

Aspectos Aerodinámicos de Turbinas de Viento: Parte I

| | |
|--|--|
| <i>Programa</i> | Fuentes Alternas de Energía y Generación Distribuida |
| <i>Acrónimo del proyecto</i> | FAEyGD |
| <i>Tipo (nivel de distribución)</i> | Público con reservas |
| <i>Fecha de Entrega</i> | 2009 |
| <i>Reporte Numero</i> | Eolo2-1 |
| <i>Estatus y Versión</i> | Definitiva, 1.00 |
| <i>Número de Páginas</i> | 15 |
| <i>Supervisor</i> | Francisco M. González-Longatt |
| <i>Autor</i> | Alejandro J. Carantoña O. |

Tabla de Contenido

| | Pág. |
|---|------|
| Contenido | |
| Tabla de Contenido | 2 |
| Índice de Figuras | 3 |
| Introducción | 4 |
| Generalidades del Recurso Eólico | 5 |
| Procedencia de la Energía Eólica | 5 |
| Las Diferencias de Temperatura Conllevan la Circulación de Aire | 5 |
| La Energía en el Viento | 5 |
| Densidad del Aire | 5 |
| Desviación del Viento por las Palas del Aerogenerador | 5 |
| El Tubo de Corriente | 6 |
| Efectos Corriente Abajo del Aerogenerador | 6 |
| Suposición de un tubo de Corriente Cilíndrico | 6 |
| La Potencia del Viento | 7 |
| Ecuación para la Potencia del viento | 7 |
| Fundamentos Aerodinámicos en Aerogeneradores | 8 |
| Sustentación y Arrastre | 8 |
| Pérdida de sustentación | 9 |
| Fuerzas Sobre un Perfil | 10 |
| Efectos en el Número Reynolds | 12 |
| Fuerzas de Arrastre y Ascensionales en Perfiles Fijos | 12 |
| Comportamiento de perfiles de álabe para turbinas eólicas | 13 |
| Conclusiones | 14 |
| Referencias Documentales | 15 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Desviación del viento en un aerogenerador..... | 6 |
| Figura 2. Suposición de un tubo de Corriente Cilíndrico..... | 7 |
| Figura 3. Sustentación en el perfil del ala de un avión. | 9 |
| Figura 4. Pérdida de sustentación, por aumento del Angulo de ataque. | 9 |
| Figura 5. Perfil usado en el seno de una corriente Fluida | 11 |
| Figura 6. Incidencia del Viento Según el Angulo de Inclinación α | 11 |
| Figura 7. Perfil placa plana con dos tipos de inclinación..... | 11 |
| Figura 8. Coeficiente de Arrastre y Ascensionales | 13 |

www.fglongatt.org.ve

Prohibido la copia total o parcial de este documento o sus imágenes o su redistribución por cualquier medio sin autorización del autor. Solo para ser utilizado con fines académicos y/o de investigación. Derechos de autor reservados.
Copyright © 2009. <http://www.fglongatt.org.ve>

Introducción

El uso de la energía eólica es uno de los métodos de aprovechamiento de energía renovables más antiguos que existen y en su empleo industrial se pueden citar como ejemplos los molinos utilizados para el bombeo de agua o el molino de grano. En la actualidad, se está en la era de su aprovechamiento comercial como productor de energía eléctrica.

En la primera parte de este reporte, se hace una introducción a los aspectos aerodinámicos de las turbinas de viento, donde primeramente se presentan las generalidades del recurso eólico, como su procedencia, la energía y densidad del viento. Además de los efectos y la forma como se representa el pasar del viento a través de las palas, y más importante aun la potencia que se puede obtener del mismo

Seguidamente se describe brevemente los fundamentos aerodinámicos que caracterizan a las turbinas eólicas y las fuerzas que aparecen en un perfil aerodinámico, indicando como a partir de las mismas se pueden explicar el principio de funcionamiento del aerogenerador.

www.fglongatt.org.ve

Generalidades del Recurso Eólico

Procedencia de la Energía Eólica

Todas las fuentes de energía renovables (excepto la maremotriz y la geotérmica), e incluso la energía de los combustibles fósiles, provienen, en último término, del sol. El sol irradia 174.423.000.000.000 kWh de energía por hora hacia la Tierra. En otras palabras, la Tierra recibe $1,74 \times 10^{17}$ W de potencia [1].

Alrededor de un 1 a un 2 por ciento de la energía proveniente del sol es convertida en energía eólica. Esto supone una energía alrededor de 50 a 100 veces superior a la convertida en biomasa por todas las plantas de la tierra.

La energía eólica está asociada a la energía cinética del viento. La circulación del viento se debe a la diferencia de temperaturas de las zonas que se encuentran en el ecuador a 0° de latitud con las zonas ubicadas más alejadas de éste. El aire caliente es más ligero que el frío, por lo que subirá hasta alcanzar una altura aproximada de 10 Km. y se extenderá hacia el norte y sur [1].

Alrededor de los 30° de latitud se encuentra una zona de altas presiones por lo que el aire empezará a descender y por lo tanto es atraído por la zona de baja presión que se encuentra ubicada en el ecuador. En general, el viento sopla de las zonas de alta presión a las de baja presión, modificando su dirección en función de la rotación del planeta (hacia la derecha en el hemisferio Norte y hacia la izquierda en el Sur) [1].

Las Diferencias de Temperatura Conllevan la Circulación de Aire

El aire caliente es más ligero que el aire frío, por lo que subirá hasta alcanzar una altura aproximada de 10 km y se extenderá hacia el norte y hacia el sur. Si el globo no rotase, el aire simplemente llegaría al Polo Norte y al Polo Sur, para posteriormente descender y volver al ecuador [1].

La Energía en el Viento

Un aerogenerador obtiene su potencia de entrada convirtiendo la fuerza del viento en un par (fuerza de giro) actuando sobre las palas del rotor. La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, del área de barrido del rotor y de la velocidad del viento [1].

Densidad del Aire

La energía cinética de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa (o peso). Así, la energía cinética del viento depende de la densidad del aire, es decir, de su masa por unidad de volumen. En otras palabras, cuanto "más pesado" sea el aire más energía recibirá la turbina. A presión atmosférica normal y a 15° C el aire pesa unos 1.225 kilogramos por metro cúbico, aunque la densidad disminuye ligeramente con el aumento de la humedad [1].

Además, el aire es más denso cuando hace frío que cuando hace calor. A grandes altitudes (en las montañas) la presión del aire es más baja y el aire es menos denso.

Desviación del Viento por la Pala del Aerogenerador

En la realidad, un aerogenerador desviará el viento antes incluso de que el viento llegue al plano del rotor. Esto significa que nunca se podrá capturar toda la energía que hay en el viento utilizando un aerogenerador.

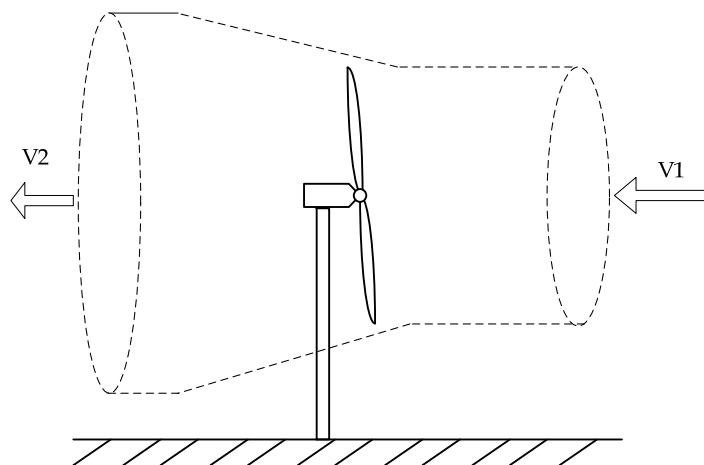


Figura 1. Desviación del viento en un aerogenerador.

En la Figura 1 se tiene el viento que viene desde la derecha y se usa un mecanismo para capturar parte de la energía cinética que posee el viento (en este caso se usó un rotor de tres palas que suele ser el más común, aunque podría haberse tratado de cualquier otro mecanismo).

El Tubo de Corriente

El rotor de la turbina eólica debe obviamente frenar el viento cuando captura su energía cinética y la convierte en energía rotacional. Esto implica que el viento se moverá más lentamente en la parte izquierda del rotor (ver Figura 1) que en la parte derecha [2].

Dado que la cantidad de aire que pasa a través del área barrida por el rotor desde la derecha (por segundo) debe ser igual a la que abandona el área del rotor por la izquierda, el aire ocupará una mayor sección transversal (diámetro) detrás del plano del rotor.

Este efecto puede apreciarse en la Figura 1, donde se muestra un tubo imaginario, el llamado tubo de corriente, alrededor del rotor de la turbina eólica. El tubo de corriente muestra cómo el viento moviéndose lentamente hacia la izquierda ocupará un gran volumen en la parte posterior del rotor.

El viento no será frenado hasta su velocidad final inmediatamente detrás del plano del rotor. La ralentización se producirá gradualmente en la parte posterior del rotor hasta que la velocidad llegue a ser prácticamente constante.

Efectos Corriente Abajo del Aerogenerador

El término corriente abajo se usa como una forma de guiarse antes y después del rotor, es decir, que todo lo que se encuentre de izquierda a derecha del aerogenerador (Según Figura 1) hasta el rotor, se le llama corriente abajo y todo lo que se encuentre desde el rotor hacia las palas se le llama corriente arriba. Es una especie de analogía con el lenguaje usado en sistemas de potencia en donde se menciona “Aguas Arriba” o “Aguas Abajo” de la fuente de generación, del transformador, entre otros.

Corriente abajo, la turbulencia del viento provocará que el viento lento de detrás del rotor se mezcle con el viento más rápido del área circundante. Por lo tanto, el abrigo del viento disminuirá gradualmente tras el rotor conforme nos alejamos de la turbina [3].

Suposición de un tubo de Corriente Cilíndrico

Ahora bien podría existir la inquietud de que una turbina giraría incluso situándola dentro de un tubo cilíndrico normal, como el que se muestra en la Figura 2.

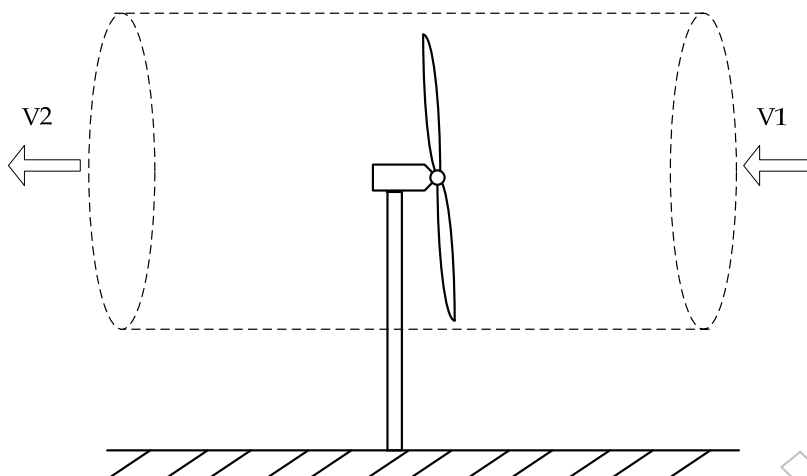


Figura 2. Suposición de un tubo de Corriente Cilíndrico

A primera instancia se pudiese creer que el rotor de una turbina podría girar si se sitúa dentro de un enorme tubo de cristal, pero de esta manera haya que considerar lo siguiente:

El viento de la parte izquierda del rotor se mueve a menor velocidad que el de la parte derecha. Pero al mismo tiempo sabemos que el volumen de aire que entra al tubo por la derecha cada segundo debe ser el mismo que el volumen de aire que sale del tubo por la izquierda. Con ello puede deducirse que si el viento encuentra algún obstáculo dentro del tubo (en este caso el rotor), parte del viento que llega desde la derecha debe ser desviado de la entrada del tubo (debido a la alta presión del aire en el extremo derecho del tubo).

Por tanto, el tubo cilíndrico no es una representación muy exacta de lo que ocurre cuando el viento encuentra una turbina eólica, por lo que la imagen de la Figura 1 es la correcta [2], descartando así cualquier suposición o inquietud referente a el comportamiento del viento al pasar por las palas del aerogenerador.

La Potencia 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; por ejemplo, si la velocidad del viento se duplica la cantidad de energía que contenga será $2^3 = 2 \times 2 \times 2 =$ ocho veces mayor [4].

En el caso de turbinas eólicas se usa la energía de frenado del viento, por lo que si se dobla la velocidad del viento se tendrá 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 [4].

Ecuación para la Potencia del viento

La potencia del viento que pasa perpendicularmente a través de un área circular es:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 \pi R^2 \quad (1)$$

donde:

P : potencia del viento medida en Watt

ρ : (rho) = densidad del aire seco, que se considera 1.186 medida en kg/m^3 (kilogramos por metro cúbico, a la presión atmosférica y temperatura estándar de 100kPa y 25°C).

v : velocidad del viento medida en m/s

R : radio del rotor medido en m (metros)

Fundamentos Aerodinámicos en Aerogeneradores

El viento está compuesto por partículas de aire en movimiento; cuando la masa de aire esté conformada por filetes, perfectamente individualizados, se dice que el movimiento del mismo es laminar, es decir cuando las trayectorias de sus partículas (o moléculas) no se entrecruzan. Las partículas que están a igual altura del suelo tienen sus trayectorias paralelas entre sí y se disponen formando láminas [2].

Mientras que si los filetes de aire se entrecruzan, lo que hace que porciones grandes y pequeñas de aire se elevan desde el suelo verticalmente mientras que otras descienden desde más altura, y no conserva su individualidad, se dice que el movimiento es turbulento; éste es el caso más general que acontece en el viento [2].

Si en cada punto de una masa de aire en movimiento turbulento se miden las velocidades instantáneas, se observa que estas varían en magnitud y en dirección sin ninguna regularidad, pero no suelen apartarse mucho de un valor medio. Los movimientos desordenados del aire a nivel macroscópico se llaman turbulencias, que pueden influir en masas de aire importantes. Cuando el viento se encuentra con un obstáculo, su movimiento empieza a ser perturbado y a hacerse irregular a una cierta distancia del mismo [2].

La fuerza sobre una pala de un aerogenerador es el resultado de la acción de la velocidad relativa del aire sobre ella. Dicha velocidad relativa es la composición de la velocidad de viento y la velocidad de giro propia de la pala. Las fuerzas que se generan son de dos tipos: fuerza de sustentación; normales a la velocidad relativa y fuerzas de arrastre, o resistencia aerodinámica paralelas a dicha velocidad relativa [1].

Sustentación y Arrastre

Es la fuerza que surge cuando un flujo de aire pasa por un perfil aerodinámico. Esta fuerza es perpendicular al flujo. La fuerza de sustentación es causada por la diferencia de presión entre la superficie superior (baja presión) y la inferior (alta presión). La diferencia de presión surge cuando el flujo (aire) es acelerado, debido al formato del objeto a través del cual está pasando [3].

En el caso de un perfil, las partículas de aire que pasan por la parte de arriba recorren un camino más largo que las que pasan por abajo. Con un aumento de velocidad, ocurre un descenso de presión de acuerdo a las leyes de fluidos de Bernoulli. La resultante de esta diferencia de presión es la fuerza de sustentación [3].

Mientras que el arrastre es una fuerza paralela al flujo de aire, que ocurre debido al formato del objeto que interactúa con el flujo y la fricción del flujo con la superficie de éste [3].

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 aerogeneradores modernos. Esto se hace sobre todo porque la corriente de aire tras la torre es muy irregular (turbulenta) [4].

Observando la Figura 3 del perfil cortado (sección transversal) del ala de un avión. La razón por la que un aeroplano puede volar es que el aire que se desliza a lo largo de la superficie superior del ala se mueve más rápidamente que el de la superficie inferior [4].

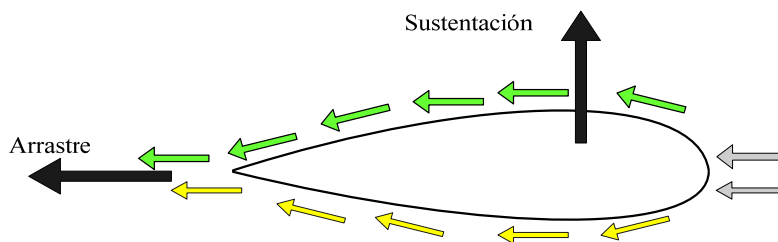


Figura 3. Sustentación en el perfil del ala de un avión

Esto implica una presión más baja en la superficie superior, lo que crea la sustentación, es decir, la fuerza de empuje hacia arriba que permite al avión volar. La sustentación es perpendicular a la dirección del viento [4].

La mayor parte de las aeroturbinas modernas se basan en el principio de sustentación aerodinámica, similar al de las alas de un avión, las palas de una hélice, o muchos sistemas de navegación a vela. Las ventajas de las máquinas que se mueven por fuerza de sustentación son varias [1]:

- Mayor coeficiente de potencia
- Mayores velocidades de giro
- Menor empuje sobre la máquina.

Pérdida de sustentación

Ahora bien, si se hace una analogía sobre lo que ocurre cuando un avión se inclina demasiado hacia atrás en un intento de subir más rápidamente, con el ángulo de ataque en una pala de aerogenerador, se tiene que la sustentación del ala va de hecho a aumentar, pero como se observa en la Figura 4, de repente, el flujo de aire de la superficie superior deja de estar en contacto con la superficie del ala. En su lugar, el aire gira alrededor de un vórtice irregular (condición que también se conoce como turbulencia) [4].

Bruscamente, la sustentación derivada de la baja presión en la superficie superior del ala desaparece. Este fenómeno es conocido como pérdida de sustentación.

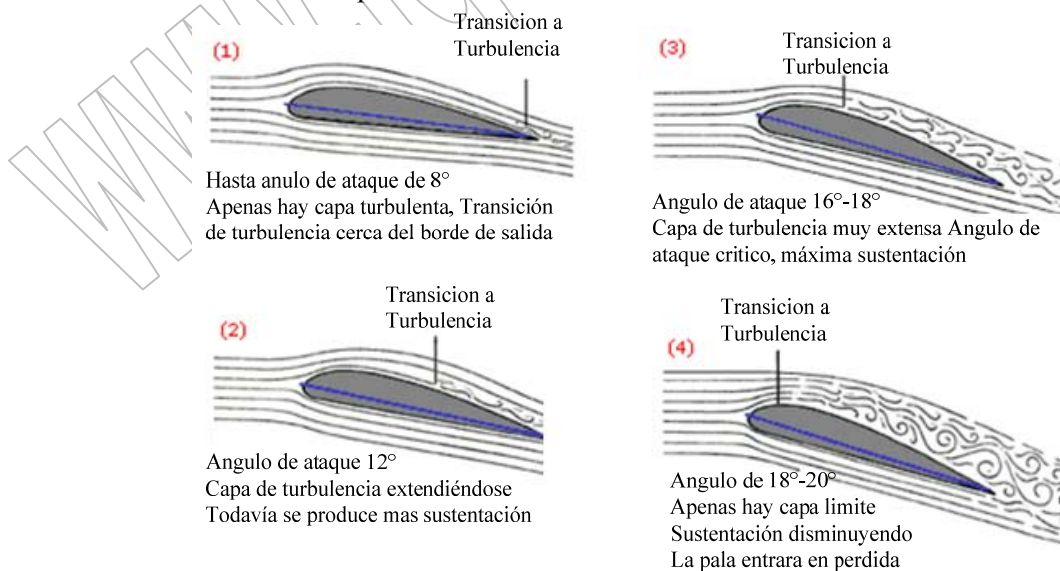


Figura 4. Pérdida de sustentación, por aumento del Ángulo de ataque

Un avión perderá la sustentación si la forma del ala va disminuyendo demasiado rápidamente conforme el aire se mueve a lo largo de su dirección general de movimiento (por supuesto, no va a ser el ala propiamente dicha la que cambie su forma, sino el ángulo que forma el ala con la dirección general de la corriente, también conocido como ángulo de ataque, que ha sido aumentado en la Figura 4) [3].

Cabe destacar que la turbulencia es creada en la cara posterior del ala en relación con la corriente de aire. La pérdida de sustentación puede ser provocada si la superficie del ala del avión (o la pala del rotor de un aerogenerador) no es completamente uniforme y lisa.

Una mella en el ala o en la pala del rotor, o un trozo de cinta adhesiva, pueden ser suficiente para iniciar una turbulencia en la parte trasera, incluso si el ángulo de ataque es bastante pequeño [3].

Hoy en día, los diseñadores de aviones y los de palas de rotor no sólo se preocupan de la sustentación y de la pérdida de sustentación. También se preocupan de la resistencia del aire, conocida en el argot técnico como resistencia aerodinámica [3].

Dicha resistencia aerodinámica, que no se mas que la fuerza resultante que experimenta un cuerpo (En este caso las palas de un aerogenerador) que se va moviendo atravesando el aire en la dirección de la velocidad relativa, entre el mismo aire y el cuerpo propiamente dicho. Normalmente la resistencia aerodinámica aumentará si el área orientada en la dirección del movimiento aumenta [5].

Fuerzas Sobre un Perfil

Un objeto situado en el seno de una corriente de aire presenta una resistencia al avance, deformando los filetes fluidos; esto depende de la forma del objeto y de su posición con relación a la dirección del viento, Figura 5 [2].

Al estudiar los efectos de la resistencia del aire sobre una placa plana, se observa que la resultante R de las fuerzas aplicadas a la placa es un vector cuyo punto de aplicación es su centro aerodinámico, (de empuje), siendo su dirección perpendicular a la placa, el sentido del viento, y su intensidad proporcional a la superficie S expuesta y al cuadrado de la velocidad del viento v [2], en la forma:

$$R = C_w \rho \frac{Sv^2}{2} = kSv^2 \quad (2)$$

donde:

k : es un coeficiente que depende del ángulo α de incidencia, de las unidades elegidas y de la turbulencia del movimiento.

C_w : es un coeficiente de resistencia (penetración)

ρ : es la densidad del aire.

S : es la sección frontal del perfil.

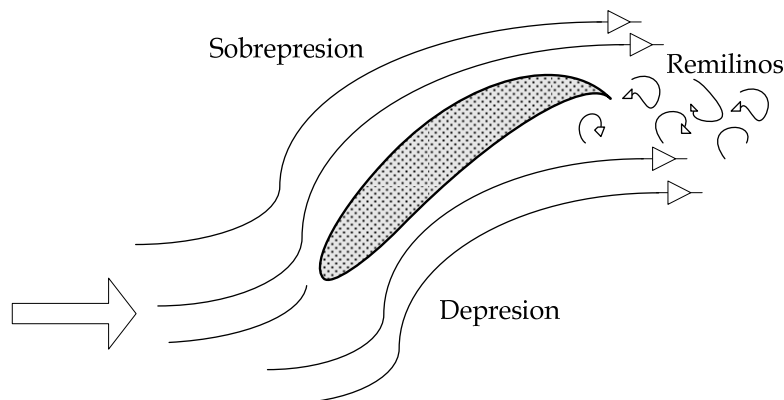


Figura 5. Perfil usado en el seno de una corriente Fluida [2]

Si el ángulo α que forma el plano de la placa con la dirección del viento es grande, existe una sobrepresión en la parte delantera de la placa y una depresión en su parte posterior de carácter turbulento, Figura 6(a); si el ángulo de incidencia α es pequeño, la sobrepresión aparece en la parte inferior de la placa y la depresión por encima, por lo que aparece una fuerza que tiende a elevarla, conocida como fuerza de sustentación o de elevación [5].

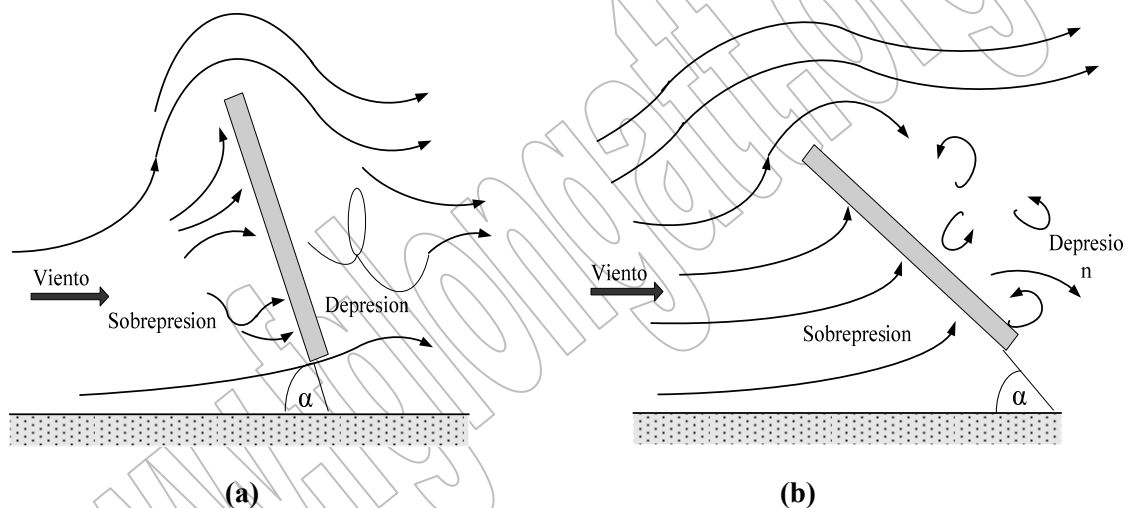


Figura 6. Incidencia del Viento Según el Angulo de Inclinación α [2]

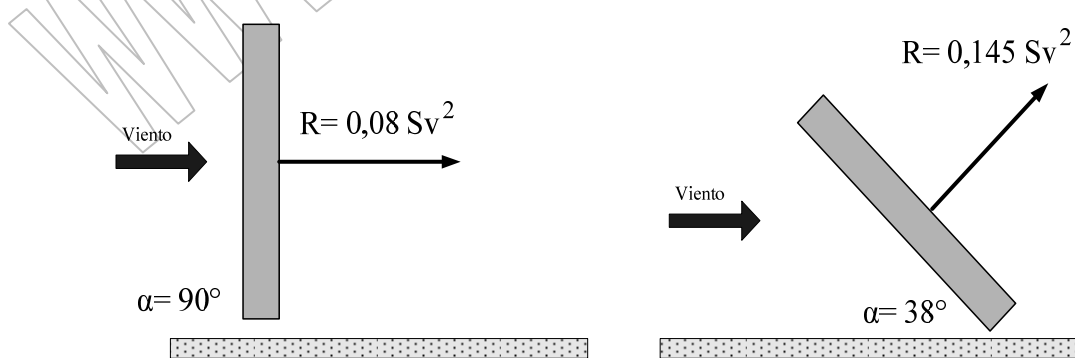


Figura 7. Perfil placa plana con dos tipos de inclinación [2]

En la Figura 7, se representa un perfil placa plana con dos tipos de inclinación; se indican los valores de R observándose que, mientras más pequeño sea el ángulo de inclinación α , la resultante R será mayor.

Efectos en el Número Reynolds

El *numero de Reynolds* domina los efectos viscosos definiendo el tamaño de las capas límites. La mayoría de todos los flujos aerodinámicos ocurren a altos números de Reynolds, lo cual implica fenómenos viscosos que son limitados por capas límites estrechos. La noción de datos es algo arbitrario, aunque un valor de 0.5×10^6 es frecuentemente el límite de cambio **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Flujos a números de Reynolds de $0.1 \times 10^6 < Re < 0.5 \times 10^6$, son llamados *números de Reynolds Bajos* en la aerodinámica. Flujos a *números de Reynolds muy bajos* son denominados por la viscosidad **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Para perfiles planos (fijos) de longitud L paralelos a la velocidad v del viento, el valor del número de Reynolds es:

$$Re = \frac{\rho V_r c}{\mu} \quad (3)$$

siendo:

- ρ : Densidad del Aire.
- V_r : Velocidad relativa de la maquina.
- c : Cuerda.
- μ : Viscosidad del Ambiente

El valor de C_w viene dado por,

$$\text{Regimen Laminar. } C_w = \frac{1.328}{\sqrt{Re}} ; Re < 10^3 \quad (4)$$

$$C_w = \frac{0.074}{Re^{1/5}} ; 10^5 < Re < 10^7 \quad (5)$$

Regimen Turbulento

$$C_w = \frac{0.455}{(\text{Log}(Re))^{2.58}} ; Re > 10^7$$

Si la placa no está perfilada convenientemente, las turbulencias originadas sobre el extradós disminuyen la energía cinética del aire. Si se permite que la placa se desplace bajo el efecto de la fuerza ejercida por el viento, producirá un cierto trabajo recuperable en forma de energía mecánica; contra menor sea la turbulencia, mayor será este trabajo [2].

Fuerzas de Arrastre y Ascensionales en Perfiles Fijos

La componente de R en la dirección del viento es la fuerza de arrastre F_{arr} , mientras que la componente de R perpendicular a la fuerza de arrastre es la fuerza ascensional F_{asc} .

$$F_{arr} = R \sin(\alpha) = C_x S v^2 \quad (6)$$

$$F_{asc} = R \cos(\alpha) = C_y S v^2 \quad (7)$$

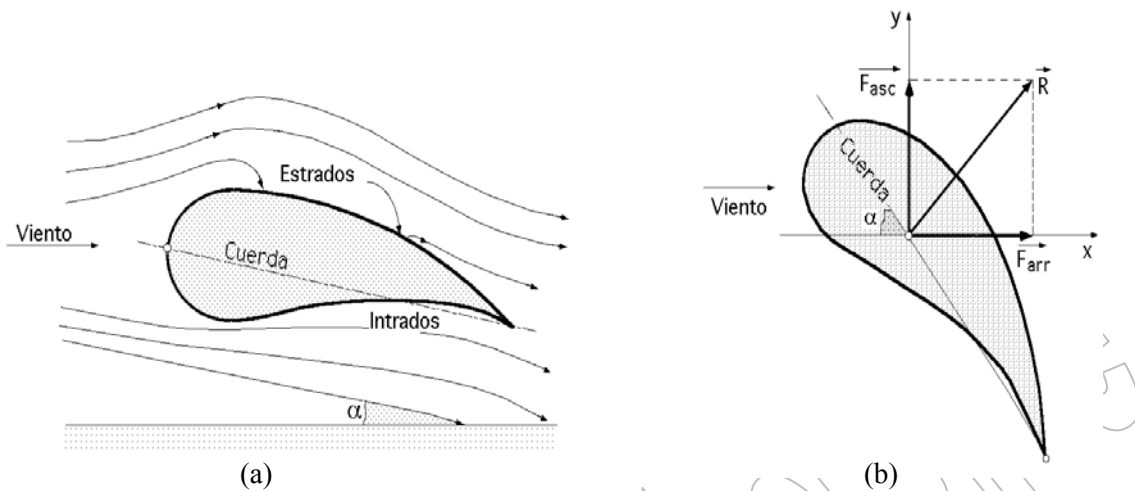


Figura 8. Coeficiente de Arrastre y Ascensionales [2]

De la Figura 8(a) se observa los estrados, que es la parte del perfil en donde las ráfagas de aire están en depresión, y el intradós, que es la parte del perfil en donde las ráfagas de aire están en sobrepresión. Mientras que para la Figura 8(b) se tiene la descomposición de la fuerza resultante en el perfil de una pala y ángulo α

La fuerza R es siempre normal a la cuerda del perfil, que es al mismo tiempo su longitud característica; el empuje ascensional aumenta a medida que α disminuye. La cuerda se considera desde el borde de ataque del perfil, al borde de salida posterior. Si la forma del perfil no es plana, se puede descomponer R en función de dos tipos de coeficientes C_x de arrastre, y C_y ascensional, siendo el eje x paralelo a la dirección del viento [4], tal como se muestra en la Figura 8(b).

Comportamiento de perfiles de álabe para turbinas eólicas.

Bajo condiciones ideales *el coeficiente de sustentación depende principalmente del ángulo de ataque*, de forma que es mayor mientras se incrementa este ángulo. Pero el comportamiento real del perfil revela que esto ocurre únicamente con ángulos de ataque pequeños (menores a 15°), debido a los efectos viscosos del aire [6].

Cuando el ángulo aumenta también lo hace la fricción del aire con la superficie del perfil, lo que frena el flujo de aire próximo a la superficie, formándose una separación del flujo y con esto, una rápida caída del coeficiente de sustentación. Esto lleva a que el comportamiento más común para perfiles de álabes de turbinas de viento sea cuando el coeficiente de sustentación aumente hasta un valor entre uno y dos y luego decrezca a medida que aumente el ángulo de ataque [6].

Conclusiones

Los aspectos y consideraciones aerodinámicos de los aerogeneradores son uno de los principales tópicos a ser tratados al momento del diseño y construcción de los mismos. En este reporte de investigación (en su parte I) se mostraron parte de esos aspectos influyentes, donde es posible resaltar lo siguiente:

- El comportamiento del aire es uno de los factores de mayor importancia para la aerodinámica de los aerogeneradores, ya que este posee dos comportamientos particulares como son: el laminar y el turbulento, los cuales influyen en el desempeño del las palas.
- Aunque la densidad del aire afecta en la potencia que se puede extraer de él, dicha potencia depende fundamentalmente de la velocidad del viento incidente y del radio del rotor que se desee utilizar.

Todas las turbinas eólicas utilizan el principio de sustentación para su funcionamiento, aprovechando la diferencia de presión en la parte superior del perfil de la pala, con respecto a la parte inferior. La sustentación se ve influenciada por dos factores como son: la resistencia aerodinámica, la cual aumentara si la superficie del cuerpo que se mueve atravesando el aire aumenta, y el ángulo de ataque α el cual debe ser pequeño para generar una sobrepresión en la parte inferior de la pala y una depresión por arriba, al ocurrir esto se tiene una fuerza que tiende a elevarla. Mientras que de ser muy grande generara una sobrepresión en la parte delantera de la pala y vientos turbulentos, debido a la depresión en la parte superior.

Referencias Documentales

- [1] Rodríguez, J., Arnaltes, S., Burgos, J., “*Sistemas Eólicos de Producción de Energía Eléctrica*”. Madrid; Editorial Rueda.
- [2] Fernández, P. *Energía Eólica. (II.- Fundamentos Aerodinámicos de las Máquinas Eólicas)*. Universidad de Cantabria. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. España. Año 2002.
- [3] Martínez Miralles; Tesis de “*Diseño de un Aerogenerador de baja Potencia*”. Universidad de Catalunya. España. Año 2003
- [4] Contreras C. “*Diseño aerodinámico de las palas de una turbina de viento de eje horizontal como fuente de energía alterna.*” Tesis para optar al título de Ingeniero Aeronáutico. Universidad Nacional Experimental de la Fuerzas Armadas. Aragua. Año 2007.
- [5] José Juvenal Ramírez Martín, Vinicio Tovar. *Resistencia Aerodinámica*. 13 de Diciembre de 2007. Documento en línea disponible en <http://cubilfis.cucei.udg.mx/archivos/materias/labmedios/resistencia.pdf>
- [6] F. González-Longatt. “Perfiles Aerodinámicos Empleado en Turbinas de Viento: Introducción para No Cultos”. Reporte de Investigación 2007-01, Venezuela. Enero, 2007.
- [7] Uribe G. y L. Rodríguez P. “*Diseño y Construcción de un Prototipo Académico de Generación Eólica para Instalación en el Laboratorio de maquinas de la escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Carabobo.*” Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Electricista en la Universidad de Carabobo. Venezuela. 2008.

www.fglongatt.org.ve