

# CAPÍTULO 2

## Sistemas Eólicos de Energía Eléctrica.





## 2.1.-Sistemas de Energía Eléctrica

Se emplea el término Sistema de Energía Eléctrica (S.E.E.) para hacer referencia a aquellos sistemas relacionados con la generación, transporte, distribución y consumo de energía eléctrica.

Elementos que constituyen un S.E.E. son pues los presentes en centrales generadoras de energía eléctrica, redes eléctricas de transporte y distribución de esa energía en Alta Tensión, Media Tensión y Baja Tensión, subestaciones eléctricas AT-MT, centros de transformación en BT y consumos en AT, MT y BT.

Los S.E.E. han sufrido una enorme evolución desde sus orígenes hasta hoy, tanto en lo que se refiere a medios de generación, transporte, distribución y utilización, como a materiales empleados, estrategias de operación, nuevas aplicaciones y fuentes de energía, principalmente. En los últimos años, la llamada crisis energética ha acelerado las iniciativas tendentes a lograr una mayor eficiencia en todos los aspectos relacionados con la energía, lo cual, unido a la creciente preocupación por el medio ambiente, ha reactivado el interés por las llamadas energías renovables.

Entre las energías renovables, la procedente del viento es hoy día una de las que ofrece un mayor interés desde el punto de vista de los costos asociados a la instalación y explotación, exceptuando aquellos en los que la hidroeléctrica pueda considerarse como energía renovable.

La ubicación geográfica de los centros de generación suele obedecer a razones de proximidad a fuentes primarias de energía o instalaciones receptoras – puertos marítimos, oleoductos, etc. – más que a razones de proximidad a los centros de consumo. Al objeto de minimizar las pérdidas, el transporte de energía eléctrica desde los centros de generación hasta los centros de consumo se efectúa a través de las redes de Alta Tensión.

Una de estas alternativas tecnológicas es generar la energía eléctrica lo más cerca posible al lugar del consumo, precisamente como se hacía en los albores de la industria eléctrica, incorporando ahora las ventajas de la tecnología moderna y el respaldo eléctrico de la red del sistema eléctrico, para compensar cualquier requerimiento adicional de compra o venta de energía eléctrica. Esta modalidad de generación eléctrica, Generación Distribuida, es la característica de la generación eólica.

La Generación Distribuida, representa un cambio en el paradigma de la generación de energía eléctrica centralizada. Aunque se pudiera pensar que es un concepto nuevo, la realidad es que tiene su origen en los inicios mismos de la generación eléctrica. De hecho, la industria eléctrica se fundamentó en la generación en el sitio del consumo, para después evolucionar, debido al crecimiento demográfico, al desarrollo de economías de escala y a la demanda de bienes y servicios, hacia el esquema de Generación Centralizada. Cuando la generación eléctrica se estructuró en torno a la corriente alterna y centros de transformación, las grandes centrales podían encontrarse en lugares distantes de las zonas de consumo, aunque cerca del suministro del combustible y el agua.

A pesar de que los consumos son aleatorios, se ha comprobado que su evolución diaria a lo largo de todos los meses del año obedece aproximadamente a ciertos modelos, empleándose las Curvas de Demanda Diaria para predecir en primera instancia cuál va a ser la demanda en cada período. El número de grupos generadores que deben entrar en funcionamiento se puede programar con ciertos criterios lógicos y se hace posible la optimización de la explotación.

Por otro lado, la energía eléctrica no es susceptible de ser almacenada en grandes cantidades, con lo cual hay que establecer los mecanismos adecuados para ajustar la generación a la demanda existente en cada momento. Surge así la necesidad de incluir controles automáticos que vigilen y realicen esa y otras funciones, tales como las relacionadas con los valores de las variables del sistema (tensión, frecuencia, etc.), las cuáles no pueden desviarse mucho de sus valores nominales, ya que afectaría negativamente al buen funcionamiento y a la seguridad de los receptores y de las instalaciones.

Aunque el principal objetivo de un S.E.E. es el de satisfacer la demanda, existen otros objetivos relacionados con la idea de cumplir el objetivo principal de la mejor forma posible, considerando aspectos tales como seguridad, fiabilidad, economía y estabilidad. Aparece así un conjunto de funciones a realizar, entre las que destacan:

- Planificación de la red de transporte
- Mantenimiento y Política de Crecimiento
- Análisis de Seguridad del Sistema
- Control de Frecuencia-Potencia
- Actuación de los Sistemas de Protección

La introducción de nuevas formas de energía, como la energía eólica, ha de ser contemplada a la hora de definir y realizar las funciones anteriormente señaladas si se persigue el fin de satisfacer la demanda de la mejor forma posible. Asimismo, es

necesario considerar sus características a la hora de efectuar los estudios y análisis frecuentes en los S.E.E.:

- Cortocircuitos
- Flujo de Potencia
- Estabilidad
- Análisis de Contingencias
- Previsión de Cargas

## 2.2.- La Energía del Viento

El viento es producto del calentamiento de la superficie de la tierra por el sol. La insolación varía con la latitud y el agua absorbe el calor más rápidamente que la tierra, con las consiguientes diferencias de temperatura. El viento es el flujo de convección que continuamente intenta ajustar los desequilibrios termodinámicos resultantes. Como ocurre con la radiación solar, la inclinación de la tierra proporciona al viento una cierta estacionalidad, sin embargo, la masa del aire, la propia rotación de la tierra y la naturaleza del terreno le confiere al viento un modelo de distribución muy complejo.

Siendo la radiación solar más intensa en el ecuador que en los polos, el movimiento de rotación de la tierra produce una desviación de los vientos, generando diferentes zonas de actuación:

- • Zonas de calmas y bajas presiones ecuatoriales; áreas con vientos prácticamente nulos.
- • Zonas tropicales; vientos alisios y contralisios.
- • Zonas de altas presiones subtropicales; vientos alisios casi constantes en legiones del Sahara, Libia, Gobi, Méjico. Australia.
- • Zonas templadas; viento menos regular.
- • Zonas polares; altas presiones en superficie, como en zonas subtropicales.

El viento es más fuerte sobre los océanos que sobre los continentes, ya que el relieve y la vegetación frenan el movimiento del aire. Aunque los recursos eólicos terrestres están ampliamente distribuidos, prevalecen a lo largo de las costas marinas, en las más altas elevaciones y en las mayores latitudes. Para situar el reparto geográfico del viento en el suelo, se han confeccionado mapas que indican la dirección y velocidad media del viento en la superficie terrestre para los diferentes meses del año habiéndose encontrado que las zonas más favorables para la producción de energía eólica están situadas, sobre los continentes, al borde de la costa.

Algunos vientos son conocidos universalmente por la regularidad de su régimen como por ejemplo los alisios, que soplan en ambos lados del ecuador alrededor de todo el globo, o los vientos monzónicos que soplan en el sudeste de Asia. Otros soplan de modo intermitente durante periodos cortos, aunque con intensidad y frecuencia más elevadas en algunas estaciones, como el Siroco en el norte de África. La potencia del viento se incrementa al cubo con su velocidad y es proporcional a la densidad del aire, con lo cual pequeñas diferencias en la velocidad media del viento significan grandes variaciones en la energía de salida.

Las turbulencias reducen la energía aprovechable del viento, ya que tiende a perturbar el buen funcionamiento del rotor de las turbinas eólicas. La teoría global del motor eólico de eje horizontal fue establecida por Betz encontrando que la energía máxima capaz de ser recogida por una turbina eólica no puede superar en ningún caso los  $16/27$  de la energía cinética de la masa de aire que la atraviesa por segundo. La dirección e intensidad del viento es estocástica, pero su comportamiento puede ser tratado estadísticamente. Se dice que cada zona posee una velocidad de viento medio anual, típicamente en el rango de 2.5 a 10 m/s. Se ha demostrado que para periodos de aproximadamente 30 días o más la distribución probabilística de la velocidad del viento sigue razonablemente una relación matemática conocida como la distribución de Weibull. Para zonas geográficas tierra adentro, normalmente se usa una relación matemática más simple, conocida como la distribución de Rayleigh.

De los registros anemométricos se deducen diferentes curvas, que utilizan para caracterizar el comportamiento del viento:

- • Velocidades anuales clasificadas.
- • Frecuencia anual de vientos.
- • Duración de calma y de viento improductivo.
- • Variación del viento en función de la estación.
- • Energía disponible por meses.
- • Reparto energético según velocidad.
- • Viento según su dirección.

Emplear los recursos del viento para la generación de potencia eléctrica presenta ventajas y desventajas. Por un lado, la fuente de energía es gratuita, inacabable y no contaminante, así como disponible día y noche. El equipamiento necesario no es especialmente caro y tiene bajos costos de mantenimiento. Por otro lado, la potencia de origen eólico no es fácilmente ajustable, requiere un cierto control y su aprovechamiento económico depende del emplazamiento geográfico concreto. Asimismo, la fiabilidad de las turbinas eólicas exige un diseño más específico que otros tipos de generadores y la

disponibilidad de selección en cuanto a tamaño está limitada. Sin embargo, haciendo balance de las ventajas y los retos a superar, la potencia de origen eólico es una forma viable de reducir el consumo de combustibles.

### 2.3.- Los Aerogeneradores.

La energía eólica se transforma en energía eléctrica mediante un aerogenerador que es un generador de electricidad activado por la acción del viento. Un aerogenerador, básicamente, es un generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento (turbina eólica). La energía eólica es la energía cinética del aire que proporciona energía mecánica a un rotor hélice que, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

Existen diferentes tipos de aerogeneradores, dependiendo de su potencia, la disposición de su eje de rotación, el tipo de generador etc. Pueden dividirse en dos grupos: los de eje vertical y los de eje horizontal. El aerogenerador de eje horizontal es considerado el más eficiente, es el más utilizado en la actualidad.

#### 2.3.1.- Componentes de un aerogenerador

- **Palas del Rotor:** Las palas del rotor capturan el viento y transmiten su potencia hacia el buje.

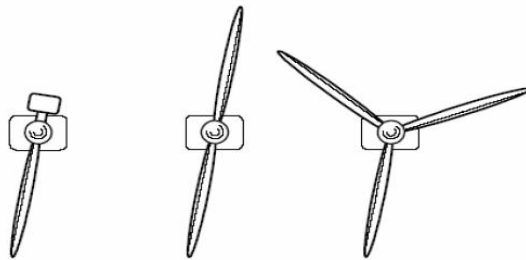


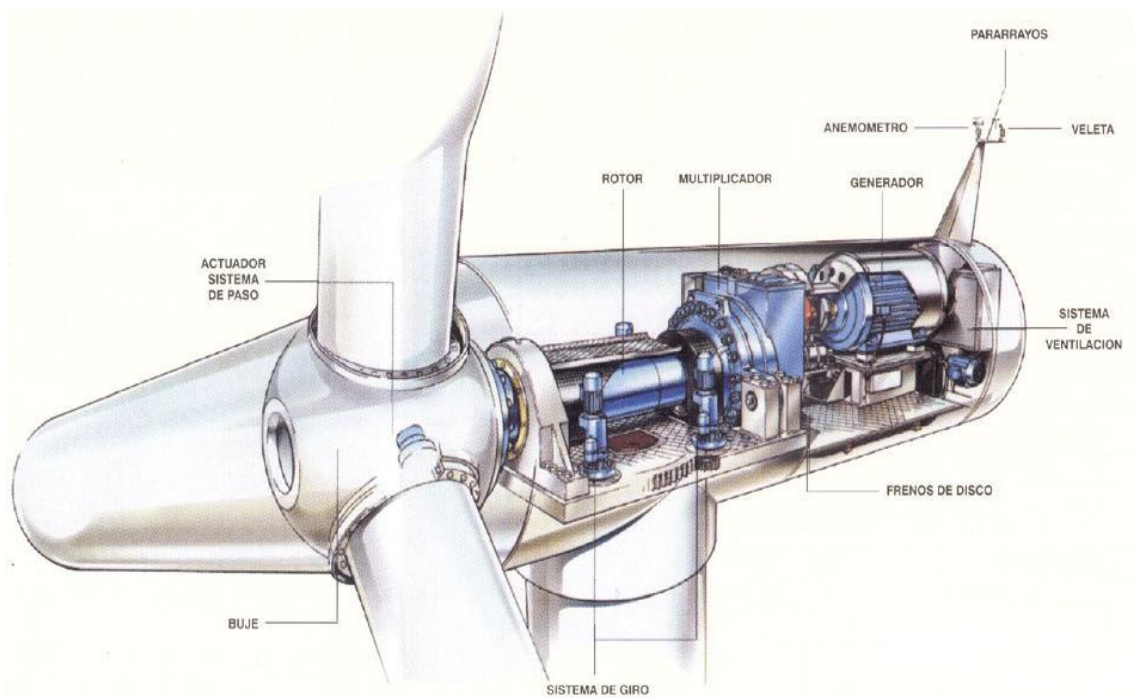
Ilustración 17. Turbinas con 1, 2 y 3 aspas

- **Buje:** El buje del rotor permite acoplar el rotor al eje de baja velocidad del aerogenerador.

- **Sistema Activo de Giro de Pala:** Sistema activo de giro de las palas sobre su eje longitudinal que controla las actuaciones de la máquina. Cuando el generador funciona a carga parcial se mantendrá el ángulo de ataque del perfil de tal manera que se extraiga la máxima potencia del viento. Cuando las velocidades del viento son muy elevadas se

disminuye el ángulo de ataque, manteniendo la potencia constante y reduciendo las fuerzas sobre el rotor eólico.

- **Sistema Hidráulico:** Dentro del buje hay un sistema hidráulico que permite el movimiento de las palas en torno a su eje longitudinal. Se puede acceder a él desde una entrada en el propio buje.
- **Sistema de Bloqueo del Rotor:** Cuando es necesario realizar algún tipo de mantenimiento dentro del buje, existen sistemas que permiten mantenerlo bloqueado.



*Ilustración 18. Partes de un aerogenerador.* <http://www.renovables-energia.com/2009>

- **Mecanismo de Control de Balanceo:** En una aeroturbina la conexión entre el rotor eólico y el eje de baja velocidad es uno de los puntos más críticos. A esta interfaz se la conoce habitualmente como buje, y se caracteriza por incorporar un mecanismo de control del balanceo que controla el movimiento del rotor perpendicular a su plano de rotación, permitiendo reducir las cargas de fatiga en toda la aeroturbina. El costo, la complejidad y el peso del buje son aspectos importantes que deben ser considerados en el diseño de una aeroturbina eficiente. La experiencia dice que han aparecido serios problemas en la integración de la raíz de las palas al buje, la propia conexión del buje al aerogenerador, las conexiones para configurar el mecanismo de cambio de paso de pala,



así como el acoplamiento adecuado de las juntas y cojinetes de los sistemas de balanceo y sus sistemas de control.

- **Góndola:** La góndola contiene los componentes clave del aerogenerador, incluyendo el multiplicador y el generador eléctrico. El personal de servicio puede entrar en la góndola desde la torre de la turbina.
- **Acoplamiento Fijo entre el Buje y el eje de Baja Velocidad:** Permite transmitir el movimiento del rotor eólico, al capturar las palas la energía del viento.



*Ilustración 19. Eje de baja velocidad de una aeroturbina © 1998 www.windpower.org*

- **Eje Torsor:** Un eje torsor (quill shaft), es por definición un eje delgado y sólido diseñado y conformado para transmitir el mismo par que el que transmitiría un eje más largo sometido a niveles de carga superiores. En la transmisión del par el eje torsor actúa como un muelle torsor girando alrededor de su eje longitudinal.
- **Dispositivos de Acoplamiento del Eje:** Un dispositivo de acoplamiento en el que el eje está acoplado a un cojinete cuyas bolas, dispuestas en agujeros radiales, engranan en un surco del propio eje. Una serie de anillos deslizantes fuerza el acoplamiento selectivo de las bolas con la ranura o surco del eje apropiado. El conjunto de anillos puede moverse en ambas direcciones hacia las ranuras.
- **Muelles Torsores:** Un muelle torsor es un dispositivo de material elástico que reacciona contra la torsión o un movimiento giratorio. Son muelles helicoidales que ejercen un par o fuerza rotatoria ofreciendo resistencia a un par externo aplicado. El final de los muelles torsores está unido a otros componentes, y cuando esos componentes rotan alrededor del centro del muelle helicoidal, el muelle trata de llevarlos a su posición original. A pesar de lo que el nombre que tienen implica, los muelles torsores están sometidos a esfuerzos flectores más que a esfuerzos torsores.

- **Caja Multiplicadora:** La caja multiplicadora como elemento del tren de potencia aparece como una opción de diseño habitual ya desde las primeras turbinas eólicas concebidas para producir energía eléctrica. La necesidad de este elemento se justifica por el diferente régimen de giro que requiere un rotor eólico y un generador eléctrico de diseño convencional. Suele estar formado por engranajes epicicloidales. Un engranaje planetario o engranaje epicicloidal es un sistema de engranajes (o tren de engranajes) consistente en una rueda dentada interior más tres engranajes externos o satélites que rotan sobre un engranaje central o planeta. Típicamente, los satélites se montan sobre un brazo móvil o portasatélites que a su vez puede rotar en relación al planeta. Los sistemas de engranajes planetarios pueden incorporar también el uso de un engranaje anular externo o corona, que engrana con los satélites. Es esta construcción, con tres ruedas pequeñas moviéndose en órbita alrededor de una rueda común central, la que ha dado lugar al nombre de la caja multiplicadora planetaria.
- **Base Vibratoria de Sujeción:** Es una base vibratoria de sujeción diseñada para absorber cargas radiales y longitudinales excepcionalmente altas. Desarrollado para aeroturbinas y especialmente para aquellas con buje integrado y caja multiplicadora.
- **Acoplamiento Flexible:** Acoplamiento flexible del eje de salida de la multiplicadora con el eje de alta velocidad del generador.



*Ilustración 20. Acoplamiento flexible a la salida de la caja multiplicadora. © 1998 www.windpower.org*

- **Eje del Generador:** Eje de alta velocidad del tren de potencia gira a la velocidad necesaria para permitir el funcionamiento del generador eléctrico.

- **Freno del Rotor:** El eje de alta velocidad está equipado con un freno de disco mecánico de emergencia. El freno mecánico se utiliza en caso de fallo del freno aerodinámico, o durante las labores de mantenimiento de la turbina.
- **Acoplamiento Deslizante:** El acoplamiento deslizante (slip coupling) sirve como limitador de par actuando de la misma manera que el acoplamiento de dos ejes colineales. Cuando la carga excede el par máximo que puede soportar el acoplamiento los dos ejes rotan uno respecto a otro hasta alcanzar el valor de par máximo. Un acoplamiento de este estilo está diseñado para operar con un des-alineamiento angular de hasta 3° y lineal de hasta 2,5 mm, entre los dos ejes. Las características de este componente permiten acoplar ejes de distintos diámetros.
- **Generador:** Convierte la energía mecánica en eléctrica.
- **Unidad de Refrigeración:** La unidad de refrigeración contiene un ventilador eléctrico utilizado para enfriar el generador eléctrico. Además contiene una unidad de refrigeración del aceite empleada para enfriar el aceite del multiplicador. Algunas turbinas tienen generadores enfriados por agua.
- **Sistema Hidráulico:** El sistema hidráulico es utilizado para restaurar los frenos aerodinámicos del aerogenerador.
- **Mecanismo de Orientación (Yaw Drive):** El mecanismo de orientación es activado por el controlador electrónico, que vigila la dirección del viento utilizando la veleta. Normalmente, la turbina sólo se orientará unos pocos grados cada vez, cuando el viento cambia de dirección.
- **Anemómetro y Veleta:** El anemómetro y la veleta se utilizan para medir la velocidad y la dirección del viento. Las señales electrónicas del anemómetro son utilizadas por el controlador electrónico del aerogenerador para conectar el aerogenerador cuando el viento alcanza aproximadamente 5 m/s. El ordenador parará el aerogenerador automáticamente si la velocidad del viento excede de aproximadamente 25 m/s, con el fin de proteger a la turbina y sus alrededores. Las señales de la veleta son utilizadas por el controlador electrónico del aerogenerador para girar al aerogenerador en contra del viento, utilizando el mecanismo de orientación.
- **Controlador Electrónico:** El controlador electrónico tiene un ordenador que continuamente monitoriza las condiciones del aerogenerador y que controla el mecanismo de orientación. En caso de cualquier disfunción (por ejemplo, un sobrecalentamiento en el multiplicador o en el generador), automáticamente para el aerogenerador y avisa al ordenador del operario encargado de la turbina.

- **Plataforma:** Es la plataforma que sirve de soporte a la máquina.
- **Torre:** Estructura metálica que soporta la góndola. Para aerogeneradores grandes, suele tener una primera franja de hormigón para dar mayor solidez estructural.

### 2.3.2.- La Energía Producida.

El rotor, compuesto por las palas del rotor y el buje, está situado corriente arriba de la torre y la góndola en la mayoría de los aerogeneradores modernos. Esto se hace sobre todo porque la corriente de aire tras la torre es muy irregular (turbulenta)

¿Qué es lo que hace que el rotor gire?

La respuesta parece obvia: el viento.

Pero en realidad, no se trata simplemente de moléculas de aire que chocan contra la parte delantera de las palas del rotor.

Los aerogeneradores modernos toman prestada de los aviones y los helicópteros tecnología ya conocida, además de tener algunos trucos propios más avanzados, ya que los aerogeneradores trabajan en un entorno realmente muy diferente, con cambios en las velocidades y en las direcciones del viento.

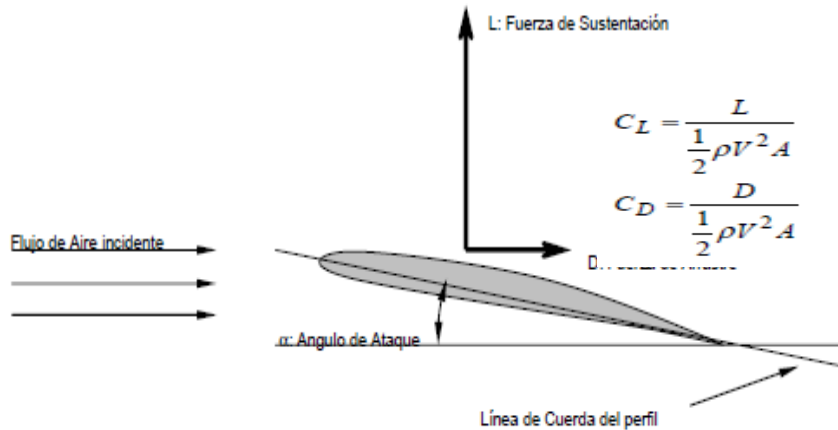
#### Aspectos aerodinámicos de perfiles de rotores eólicos

Cuando un cuerpo está sujeto a la acción de un flujo de fluido, se produce una fuerza que es altamente dependiente de la forma del cuerpo. La dirección de la fuerza resultante de interacción entre el fluido y el cuerpo varía dentro de  $\pm 90^\circ$  de la dirección del flujo.

Si la forma del cuerpo es irregular (por ejemplo, una papa) la fuerza resultante tiende a ser paralela a la dirección del flujo. Por el contrario si el cuerpo tiene una forma aerodinámica, la fuerza tiende a ser perpendicular a la dirección del flujo.

Es así como la fuerza aerodinámica puede ser expresada por dos componentes: una componente totalmente perpendicular al flujo, conocida como fuerza aerodinámica de sustentación y otra componente que es paralela al flujo, conocida como la fuerza aerodinámica de arrastre. En términos físicos, la fuerza sobre un cuerpo causada por su

interacción con un fluido se produce por cambios en la velocidad y dirección del flujo alrededor del contorno del mismo. Estos cambios en velocidad se ven representados en cambios de presión alrededor de cuerpo y estas diferencias de presión es lo que producen la fuerza aerodinámica. La ilustración 21 muestra las fuerzas aerodinámicas sobre un perfil aerodinámico.



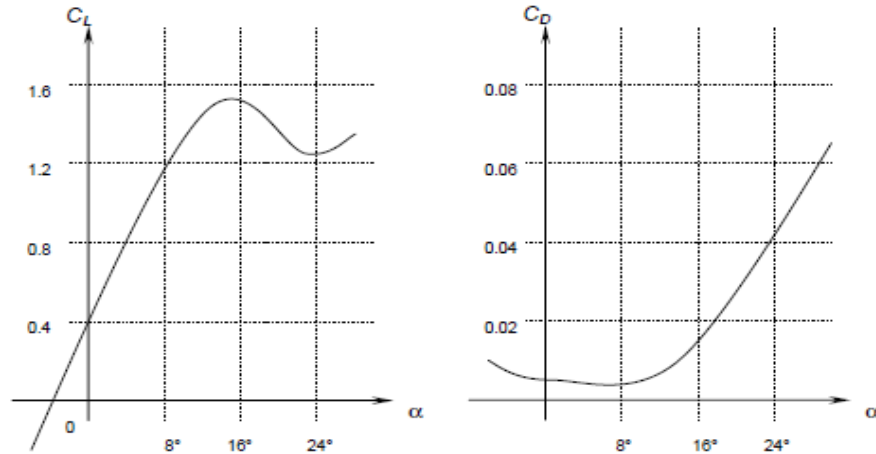
*Ilustración 21. Fuerzas aerodinámicas sobre perfil*

La fuerza aerodinámica total es, entonces, la suma vectorial de la fuerza de Sustentación ( $L$ : Lift) y de Arrastre ( $D$ : Drag), implicando además que diferentes formas aerodinámicas tendrán diferentes características en términos de estas fuerzas. Es de práctica común describir las propiedades aerodinámicas de perfiles en términos de coeficientes adimensionales, lo cual facilita el análisis y la comparación entre perfiles aerodinámicos.

Los coeficientes adimensionales son:

- Coeficiente de Sustentación
- Coeficiente de Arrastre

Angulo de Ataque ( $\alpha$ ) – Angulo formado por la línea de cuerda del perfil aerodinámico y la dirección del flujo incidente. Estos coeficientes se han determinado experimentalmente en túneles viento, para un numero amplio de perfiles aerodinámicos. La ilustración 22 muestra el comportamiento típico de estos coeficientes de un perfil para un rango específico de ángulos de ataque.



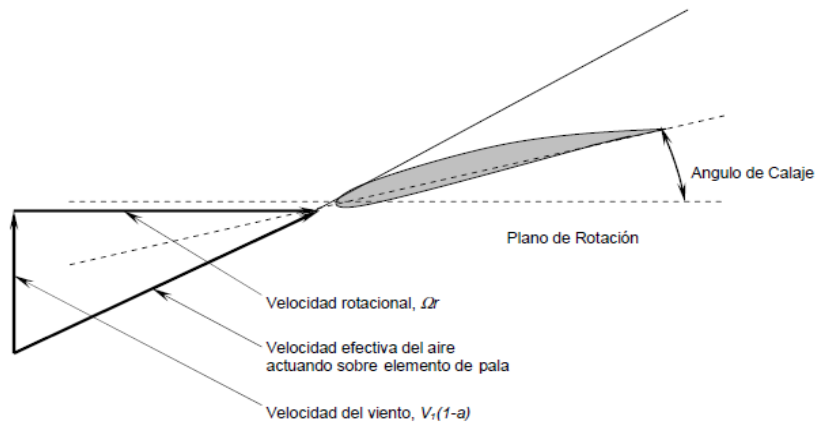
**Ilustración 22. Comportamiento de coeficientes de Sustentación y Arrastre de un perfil Aerodinámico**

Nótese que, en general los perfiles aerodinámicos alcanzan su valor máximo de coeficiente de sustentación en ángulo de ataque entre  $10^\circ$  y  $15^\circ$ . Después de este valor el perfil entra, en lo que se conoce, como la condición de pérdida. En esta condición los perfiles disminuyen severamente su capacidad de generar fuerza de sustentación y su arrastre crece rápidamente. Los perfiles aerodinámicos de las palas de los rotores eólicos son elegidos para operar entre la condición de pérdida y valores de ángulos de ataque bajos o aún negativos. En la actualidad, se utiliza la condición de pérdida para realizar control aerodinámico en la operación de equipos, esto con el fin de mantener velocidad de rotación constante en los rotores.

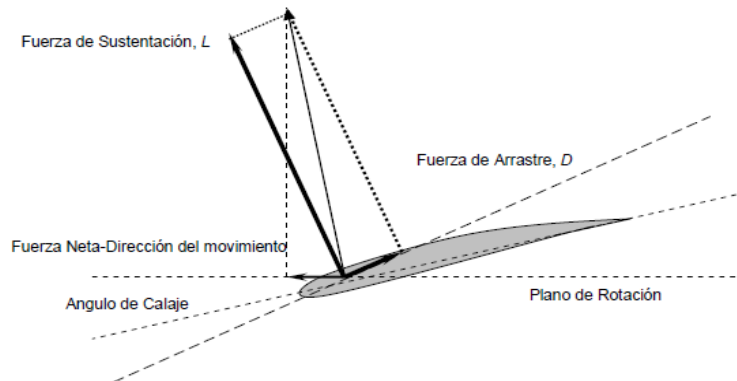
Otro aspecto que influye en el comportamiento aerodinámico de los perfiles aerodinámicos es el efecto de la rugosidad de la superficie del perfil y los efectos de fricción entre el fluido y el perfil. Además los coeficientes son afectados por efectos de la viscosidad del fluido, representada a través del Número de Reynolds.

La información aerodinámica generalmente es suministrada para rangos de Número de Reynolds altos, esto es valores en la región entre  $10^6$  y  $10^7$ . La mayoría de los equipos eólicos grandes operan en condición de número de Reynolds similares a los encontrados en la literatura científica, sin embargo para máquinas pequeñas esta información es escasa y un uso poco cuidadoso de esta información debe ser tratada con extrema precaución, al momento de diseñar pequeños rotores eólicos.

Conocida la información aerodinámica como en la ilustración 23, se pueden calcular las fuerzas generadas en una sección de pala de un equipo eólico. Para ello es esencial entender entonces el diagrama de las velocidades que inciden sobre un elemento de pala.



**Ilustración 23. Diagrama de Velocidades actuando sobre un elemento de pala**



**Ilustración 24. Diagrama de las fuerzas actuando sobre un elemento de pala**

Vale la pena mencionar que cada elemento está desplazándose a una velocidad rotacional diferente, dependiendo de su posición radial; al igual que para cada posición radial los elementos de pala están sometidos a diferentes ángulos de ataque y por consiguiente varía el ángulo de calaje a lo largo de la pala.

Para el diseño de rotores de eje horizontal, en cada elemento de la pala se procura mantener un mismo ángulo de ataque aerodinámico que corresponda a la máxima relación entre la fuerza de sustentación y de arrastre del perfil aerodinámico.

Así pues, el diseñador debe introducir variaciones en el ángulo de calaje (ó ángulo de paso) a lo largo de la pala, lo mismo que permitir variaciones en la longitud de la cuerda del perfil aerodinámico para maximizar la extracción de energía.

### Teoría de la cantidad de movimiento. La ley de Betz

La formulación de la teoría se basa en las siguientes hipótesis:

1. Supone al aire como un fluido ideal, sin viscosidad en todo el campo fluido excepto en las proximidades inmediatas del rotor.
2. El movimiento en todo el campo fluido es subsónico y a muy bajos números de Mach, con lo cual se puede considerar al aire como un fluido incomprensible y, por tanto, con densidad constante en todo el campo fluido.
3. El movimiento del fluido es estacionario, es decir, sus variables termodinámicas no dependen del tiempo pero sí del espacio.
4. No tiene en cuenta la velocidad de giro del rotor ni la de giro del fluido en la estela, y los vectores de velocidad son siempre paralelos al eje de simetría del tubo de corriente.
5. Contempla al rotor como un disco poroso según la teoría del disco de Froude.
6. Las magnitudes empleadas para representar las variables fluidas en una determinada sección recta cualquiera al tubo de corriente, son magnitudes equivalentes a la sección y uniformes en toda ella.

Sea una aeroturbina inmersa en el seno de una corriente de aire. La velocidad en la sección A1 en el infinito aguas arriba es la velocidad incidente del viento  $V_1$ , por definición. Se aprecia que a medida que nos vamos acercando al rotor, viniendo de la sección A1, la velocidad va decreciendo paulatinamente, de manera que cuando llegamos a la propia sección A del rotor la velocidad vale  $V$  y su módulo es menor que  $V_1$ . Si seguimos viajando aguas abajo pasado el rotor la velocidad sigue decreciendo progresivamente también, hasta llegar al infinito aguas abajo a la sección A2, donde la velocidad vale  $V_2$ , siendo su módulo menor que el de la velocidad  $V$ .

Si estudiamos ahora la magnitud de presión, vemos que su variación a lo largo del tubo de corriente es muy distinta a la de la velocidad. La presión en la sección A1 vale  $P_1$ , que es la presión atmosférica del aire en el infinito aguas arriba. A medida que viajamos hacia el rotor, la presión comienza a subir progresivamente hasta valer  $P_+$  en la cara anterior al rotor, por lo que hay una sobrepresión respecto a la atmosférica  $P_1$  en dicha cara. A continuación, a través del rotor hay un salto de presiones y la presión decrece a un nivel por debajo de la atmosférica, siendo su valor  $P_-$  justo en la cara posterior del rotor. Finalmente si seguimos viajando hasta el infinito aguas abajo, la presión crece siempre progresivamente hasta llegar



en el infinito aguas abajo a la sección A2 al valor P2, que es exactamente igual a P1.

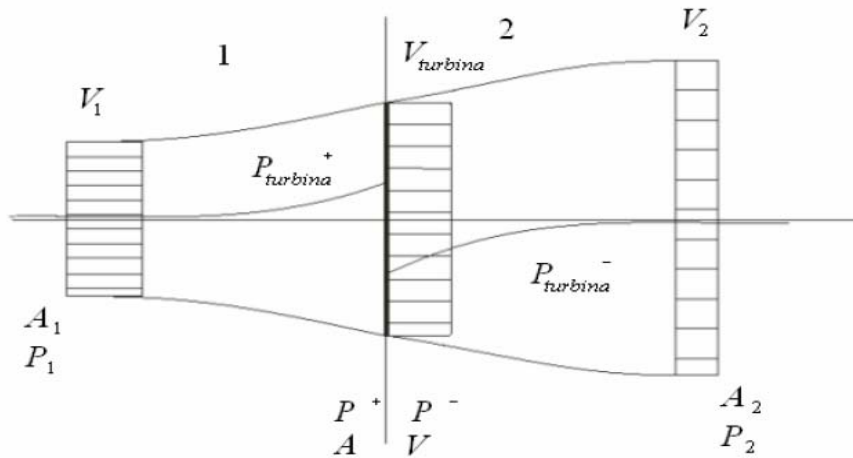


Ilustración 25. Tubo de corriente en un aerogenerador

Además hay que considerar que en el disco y debido precisamente a esas diferencias de presiones, se produce una fuerza resultante T que denominaremos tracción, y que lleva la dirección de la velocidad V y el sentido de la misma.

Planteando las principales ecuaciones de esta teoría:

**Conservación del gasto másico:**

El caudal másico  $\dot{m}$  se ha de mantener a lo largo del tubo de corriente. Como tan sólo la velocidad axial contribuye a él se cumplirá:

$$\dot{m} = \rho A_1 V_1 = \rho A V = \rho A_2 V_2$$

y, por tanto:

$$A_1 v_1 = A v = A_2 v_2$$

**Cantidad de movimiento:**

La fuerza del disco sobre el fluido con el sentido de la corriente (-T) tiene que igualar a la diferencia de flujos de cantidad de movimiento entre la salida y la entrada del tubo de corriente, secciones 2 y 1:

$$T = -\dot{m}(v_2 - v_1) = \rho Av(v_1 - v_2) \quad [1]$$

### **Energía :**

Corresponde a la aplicación de Bernoulli entre A1 y A, y entre A y A2. El principio de Bernoulli es una sencilla relación matemática que relaciona los cambios en la energía cinética, la energía potencial y la presión en un fluido en el que no hay disipación. El principio de Bernoulli para un fluido incompresible (el agua e incluso el aire a baja velocidad se asemejan mucho al modelo de fluido incompresible) y en ausencia de campos de fuerzas (sin gravedad) y en condiciones estacionarias (la distribución de velocidades del fluido por todo el espacio no cambia con el paso del tiempo) tiene el siguiente aspecto:

$$p + \rho v^2 / 2 = \text{constante}$$

$$p^+ + \frac{1}{2} \rho v^2 = p + \frac{1}{2} \rho v_1^2 \quad [2]$$

$$p^+ + \frac{1}{2} \rho v^2 = p + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad [3]$$

- $p \equiv$  presión;
- $\rho \equiv$  densidad;
- $v \equiv$  rapidez.

### **Equilibrio del Disco**

El disco está estático, luego la suma de fuerzas sobre él ha de ser nula, entonces:

$$T = (p^+ - p^-) A \quad [4]$$

Restando miembro a miembro las ecuaciones (2) y (3) obtenemos una expresión del salto de presiones a través del disco:

$$p^+ - p^- = \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_2^2) \quad [5]$$

**Velocidad en el plano del rotor**

Según lo visto en el párrafo anterior, podemos calcular la velocidad del viento en el plano del rotor, igualando las ecuaciones (1), (4) y (5):

$$T = \rho A v (v_1 - v_2) = \frac{1}{2} \rho A (v_1^2 - v_2^2)$$

Por lo tanto:

$$v = \frac{1}{2} (v_1 + v_2)$$

**Potencia aerodinámica extraída por el rotor del viento.**

El cálculo de esta potencia se extrae del producto de la fuerza de tracción y la velocidad media en el plano del rotor, lo que nos lleva a obtener la siguiente expresión:

$$W_R = T \cdot V = \rho A \left( \frac{v_1^2}{2} + \frac{v_2^2}{2} \right) \frac{v_1 + v_2}{2}$$

En la medida en que la velocidad aguas abajo  $V_2$  no es una característica libre en sí misma sino que depende de las variables de entrada, podemos encontrar una situación matemática en la que pueda aparecer un máximo de energía, es decir, es posible para unos valores fijados de  $\rho$ ,  $A$  y  $V_1$  localizar un valor de  $V_2$  que haga máxima la expresión de la potencia. Cuando se resuelve este problema elemental de máximos, se llega a que la máxima potencia que se puede obtener de una aeroturbina viene dada por la siguiente expresión:

$$W_R = \frac{8}{27} \rho A v_1^3$$

**Límite de Betz**

Se define como coeficiente de potencia de una aeroturbina, al rendimiento aerodinámico con el cual funciona el rotor de la misma, y viene a expresar la cantidad total de potencia que realmente es capturada por el rotor de la potencia total que posee el viento incidente sin perturbar. En definitiva, se define el coeficiente  $CP$  vale:

$$C_p = \frac{W_a}{\frac{1}{2} \rho A v_1^3}$$

si en esta expresión introducimos en el numerador la potencia máxima que se puede conseguir con un aerogenerador para la velocidad de viento incidente  $V_1$  queda:

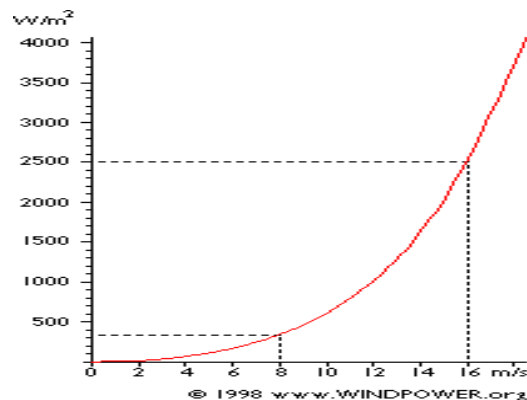
$$C_p = \frac{W_R^{\max}}{\frac{1}{2} \rho A v_1^3} = \frac{\frac{8}{27} \rho A v_1^3}{\frac{1}{2} \rho A v_1^3} = \frac{16}{27} = 0.5925 \approx 0.6$$

este valor es conocido como el límite de Betz.

### **La potencia del viento: cubo de la velocidad del viento**

La velocidad del viento es muy importante para la cantidad de energía que un aerogenerador puede transformar en electricidad: la cantidad de energía que posee el viento varía con el cubo (la tercera potencia) de la velocidad media del viento; p.ej., si la velocidad del viento se duplica la cantidad de energía que contenga será  $2^3 = 2 \times 2 \times 2 =$  ocho veces mayor.

Ahora bien, ¿por qué la energía que contiene el viento varía con la tercera potencia de su velocidad? Como ejemplo podemos mencionar la energía de un auto, al doblar la velocidad de un coche la energía de frenado para pararlo completamente será cuatro veces mayor (se trata básicamente de la segunda ley de Newton de la cinemática).



**Ilustración 26. Velocidad del viento contra potencia generada por metro cuadrado expuesto al viento**

En el caso de turbinas eólicas usamos la energía de frenado del viento, por lo que si doblamos la velocidad del viento tendremos dos veces más porciones cilíndricas de viento moviéndose a través del rotor cada segundo, y cada una de esas porciones contiene cuatro veces más energía, como se ha visto en el ejemplo del frenado de un coche.

La tabla 10 muestra que con una velocidad del viento de 8 metros por segundo obtenemos una potencia (cantidad de energía por segundo) de 314 W por cada metro cuadrado expuesto al viento (viento incidiendo perpendicularmente al área barrida por el rotor). A 16 m/s obtendremos una potencia ocho veces mayor, esto es,  $2.509 \text{ W / m}^2$ . La siguiente tabla proporciona la potencia por metro cuadrado de superficie expuesta al viento para diferentes velocidades del viento.

**Potencia del viento \*\*)**

m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>
0	0	8	313,6	16	2508,8
1	0,6	9	446,5	17	3009,2
2	4,9	10	612,5	18	3572,1
3	16,5	11	815,2	19	4201,1
4	39,2	12	1058,4	20	4900,0
5	76,5	13	1345,7	21	5672,4
6	132,3	14	1680,7	22	6521,9
7	210,1	15	2067,2	23	7452,3

\*\*\*) Para una densidad del aire de  $1,225 \text{ kg/m}^3$ , correspondiente al aire seco a la presión atmosférica estándar al nivel del mar y a  $15^\circ \text{ C}$ .

**Tabla 10. . Potencia por metro cuadrado de superficie expuesta al viento para diferentes velocidades del viento**

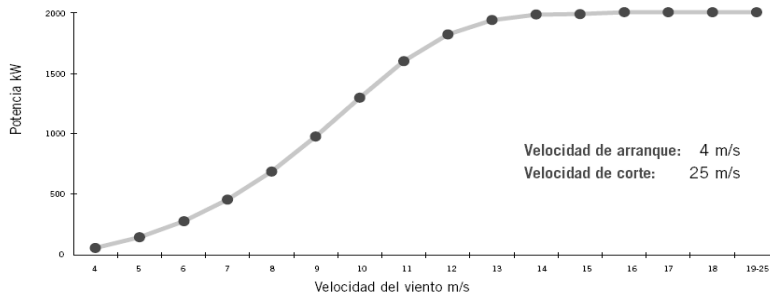
### Curva de potencia de un aerogenerador

La potencia mecánica disponible en el eje de una aeroturbina puede ser expresada en función de la velocidad del viento  $v$  y de la velocidad  $\omega$  de rotación del eje, tal que la potencia mecánica  $P(v,\omega)$  m aumentará con la velocidad de viento, para una velocidad de rotación  $\omega$  determinada, hasta que se alcance un máximo a partir del cuál comience a disminuir. Esta relación queda definida en la curva de potencia propia del aerogenerador. La mayor parte de los aerogeneradores actualmente en servicio están equipados con generadores de inducción y han sido concebidos para su funcionamiento a una velocidad de rotación  $\omega$  variable. En estos aerogeneradores la potencia mecánica es cero cuando la turbina esta frenada o cuando gira libremente sin carga, y existe un punto de operación en el cual la conversión de potencia es máxima y en torno a él suele definirse la velocidad nominal y la potencia nominal del aerogenerador.

### Curva de Potencia Gamesa G80-2.0 MW (para una densidad del aire de 1,225 kg/m<sup>3</sup>)

Curva de potencia calculada con base a datos de perfiles aerodinámicos NACA 63.XXX y FFA-W3 (perfiles de pala).

Parámetros de cálculo: 50 Hz de frecuencia de red; ángulo de calado de pala variable (control tipo pitch); intensidad de turbulencia del 10% y una velocidad variable del rotor de 9,0 - 19,0 rpm.



Velocidad (m/s)	Potencia (kW)
4	66,3
5	152,0
6	280,0
7	457,0
8	690,0
9	978,0
10	1296,0
11	1598,0
12	1818,0
13	1935,0
14	1980,0
15	1995,0
16	1995,0
17	2000,0
18	2000,0
19-25	2000,0

**Ilustración 27. Curva de potencia de un aerogenerador Gamesa G80 - 2MW**

En la práctica los aerogeneradores operan habitualmente entre un valor mínimo  $v_{min}$  y un valor máximo  $v_{max}$  de la velocidad de viento. Para  $v_{min} < v$  la energía obtenida es nula o muy pequeña y el aerogenerador permanece en reposo a fin de minimizar esfuerzos innecesarios y alargar su vida media. Para  $v_{max} > v$ , el aerogenerador también es conducido al reposo, para evitar sobreesfuerzos, así como por escasa la posibilidad de que se presenten vientos muy elevados que hace que no resulte económico construir una turbina a tal fin.

#### Incertidumbre en mediciones de curvas de potencia

En realidad, hay una nube de puntos esparcidos alrededor de la curva de la ilustración 27 y no una curva bien definida.

El motivo es que en la práctica la velocidad del viento siempre fluctúa, y no se puede medir exactamente la columna de viento que pasa a través del rotor del aerogenerador (colocar un anemómetro justo enfrente del aerogenerador no es una solución factible, ya que el aerogenerador también proyectará un "abrigo" que frenará el viento enfrente de él).

Así pues, en la práctica se debe tomar un promedio de las diferentes medidas para cada velocidad del viento, y dibujar el gráfico con esos promedios. Además, es difícil hacer medidas exactas de la propia velocidad del viento. Si se tiene un 3 por ciento de error en las mediciones de la velocidad del viento, entonces la energía del viento puede ser un 9 por ciento superior o inferior (ya que el contenido energético varía con la tercera potencia de la velocidad del viento). En consecuencia, pueden existir errores hasta de  $\pm 10\%$  incluso en curvas certificadas.

### Verificación de las curvas de potencia

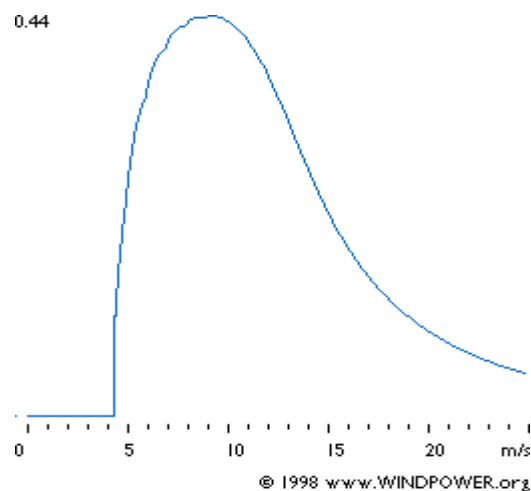
Las curvas de potencia están basadas en medidas realizadas en zonas de baja intensidad de turbulencias, y con el viento viniendo directamente hacia la parte delantera de la turbina. Las turbulencia locales y los terrenos complejos (p.ej. aerogeneradores situados en una pendiente rugosa) pueden implicar que ráfagas de viento golpeen el rotor desde diversas direcciones. Por lo tanto, puede ser difícil reproducir exactamente la curva en una localización cualquiera dada.

### Una mayor eficiencia técnica no es necesariamente el camino a seguir

No es un fin en si mismo el tener una gran eficiencia técnica en un aerogenerador. Lo que en realidad interesa es el costo de sacar los kWh del viento durante los próximos 20 años. Dado que en este caso el combustible es gratis no hay necesidad de ahorrarlo. Por tanto, la turbina óptima no tiene por qué ser necesariamente la de mayor producción anual de energía. Por otro lado, cada metro cuadrado de área de rotor cuesta dinero, por lo que, por supuesto, es necesario obtener toda la energía que se pueda (mientras puedan limitarse los costos por kWh). Volveremos sobre este tema en la página de optimización de aerogeneradores.

### **Curva del coeficiente de potencia .**

El coeficiente de potencia indica con qué eficiencia el aerogenerador convierte la energía del viento en electricidad.



*Ilustración 28. Curva del coeficiente de potencia para un aerogenerador danés típico.*

Simplemente dividiendo la potencia eléctrica disponible por la potencia eólica de entrada, para medir como de técnicamente eficiente es un aerogenerador. En otras palabras, tomamos la curva de potencia y la dividimos por el área del rotor para obtener la potencia disponible por metro cuadrado de área del rotor. Posteriormente, para cada velocidad del viento, dividimos el resultado por la cantidad de potencia en el viento por metro cuadrado.

El gráfico muestra la curva del coeficiente de potencia para un aerogenerador danés típico. Aunque la eficiencia media de estos aerogeneradores suele estar por encima del 20 por ciento, la eficiencia varía mucho con la velocidad del viento (pequeñas oscilaciones en la curva suelen ser debidas a errores de medición).

Como puede observar, la eficiencia mecánica del aerogenerador más alta (en este caso del 44%) se da a velocidades alrededor de 9 m/s. Este valor ha sido elegido deliberadamente por los ingenieros que diseñaron la turbina. A bajas velocidades del viento la eficiencia no es tan alta, ya que no hay mucha energía que recoger. A altas velocidades del viento, la turbina debe disipar cualquier exceso de energía por encima de aquella para la que ha sido diseñado el generador. Así pues, la eficiencia interesa sobretodo en la zona de velocidades de viento donde se encuentra la mayor parte de la energía.

### 2.3.3.-Funcionamiento de los aerogeneradores

- **Control de potencia.**

Los aerogeneradores están diseñados para producir energía eléctrica de la forma más barata posible. Así pues, están generalmente diseñados para rendir al máximo a velocidades alrededor de 15 m/s. Es mejor no diseñar aerogeneradores que maximicen su rendimiento a vientos más fuertes, ya que los vientos tan fuertes no son comunes.

En el caso de vientos más fuertes es necesario gastar parte del exceso de la energía del viento para evitar daños en el aerogenerador. En consecuencia, todos los aerogeneradores están diseñados con algún tipo de control de potencia. Hay dos formas de hacerlo con seguridad en los modernos aerogeneradores.

- 1) Por cambio del ángulo de paso ("pitch regulation")

Este método de control consiste en que las palas varían su ángulo de incidencia con respecto al viento. Cuando la potencia generada es excesiva, las palas comienzan a girar



sobre su eje longitudinal hasta adoptar la posición denominada de bandera. La resistencia entonces opuesta al viento es mínima, así como el par ejercido y la potencia generada.

Un sistema electrónico vigila tanto la velocidad del viento, como la potencia generada y la posición de las palas modificando de manera continua la posición de estas y adaptándola a la intensidad de los vientos reinantes en ese momento. El diseño de aerogeneradores controlados por cambio del ángulo de paso requiere una ingeniería muy desarrollada, para asegurar que las palas giren exactamente el ángulo deseado. El mecanismo de cambio del ángulo de paso suele funcionar de forma hidráulica.

Las ventajas de este sistema de control son:

- Con su implantación se logra una mayor vida del aerogenerador, al soportar este menores cargas dinámicas.
- Al mismo tiempo se consigue un aumento del rendimiento de la instalación, ya que el viento ataca a los álabes siempre con el ángulo óptimo de incidencia.
- Así mismo, es posible el aprovechamiento de regímenes de vientos bajos.



*Ilustración 29. Aerogeneradores de paso variable Qingdao Commercial Energy International Trading Co., Ltd.*

## 2) Por pérdida aerodinámica (stall regulation)

Los aerogeneradores de regulación (pasiva) por pérdidas aerodinámicas tienen las palas del rotor unidas al buje en un ángulo fijo. Sin embargo, el perfil de la pala ha sido aerodinámicamente diseñado para asegurar que, en el momento en que la velocidad del viento sea demasiado alta, se cree una cierta turbulencia en la parte de la pala que no da al viento. Esta pérdida de sustentación evita que la fuerza ascensional de la pala actúe sobre el rotor. Conforme aumenta la velocidad real del viento en la zona, el ángulo de ataque de la pala del rotor también aumentará, hasta llegar al punto de empezar a perder la sustentación.

Si se observa con atención la pala del rotor de un aerogenerador regulado por pérdida aerodinámica, llama la atención que la pala esté ligeramente curvada a lo largo

de su eje longitudinal. Esto es así en parte para asegurar que la pala pierde la sustentación de forma gradual, en lugar de hacerlo bruscamente, cuando la velocidad alcanza su valor crítico.

La principal ventaja de esta regulación es que se evitan las partes móviles del rotor y un complejo sistema de control. Por otro lado, la regulación por pérdida aerodinámica representa un problema de diseño aerodinámico muy complejo y comporta retos en el diseño de la dinámica estructural de toda la turbina, para evitar las vibraciones provocadas por la pérdida de sustentación.



*Ilustración 30. Aerogenerador de regulación (pasiva) por pérdidas aerodinámicas. ©2007.  
<http://www.hotfrog.com.au>*

#### Aerogeneradores de regulación activa por pérdida aerodinámica

Un número creciente de grandes aerogeneradores (a partir de 1 MW) están siendo desarrollados con un mecanismo de regulación activa por pérdida aerodinámica. Técnicamente, las máquinas de regulación activa por pérdida aerodinámica se parecen a las de regulación por cambio del ángulo de paso, en el sentido de que ambos tienen palas que pueden girar (a menudo sólo utilizan unos pocos pasos fijos, dependiendo de la velocidad del viento).

Sin embargo, cuando la máquina alcanza su máxima potencia nominal, este tipo de máquinas presenta una gran diferencia respecto a las máquinas reguladas por cambio de ángulo de paso: si el generador va a sobrecargarse, la máquina girará las palas en dirección contraria a la que haría una máquina de regulación por cambio de ángulo de

paso. En otras palabras, aumentará el ángulo de paso de las palas para llevarlas hasta una posición de mayor pérdida de sustentación, y poder así consumir el exceso de energía del viento.

Una de las ventajas de la regulación activa por pérdida aerodinámica es que la producción de potencia puede ser controlada de forma más exacta que con la regulación pasiva. Otra de las ventajas es que la máquina puede funcionar casi exactamente a la potencia nominal a todas las velocidades del viento. El mecanismo de cambio del ángulo de paso suele operarse mediante sistemas hidráulicos o motores eléctricos paso a paso.

- **Mecanismo de orientación**

El mecanismo de orientación de un aerogenerador es utilizado para girar el rotor de la turbina en contra del viento. Casi todos los aerogeneradores de eje horizontal emplean orientación forzada, es decir, utilizan un mecanismo que mantiene la turbina orientada en contra del viento mediante motores eléctricos y multiplicadores.

La imagen muestra el mecanismo de orientación de una máquina típica de 750 kW vista desde abajo, mirando hacia la góndola. En la parte más exterior podemos distinguir la corona de orientación, y en el interior las ruedas de los motores de orientación y los frenos del sistema de orientación. Casi todos los fabricantes de máquinas con rotor a barlovento prefieren frenar el mecanismo de orientación cuando no está siendo utilizado. El mecanismo de orientación se activa por un controlador electrónico que vigila la posición de la veleta de la turbina varias veces por segundo, cuando la turbina está girando.



© 1998 www.WINDPOWER.org

*Ilustración 31. Mecanismo de orientación de una máquina típica de 750 kW.*

© 1998 www.windpower.org

### Error de orientación

Se dice que la turbina eólica tiene un error de orientación si el rotor no está perpendicular al viento. Un error de orientación implica que una menor proporción de la energía del viento pasará a través del área del rotor. Si esto fuera lo único que ocurre, el mecanismo de orientación sería una excelente forma de controlar la potencia de entrada al rotor del aerogenerador. Sin embargo, la parte del rotor más próxima a la dirección de la fuente de viento estará sometida a un mayor esfuerzo (par flector) que el resto del rotor. De una parte, esto implica que el rotor tendrá una tendencia natural a orientarse en contra del viento, independientemente de si se trata de una turbina corriente abajo o corriente arriba. Por otro lado, esto significa que las palas serán torsionadas hacia ambos lados en la dirección de "flap" (dirección perpendicular al plano del rotor) a cada vuelta del rotor. Por tanto, las turbinas eólicas que estén funcionando con un error de orientación estarán sujetas a mayores cargas de fatiga que las orientadas en una dirección perpendicular al viento.

### Contador de la torsión de los cables

Los cables llevan la corriente desde el generador de la turbina eólica hacia abajo a lo largo de la torre. Sin embargo, los cables estarán cada vez más torsionados si la turbina, por accidente, se sigue orientando en el mismo sentido durante un largo periodo de tiempo. Así pues, los aerogeneradores están equipados con un contador de la torsión en los cables que avisará al controlador de cuando es necesario detorsionar los cables. Por tanto, es posible que alguna vez vea una turbina que parezca que haya perdido los estribos, orientándose continuamente en la misma dirección durante cinco vueltas. Como en los otros equipos de seguridad en la turbina, el sistema es redundante. En este caso, la turbina está equipada también con un interruptor de cordón que se activa cuando los cables se torsionan demasiado.



*Ilustración 32. Control de Torsión de cables*

### •Cajas multiplicadoras

¿Por qué utilizar una caja multiplicadora?

La potencia de la rotación del rotor de la turbina eólica es transferida al generador a través del tren de potencia, es decir, a través del eje principal, la caja multiplicadora y el eje de alta velocidad, como vimos en el apartado de los componentes de un aerogenerador. Pero, ¿por qué utilizar una caja multiplicadora? ¿No podríamos hacer funcionar el generador directamente con la energía del eje principal?

Si usáramos un generador ordinario, directamente conectado a una red trifásica de CA (corriente alterna) a 50 Hz, con dos, cuatro o seis polos, deberíamos tener una turbina de velocidad extremadamente alta, de entre 1000 y 3000 revoluciones por minuto (rpm.), como podemos ver en la página sobre cambio de la velocidad de giro del generador. Con un rotor de 43 metros de diámetro, esto implicaría una velocidad en el extremo del rotor de bastante más de dos veces la velocidad del sonido, así es que deberíamos abandonar esta opción.

Otra posibilidad es construir un generador de CA lento con muchos polos. Pero si quisiera conectar el generador directamente a la red, acabaría con un generador de 200 polos (es decir, 300 imanes) para conseguir una velocidad de rotación razonable de 30 rpm. Otro problema es que la masa del rotor del generador tiene que ser aproximadamente proporcional a la cantidad de par torsor (momento, o fuerza de giro) que tiene que manejar. Así que, en cualquier caso, un generador accionado directamente será muy pesado (y caro).



*Ilustración 33. Caja Multiplicadora*

### Menos par torsor, más velocidad

La solución práctica, utilizada en dirección contraria en muchas máquinas industriales, y que está relacionada con los motores de automóviles, es la de utilizar un multiplicador. Con un multiplicador hace la conversión entre la potencia de alto par torsor, que obtiene del rotor de la turbina eólica girando lentamente, y la potencia de bajo par torsor, a alta velocidad, que utiliza en el generador. La caja multiplicadora de la turbina eólica no "cambia las velocidades". Normalmente, suele tener una única relación de multiplicación entre la rotación del rotor y el generador. Para una máquina de 600 ó 750 kW, la relación de multiplicación suele ser aproximadamente de 1:50.

La fotografía de arriba muestra una caja multiplicadora para aerogenerador de 1,5 MW. Esta particular caja multiplicadora es un tanto inusual, pues tiene bridas para acoplar dos generadores en la parte de alta velocidad (en la derecha). Los accesorios naranja, que están justo debajo de los dispositivos de sujeción de los generadores (derecha), son frenos de emergencia de disco accionados hidráulicamente. El fondo puede ver la parte inferior de una góndola para una turbina de 1,5 kW.

- **El controlador electrónico de la turbina eólica**

El controlador de la turbina eólica consta de varios ordenadores que continuamente supervisan las condiciones de la turbina eólica, y recogen estadísticas de su funcionamiento. Como su propio nombre indica, el controlador también controla un gran número de interruptores, bombas hidráulicas, válvulas y motores dentro de la turbina. Cuando el tamaño de una turbina eólica crece hasta máquinas de megawatts, se hace incluso más importante que su tasa de disponibilidad sea alta, es decir, que funcionen de forma segura todo el tiempo.



### *Ilustración 34. Controlador de la turbina eólica*

#### Comunicación con el mundo exterior

El controlador se comunica con el propietario o el operador de la turbina eólica mediante un enlace de comunicación, como por ejemplo, enviando alarmas o solicitudes de servicio a través del teléfono o de un enlace radiofónico. También es posible llamar a la turbina eólica para que recoja estadísticas, y revise su estado actual.

En parques eólicos, normalmente una de las turbinas estará equipada con un PC, desde el que es posible controlar y recoger datos del resto de los aerogeneradores del parque. Este PC será llamado a través de una línea telefónica o un enlace radiofónico.

#### Comunicaciones internas

Normalmente, suele haber un controlador en la parte inferior de la torre y otro en la góndola. En los modelos recientes de aerogeneradores, la comunicación entre controladores suele hacerse utilizando fibra óptica.

En algunos modelos recientes, hay un tercer controlador situado en el buje del rotor. Esta unidad suele comunicarse con la góndola utilizando comunicaciones en serie, a través de un cable conectado con anillos rozantes y escobillas al eje principal.



*Ilustración 35. Unidad de comunicaciones de fibra óptica.*

© 1998 [www.windpower.org](http://www.windpower.org)

#### Mecanismos de autoprotección y redundancia

Los ordenadores y sensores suelen estar por duplicado (son redundantes) en todas las áreas de precisión, de seguridad o de servicio, de las máquinas grandes más nuevas. El

controlador compara continuamente las lecturas de las medidas en toda la turbina eólica, para asegurar que tanto los sensores como los propios ordenadores funcionan correctamente.

### ¿Qué está monitorizado?

Es posible monitorizar o fijar alrededor de entre 100 y 500 valores de parámetros en una turbina eólica moderna. Por ejemplo, el controlador puede contrastar la velocidad de rotación del rotor, el generador, su voltaje y corriente. Además, los rayos y su carga pueden ser registrados. También pueden realizarse medidas de la temperatura del aire exterior, la temperatura en los armarios electrónicos, la temperatura del aceite en el multiplicador, la temperatura de los devanados del generador, la temperatura de los cojinetes del multiplicador, la presión hidráulica, el ángulo de paso de cada pala del rotor (en máquinas de regulación por cambio del ángulo de paso - pitch controlled- o de regulación activa por pérdida aerodinámica -active stall controlled-), el ángulo de orientación (contando el número de dientes en la corona de orientación), el número de vueltas en los cables de alimentación, la dirección del viento, la velocidad del viento del anemómetro, el tamaño y la frecuencia de las vibraciones en la góndola y en las palas del rotor, el espesor de las zapatas del freno, si la puerta de la torre está abierta o cerrada (sistema de alarma).

#### • **Control de la calidad de potencia en aerogeneradores**

La mayoría de la gente piensa en el controlador como la unidad que hace funcionar el aerogenerador; por ejemplo, que orienta la turbina en contra del viento, que vigila que los sistemas de seguridad funcionen correctamente y que conecta la turbina. El controlador hace de hecho todas estas cosas, pero también vigila la calidad de potencia de la corriente generada por la turbina eólica.

### Conexión a la red y calidad de potencia

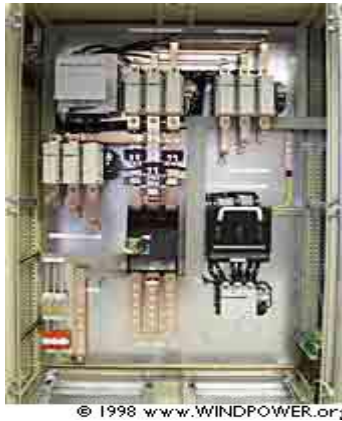
Las compañías exigen que la conexión a red de los aerogeneradores se realice "suavemente", y qué requerimientos tienen respecto a que la corriente alterna y la tensión se muevan de forma sincronizada la una respecto a la otra. Esta parte del controlador opera, por ejemplo, los tiristores, que aseguran un acoplamiento suave a la red eléctrica.

### Control de la potencia reactiva



Típicamente, la tensión y la corriente son medidas 128 veces por ciclo de corriente alterna (es decir, 50 x 128 veces por segundo o 60 x 128 veces por segundo, dependiendo de la frecuencia de la red eléctrica). Partiendo de esto, un procesador DSP calcula la estabilidad de la frecuencia de la red, así como la potencia activa y reactiva de la turbina (la componente reactiva de la potencia es básicamente una cuestión de si la tensión y la corriente están o no en fase).

Para asegurar que la calidad de potencia sea la adecuada, el controlador debe conectar y desconectar un gran número de condensadores eléctricos, que ajustarán la potencia reactiva (es decir, el ángulo de fase entre la tensión y la corriente). Como puede ver en la fotografía de abajo, un banco de condensadores conmutables es en sí mismo una unidad bastante grande en una máquina de 1 megawatt.



*Ilustración 36. Parte de alta tensión de un controlador de una máquina de 1 megawatt.*

### Compatibilidad electromagnética ("EMC")

En una turbina eólica, alrededor de los cables para transporte de energía y de los generadores, hay campos electromagnéticos muy potentes. Esto implica que la electrónica del sistema de control tiene que ser insensible a estos campos electromagnéticos. Y a la inversa, la electrónica no debería emitir radiación electromagnética que pueda inhibir el funcionamiento de otros equipos electrónicos. La imagen ... muestra una sala libre de radiación con paredes de metal en el laboratorio de uno de los mayores fabricantes de controladores de aerogeneradores. El equipo de la sala se utiliza para medir las emisiones electromagnéticas de los componentes de los controladores.



*Ilustración 37. Equipo de medición de emisiones electromagnéticas*

### •Torres de aerogeneradores

La torre del aerogenerador soporta la góndola y el rotor. En los grandes aerogeneradores las torres tubulares pueden ser de acero, de celosía o de hormigón. Las torres tubulares tensadas con vientos sólo se utilizan en aerogeneradores pequeños (cargadores de baterías, etc.).

#### Torres tubulares de acero

La mayoría de los grandes aerogeneradores se entregan con torres tubulares de acero, fabricadas en secciones de 20-30 metros con bridas en cada uno de los extremos, y son unidos con pernos "in situ". Las torres son troncocónicas, (es decir, con un diámetro creciente hacia la base), con el fin de aumentar su resistencia y al mismo tiempo ahorrar material.



*Ilustración 38. Torres de aerogeneradores, Navarra (España) Foto Soren Krohn*

© 1999 DWIA

### Torres de celosía

Las torres de celosía son fabricadas utilizando perfiles de acero soldados. La ventaja básica de las torres de celosía es su costo, puesto que una torre de celosía requiere sólo la mitad de material que una torre tubular sin sustentación adicional con la misma rigidez. La principal desventaja de este tipo de torres es su apariencia visual (aunque esa cuestión es claramente debatible). En cualquier caso, por razones estéticas, las torres de celosía han desaparecido prácticamente en los grandes aerogeneradores modernos.



*Ilustración 39. Torres de celosía © NEG-Micon A/S 1998*

### Consideraciones de costos

Generalmente, el precio de la torre de la turbina eólica supone alrededor de un 20 por ciento del costo total de la turbina. Para una torre de unos 50 metros, el costo adicional de otros 10 metros es de unos 15 000 dólares americanos. Por lo tanto, es bastante importante para el costo final de la energía construir las torres de la forma más óptima posible.

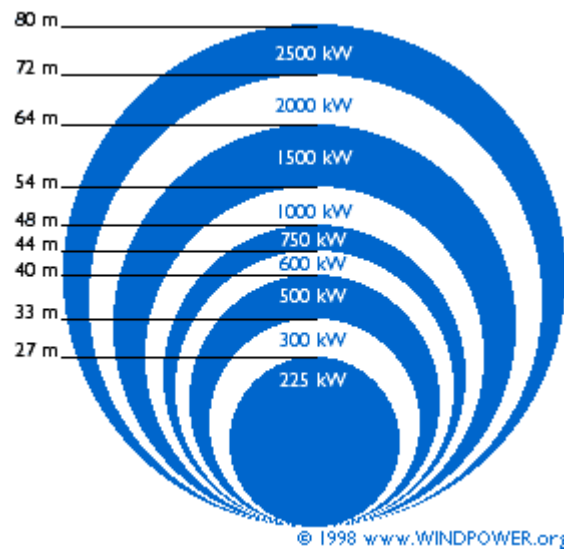
#### • **Tamaño de turbinas**

### La potencia producida aumenta con el área de barrido del rotor

Cuando un agricultor habla de la extensión de tierra que está cultivando normalmente lo hará en términos de hectáreas o de acres. Lo mismo ocurre con los aerogeneradores, aunque en el caso del cultivo eólico se cultiva un área vertical en lugar de una horizontal. El área del disco cubierto por el rotor (y, por supuesto, las velocidades del viento) determina cuanta energía podemos coleccionar en un año.

La ilustración 40 da una idea de los tamaños de rotor normales en aerogeneradores: una típica turbina con un generador eléctrico de 600 kW suele tener un

rotor de unos 44 metros. Si dobla el diámetro del rotor, obtendrá un área cuatro veces mayor (dos al cuadrado). Esto significa que también obtendrá del rotor una potencia disponible cuatro veces mayor.



*Ilustración 40. Tamaños de rotor normales en aerogeneradores*

Los diámetros de rotor pueden variar algo respecto a las cifras dadas arriba, ya que muchos de los fabricantes optimizan sus máquinas ajustándolas a las condiciones de viento locales: por supuesto, un gran generador requiere más potencia (es decir, vientos fuertes) sólo para poder girar. Por lo tanto, si instala un aerogenerador en un área de vientos suaves realmente maximizará la producción anual utilizando un generador bastante pequeño para un tamaño de rotor determinado (o un tamaño de rotor más grande para un generador dado). Para una máquina de 600 kW, los tamaños de rotor pueden variar entre 39 a 48 m. La razón por la que, en zonas de vientos suaves, se puede obtener una mayor producción de un generador relativamente más pequeño es que la turbina estará funcionando durante más horas a lo largo del año.

### Razones para elegir grandes turbinas

1. Existen economías de escala en las turbinas eólicas, es decir, las máquinas más grandes son capaces de suministrar electricidad a un costo más bajo que las máquinas más pequeñas. La razón es que los costos de las cimentaciones, la construcción de carreteras, la conexión a la red eléctrica, además de otros componentes en la turbina (el sistema de control electrónico, etc.), son más o menos independientes del tamaño de la máquina.
2. Las máquinas más grandes están particularmente bien adaptadas para la energía eólica en el mar. Los costos de las cimentaciones no crecen en proporción con el

tamaño de la máquina, y los costos de mantenimiento son ampliamente independientes del tamaño de la máquina.

3. En áreas en las que resulta difícil encontrar emplazamientos para más de una única turbina, una gran turbina con una torre alta utiliza los recursos eólicos existentes de manera más eficiente.



*Ilustración 41. Personal de mantenimiento trabajando en una pala de 32 m de un aerogenerador de 1,5 MW Fotografía Christian Kjae© 2000 DWIA*

#### Razones para elegir turbinas más pequeñas

1. La red eléctrica local puede ser demasiado débil para manipular la producción de energía de una gran máquina. Este puede ser el caso de las partes remotas de la red eléctrica, con una baja densidad de población y poco consumo de electricidad en el área.
2. Hay menos fluctuación en la electricidad de salida de un parque eólico compuesto de varias máquinas pequeñas, pues las fluctuaciones de viento raras veces ocurren y , por lo tanto, tienden a cancelarse. Una vez más, las máquinas más pequeñas pueden ser una ventaja en una red eléctrica débil.
3. El costo de usar grandes grúas, y de construir carreteras lo suficientemente fuertes para transportar los componentes de la turbina, puede hacer que en algunas áreas las máquinas más pequeñas resulten más económicas.
4. Con varias máquinas más pequeñas el riesgo se reparte, en caso de fallo temporal de la máquina (p.ej. si cae un rayo).
5. Consideraciones estéticas en relación al paisaje pueden a veces imponer el uso de máquinas más pequeñas. Sin embargo, las máquinas más grandes suelen tener una velocidad de rotación más pequeña, lo que significa que realmente una máquina grande no llama tanto la atención como muchos rotores pequeños moviéndose rápidamente (ver la sección sobre aerogeneradores en el paisaje ).

## 2.4.- El generador de inducción doble alimentado

En los inicios de la energía eólica, la mayor parte de las turbinas eólicas estaban equipadas con generadores asíncronos de jaula de ardilla. Estas turbinas funcionaban a velocidad de giro prácticamente constante, lo que implicaba menor eficiencia en la conversión de la energía al viento y mayores esfuerzos mecánicos en el aerogenerador. En la década de los 90 aparecieron las turbinas eólicas de velocidad variable que están equipadas con generadores asíncronos de rotor bobinado cuyo rotor está alimentado a través de un convertidor de potencia, a este tipo de generador se le conoce como del tipo doblemente alimentado (DFIG), ya que precisan de un convertidor de potencia encargado de inyectar a los devanados rotóricos corrientes con la frecuencia, amplitud y fase apropiadas. Esta topología presenta la ventaja de mayor eficiencia energética y menores esfuerzos mecánicos por lo que se ha convertido en una de las topologías dominantes.

Los generadores de inducción doblemente alimentados (DFIG) utilizados en turbinas eólicas están siendo utilizados a una tasa cada vez mayor en granjas eólicas. La principal razón de la popularidad de los DFIGs eólicos conectados al sistema interconectado nacional es su capacidad de suministrar potencia a tensión y frecuencia constante a medida que la velocidad del rotor varía. La configuración del DFIG también provee la posibilidad de controlar el factor de potencia del sistema como un todo.

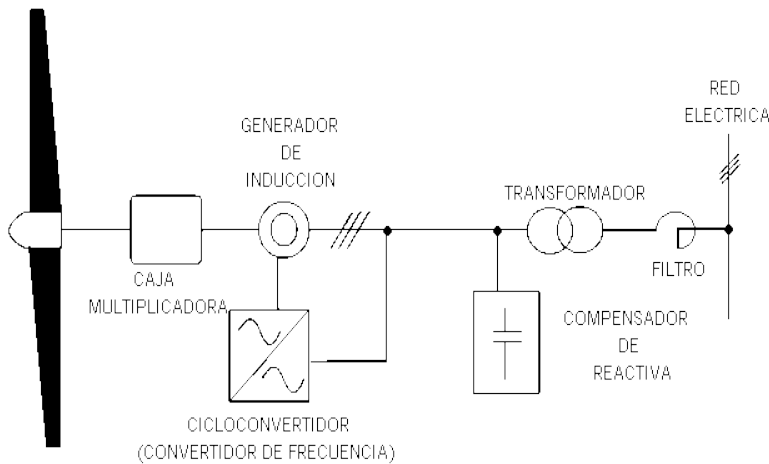
### 2.4.1.- Funcionamiento del generador doble alimentado

El funcionamiento del DFIG se basa en el generador de inducción trifásico con rotor devanado en el cual el rotor es alimentado mediante algún convertidor de frecuencia (AC/DC/AC convierte) para proveer operación estable nominal aún a velocidad variable.

Un sistema DFIG típico se muestra en la ilustración 42. El conversor AC/DC/AC consiste en dos componentes: un conversor de lado rotor ( $C_r$ ) y un conversor de lado de la red ( $C_g$ ). Ambos son convertidores alimentados con tensión directa que utilizan dispositivos de electrónica de potencia para sintetizar (cambiar la frecuencia) una tensión alterna a partir de una fuente de tensión continua. Los anillos rozantes del rotor se conectan al conversor de lado correspondiente, el cual está acoplado al otro convertidor mediante un vínculo de CC. El conversor del lado red se conecta a la misma mediante un sistema de inductancias trifásicas en serie, mientras que el devanado del estator se conecta en forma directa a la red.

Con esta configuración, la potencia capturada por la turbina de viento es transformada en energía eléctrica por el generador de inducción y es transmitida a la red por los devanados del estator y el rotor. El sistema de control genera las señales que comandan el ángulo de inclinación del rotor y las tensiones de  $R_{con}$  y  $G_{con}$  para controlar

la potencia de la turbina eólica, el voltaje en directa y la potencia reactiva o tensiones de las terminales que van a la red.



**Ilustración 42. Esquema de generador de velocidad variable mediante máquina asíncrona y convertidor**

El principio de operación es como muestra la ilustración: la salida del generador se conecta directamente a la red eléctrica, y a su vez se establece un lazo de realimentación por medio de algún conversor de frecuencia con el objeto de controlar el sistema de excitación del rotor. Este lazo de realimentación presenta dos ventajas muy importantes:

1. Como el voltaje del rotor es controlado por un conversor electrónico de potencia, el generador de inducción es capaz de importar y exportar a su vez potencia reactiva. Esto tiene importantes consecuencias para la estabilidad del sistema eléctrico y le permite, por lo tanto a la máquina permanecer conectada al sistema aún en presencia de perturbaciones severas.
2. Además, como la frecuencia del rotor es controlado, esto habilita a la máquina de inducción a mantenerse sincronizada con la red eléctrica aún cuando la turbina de viento varíe su velocidad.

De esta manera se logra desacoplar las frecuencias mecánica y eléctrica, y resulta posible mantener la frecuencia de salida en un nivel estable independientemente de la velocidad de rotación del generador.

El ángulo de ataque del rotor se controla para limitar la potencia de salida del generador a su valor nominal en presencia de fuertes vientos. Un generador eólico con control de dirección puede siempre aprovechar de la manera más eficiente la dirección de los vientos.

### Flujo de potencia en el generador.

La máquina de doble alimentación es un generador de inducción con rotor bobinado. La velocidad del generador puede ser mayor o menor a la velocidad sincrónica. Puede obtenerse una variación de +30% de la velocidad sincrónica por el uso de un convertidor de potencia de 30% de la potencia nominal.

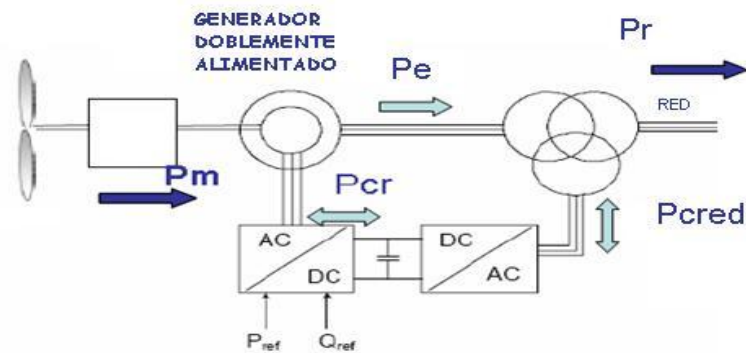


Ilustración 43. Sentido del flujo de la potencia activa (Ahmed G. AboKhalil, and Dong Choon Lee)

### Relaciones electromecánicas

Normalmente se conecta un condensador entre los terminales DC del convertidor bidireccional, el cual actúa como fuente de tensión en continua. Otra función es la de convertir la corriente alterna que proviene de la red (o del rotor) a continua, donde será almacenada por el condensador durante un periodo determinado, posteriormente ésta se convierte en alterna para ser inyectada al rotor o a la red.

Los convertidores son necesarios para que la energía fluya en ambas direcciones ya que estos generadores necesitan tanto de potencia reactiva como potencia activa para funcionar. Ya que el rotor puede recibir o entregar potencia a la red, además la potencia reactiva,  $Q$  es necesaria para crear su campo magnético. El convertidor conectado al rotor debe operar en ambos sentidos, justificación por la que se deben emplear convertidores bidireccionales (back-to-back).

El inductor de carga acoplado,  $R_L$ , se usa para conectar el convertidor,  $C_{red}$ , a la red. Las tres fases de los devanados del rotor se conectan a la red mediante conexiones slip ring, (anillos de deslizamiento empleados para la conexión de devanados en sistemas eléctricos).



Según el tipo de convertidor empleado, las variaciones de la velocidad de la turbina son de  $\% 10 \pm$  a  $\% 30 \pm$  con respecto a la velocidad sincrónica. La velocidad sincrónica es la velocidad del flujo magnético que se produce en el entrehierro del generador, entre el rotor y el estator. Esta velocidad es proporcional a la frecuencia de la red y al número de polos de la máquina asíncrona. Siendo su expresión:

$$n_s = 120f \rightarrow n_s 2\pi = \omega_s$$

Un concepto importante para comprender el funcionamiento del generador de inducción es la velocidad angular de deslizamiento,  $\omega_d$ . Esta velocidad es la relación entre la velocidad angular sincrónica,  $\omega_s$  y la velocidad angular del rotor,  $\omega_r$ . Siendo su expresión:

$$\omega_d = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$$

Cuando la velocidad angular del rotor es mayor que la velocidad sincrónica, el deslizamiento es negativo. En este caso el rotor entrega energía eléctrica, es lo que se conoce como modo de generación supersíncrono. En el caso contrario, cuando la velocidad del rotor es menor que la velocidad de sincrónica, la velocidad angular del deslizamiento es positiva por lo que el rotor recibe energía eléctrica de la red. Este hecho es conocido como modo de generación subsíncrono.

Cuando el rotor gira a la misma velocidad que la velocidad sincrónica se dice que está girando de forma sincrónica, esta es la razón por lo que los modos de generación explicados en el párrafo anterior reciben ese nombre. En operación normal el estator y el rotor giran a la velocidad sincrónica con respecto al estator.

Cuando las aplicaciones son limitadas por las fluctuaciones del viento, normalmente es suficiente considerar un eje de masa simple, ya que las oscilaciones de la velocidad variable no son reflejadas en la red eléctrica al entregar potencia activa.

En el análisis de estabilidad, cuando el sistema responde a fuertes perturbaciones, el eje es aproximado por dos modelos de masas. Una masa representa la inercia de la turbina, la otra masa es la equivalente a la inercia del generador.

La ilustración 43 muestra el sentido de flujo de la potencia del sistema. Las ecuaciones que describen el modelo se presentan a continuación. La potencia activa mecánica de la turbina,  $P_m$ , es proporcional al par mecánico,  $T_m$ , y a la velocidad del rotor,  $\omega_r$ :

$$P_m = T_m * \omega_r$$

La potencia activa proveniente del estator es proporcional al par electromagnético,  $T_e$ , y a la velocidad de sincronismo,  $\omega_s$ .

$$P_s = T_e * \omega_s$$

La ecuación (1.9) relaciona la velocidad angular del rotor cuando se desprecian las pérdidas mecánicas, siendo  $J$ , el momento de inercia:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e$$

En estado estacionario, cuando  $\frac{d\omega_r}{dt}$  es igual a cero, y despreciando las pérdidas del generador se obtiene:

$$T_m = T_e$$

$$P_m = P_s + P_r$$

El par mecánico es igual al par electromagnético. La potencia activa mecánica es la suma de la potencia activa del estator y la potencia activa del rotor. Al despejar la potencia del rotor de (1.10) se deduce que la diferencia entre la potencia mecánica total y la potencia del estator dan lugar a la potencia del rotor. Al sustituir las potencias por sus ecuaciones, la potencia del rotor resulta:

$$P_r = T_m * \omega_r - T_e * \omega_s$$

Finalmente se concluye que la potencia del rotor es proporcional a la velocidad de deslizamiento y a la potencia del estator. La ecuación anterior se reescribe como:

$$P_r = -s * P_s$$

Normalmente el módulo del deslizamiento suele ser menor que uno por lo que la potencia del rotor,  $P_r$  es una fracción de la potencia del estator,  $P_s$ . El par mecánico es positivo cuando se genera potencia, cuando la frecuencia de la red es constante la velocidad de sincronismo es constantes y positiva. Por este motivo el signo de la potencia del rotor depende totalmente del deslizamiento.

Cuando el deslizamiento es negativo y la velocidad del rotor mayor que sincrónica, en este caso la potencia del rotor es positiva.

En el caso contrario, cuando el deslizamiento es positivo, debido a que la velocidad de sincrónica es mayor que la del rotor, la potencia del rotor es negativa. Cuando se trabaja en velocidad supersíncrona la potencia activa que se obtiene del rotor,  $P_r$ , es transmitida al terminal DC del convertidor, hacia el condensador DC. La tensión en continua se eleva.

Cuando se trabaja en velocidad subsíncrona la potencia activa,  $P_r$ , es extraída del terminal de continua, DC, del convertidor. Como consecuencia la tensión DC del

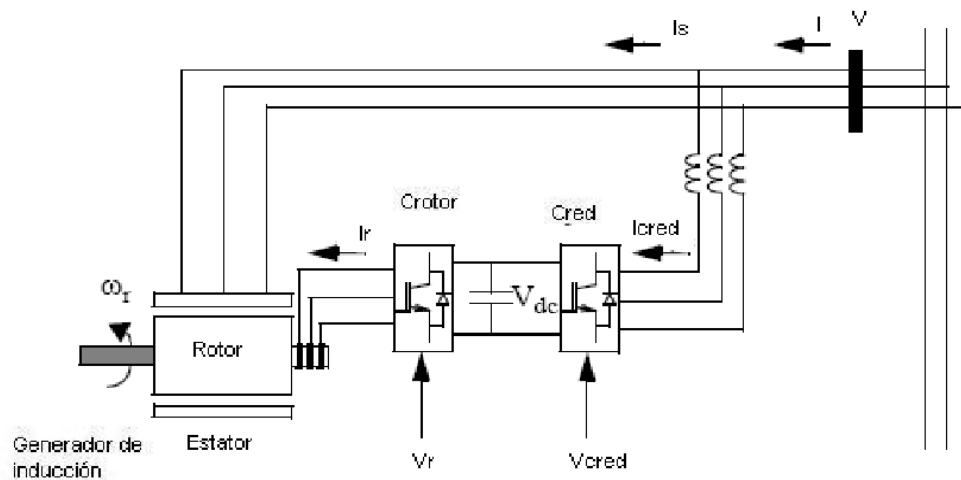
condensador disminuye. El convertidor conectado a la red,  $C_{red}$ , se encarga de absorber o generar potencia de la red,  $P_{Cred}$ , con el fin de mantener constante la tensión del condensador.

En estado estacionario y despreciando las pérdidas del generador la potencia entre el convertidor y la red,  $P_{Cred}$ , es igual a la potencia del rotor  $P_r$ . La velocidad de la turbina es determinada por la potencia del rotor absorbida o generada por el convertidor conectado al rotor,  $C_{rotor}$ .

La secuencia de fase de la tensión AC (alterna) generada por el convertidor conectado al rotor es positiva a velocidad subsíncrona y negativa a velocidad supersíncrona. La frecuencia de esta tensión es igual al producto de la frecuencia de la red y el valor absoluto del deslizamiento.

Tanto el convertidor conectado al rotor,  $C_{rotor}$ , como el convertidor conectado a la red,  $C_{red}$ , tienen la capacidad para generar o absorber potencia reactiva,  $Q$ . Pueden ser usados para controlar la potencia reactiva o la tensión en los terminales de la red. Los controles que se aplican a los convertidores permiten regular las tensiones en los terminales de ambos convertidores para evitar altas tensiones y que se dañe la máquina.

La ilustración 44 muestra el sentido de las corrientes en el sistema. La corriente que circula hacia el estator,  $I_s$ , viene definida por la red. La corriente total,  $i$ , es la suma de la corriente del estator y la corriente del convertidor conectado a la red.  $I_r$  es la corriente del rotor, en este caso la corriente no depende de la red.

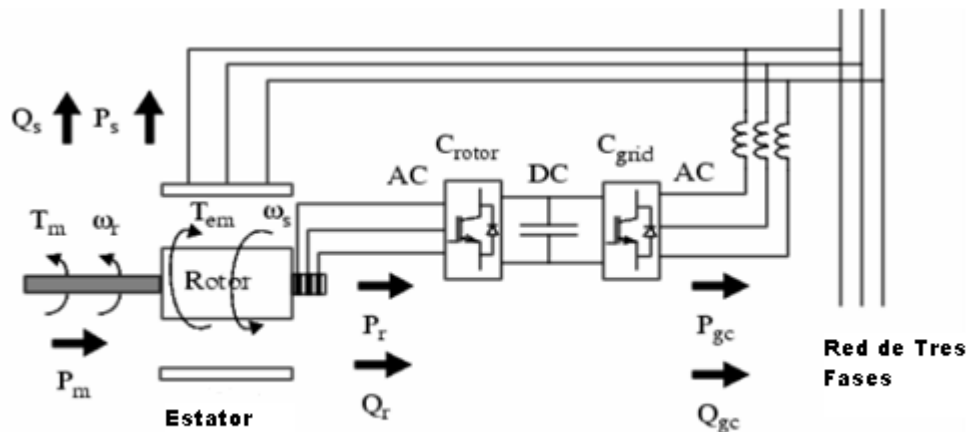


*Ilustración 44. Sentido de corrientes del Sistema*

Como se puede ver para velocidades  $\omega_r$  superiores a la síncrona  $P_r$  fluye hacia el convertidor almacenándose la energía en el condensador de acople entre ambos

convertidores (aumentando la tensión VDC), y para velocidades  $w_r$  inferiores a  $w_s$ ,  $P_r$  será extraída del condensador disminuyéndose la tensión VDC. El convertidor lado-red se usará para generar o absorber la potencia  $P_{gc}$  de manera de mantener constante la tensión en el condensador VDC. En régimen (despreciando las pérdidas en los convertidores),  $P_{gc} = P_r$  y la velocidad de la turbina es determinada por la potencia absorbida o consumida por el convertidor lado-rotor.

Los convertidores lado rotor y lado máquina tienen la capacidad de generar o absorber potencia reactiva y deben ser usados para el control de la potencia reactiva y la tensión en terminales de la red. El convertidor lado-rotor es usado para controlar la potencia de salida de la turbina de viento y la tensión medida en terminales de la red (o potencia reactiva) El convertidor lado-red es usado para controlar la tensión VDC del capacitor de enlace entre ambos convertidores. Además, es posible usar este convertidor para generar o absorber potencia reactiva.



*Ilustración 45. Conexión de el generador doble alimentado a la línea trifásica (Ahmed G. AboKhalil, and Dong Choon Lee)*

### Cálculo de la potencia máxima entregada por la turbina.

La potencia mecánica desarrollada por la turbina depende del radio de las palas, el coeficiente de potencia, y de la velocidad del viento de acuerdo con la siguiente expresión:

$$P_m = \frac{\pi}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho r^2 v^3, \text{ siendo } \lambda = \frac{w_r r}{v}$$

Donde

$r$  = radio de la pala

$C_p$  = coeficiente de performance

$v$  = velocidad del viento

$\omega r$  = velocidad de giro del eje del rotor

$\lambda$  = relación de velocidad en el extremo de la pala

$\beta$  = ángulo de paso de la pala

$\rho$  = densidad del aire

Para una velocidad del viento dada, existe una velocidad de rotación  $\omega r$ , la cual genera máxima potencia  $P_m = P_{max}$ .

Es importante considerar que ante cambios en la velocidad del viento, la velocidad de rotación variará consecuentemente. Debido a que no se puede obtener una medida confiable en la variación del viento, la ecuación para obtener la potencia máxima ( $P_{max}$ ) conviene expresarla eliminando la dependencia con el viento, obteniéndose la ecuación:

$$P_m = \left( \frac{\pi}{2} C_{popt} \rho r^2 \left( \frac{r}{\lambda_{opt}} \right)^3 \right) \omega r^3$$

De esta manera se puede observar que la potencia generada es una función de la velocidad del rotor:

$$P_m = k \cdot \omega r^3$$

Debido a las restricciones mecánicas y eléctricas de los componentes de la turbina, la potencia máxima estará limitada por la potencia nominal de la máquina eléctrica ( $P_{nom}$ ), por encima de la cual se activará el control del ángulo de paso disminuyendo el valor de la potencia hasta la nominal de la máquina:  $P_{max} \leq P_{nom}$ . En la ilustración 46 se muestra la curva para un generador de 600kW.

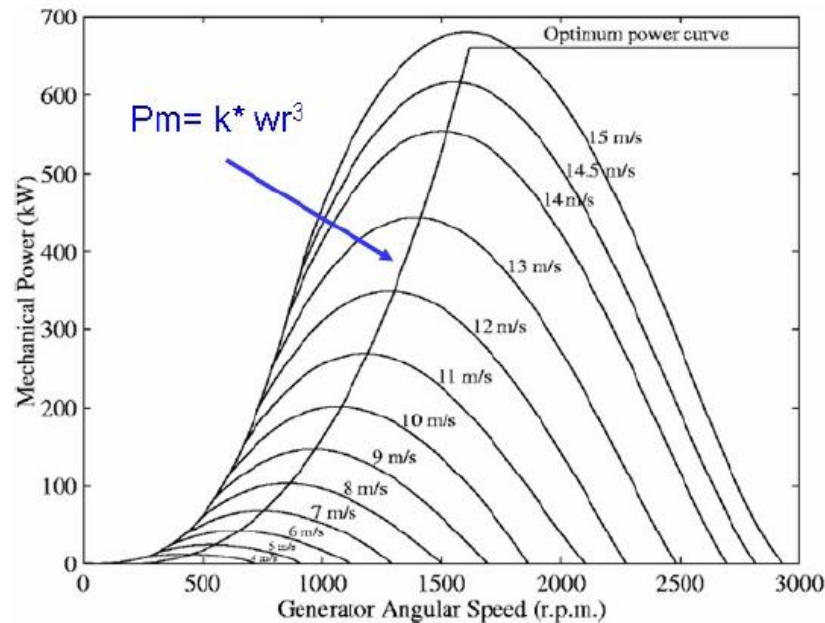


Ilustración 46. Curva de potencia para un generador de 600 kw. (Ahmed G. AboKhalil, and Dong Choon Lee)

### Sistema de control

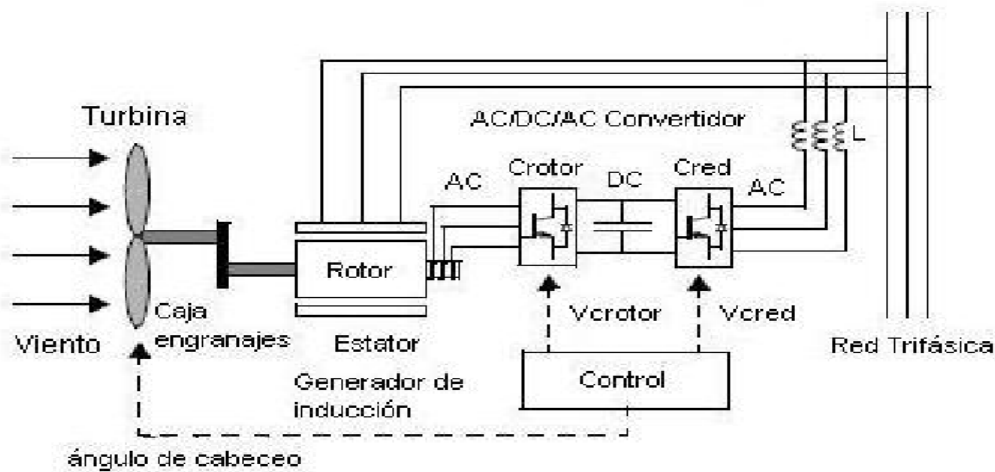
Normalmente los sistemas de conversión formados por turbinas de velocidad variable y generadores de inducción doblemente alimentados son regulados por tres sistemas de control independientes:

- Control del ángulo de cabeceo.
- Control aplicado al convertidor conectado a la red.
- Control aplicado al convertidor conector al rotor.

La combinación de los tres controles hace posible un correcto funcionamiento del sistema. La finalidad principal de los mismos es:

- Regular la potencia que la turbina extrae del viento.
- Regular la tensión DC, tensión en los terminales del condensador.
- Regular la tensión de los terminales del convertidor Crotor y Cred.

En la ilustración 47 se observan los controladores de los convertidores lado-rotor y lado-red.



*Ilustración 47. Control Aplicado al Sistema*

En esta ilustración se describe también la aplicación genérica del control al sistema de conexión entre la turbina y el generador de inducción doblemente alimentado.  $V_{cred}$  es la tensión de salida del control aplicado al convertidor conectado a la red.  $V_{crotor}$  es la tensión de salida del control aplicado al convertidor conectado al rotor. La capacidad de absorber o generar potencia por parte de los convertidores posibilita el uso de ellos para controlar la potencia activa y reactiva o la tensión en los terminales de la red. El convertidor conectado a la red se encarga de regular la tensión en los terminales DC que unen los convertidores o en su defecto la tensión del condensador. El convertidor conectado al rotor se usa para controlar la potencia de salida de la turbina y la tensión de los terminales de la red.

