamente.

Se presenta en la siguiente figura el gráfico potencia generada para diferentes velocidades de viento de una turbina Vestas V82 de 1.65[MW]:

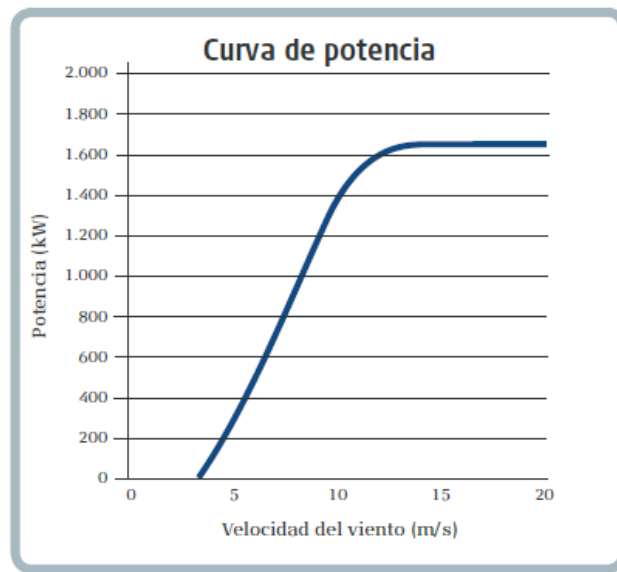


Figura 5: Gráfico Potencia en función de la velocidad del viento de un aerogenerador.

Se puede ver que un aerogenerador necesita una velocidad mínima de arranque (3 [m/s] aproximadamente) y hay una velocidad límite de generación (12 [m/s] para este modelo).

Cada modelo tiene una curva similar pero difieren en que algunos generadores están hechos para vientos más fuertes o mucho menores.

## 5. Parque Eólico

En parque eólico es una serie de generadores eólicos conectados en red, los cuales suministran una determinada energía a la red eléctrica.

Las características de un parque son: potencia nominal (valor máximo que genera la suma de todos los generadores) y el área comprendida.

La potencia nominal depende del generador. Los aerogeneradores de grandes parques tienen potencias nominales que van desde 1.65 [MW] hasta los 3 [MW] y se espera que se fabriquen generadores de 9 [MW] en el futuro.

Como se vio anteriormente, los obstáculos en el terreno generan turbulencia, por lo tanto, las torres deben colocarse separadas entre sí: ***se utiliza como referencia 3 diámetros del aspa hacia el lado y 5 diámetros hacia atrás.***

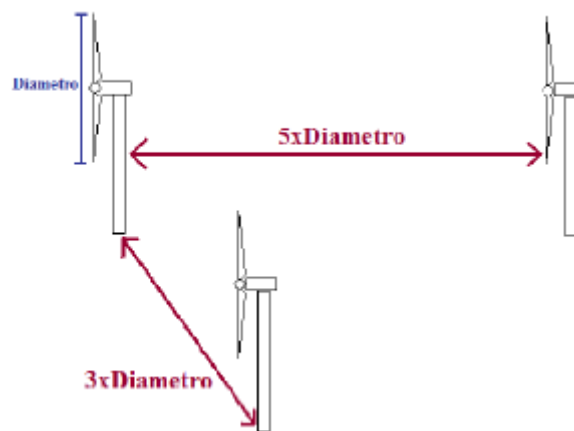


Figura 6: Distancia de separación de aerogeneradores.

Entonces, un parque eólico de pocas torres puede utilizar una gran área, pese a que el área edificada es pequeña.

### 5.1. Tipos de parques

Los parques eólicos se encuentran establecidos en zonas con buenos regímenes de viento. Estas zonas pueden estar en lugares apartados de la costa tierra adentro (*in land*), en las orillas de la costa (*in shore*) o dentro en el mar (*off shore*).



Figura 7: Parque eólico off shore.