

## AERODINÁMICA: UN AEROGENERADOR

---

v15.10.25

Norberto Fueyo  
Carlos Montañés  
Área de Mecánica de Fluidos  
Universidad de Zaragoza

 **fluidos!**  
1542

Preparado para imprimir a doble cara

# 6

---

## Aerodinámica: Funcionamiento de un aerogenerador

---

►N► indica las preguntas a las que debe contestar en el informe de la práctica. N es el número secuencial de la pregunta. En su informe, use N para indicar a qué pregunta está contestando.

▲ indica (en su caso) trabajo que puede hacer en casa o en la biblioteca. Para aprovechar el tiempo en el laboratorio, no lo haga hasta que no haya acabado con el resto de la práctica.

Su informe debe ser conciso, pero técnicamente riguroso: conteste completamente a cada una de las preguntas sin “enrollarse”, y no añada materia no solicitada. Su informe debe ser claro y ordenado, pero debe ser manuscrito. (Puede, por supuesto, usar un ordenador si quiere, por ejemplo, para hacer gráficas.)

El profesor no corrige el informe. Sobre la práctica se pueden hacer preguntas en los controles, y habrá un examen de prácticas en las convocatorias globales. Para ambas cosas, usted puede llevar su informe (escrito según las reglas anteriores, y en particular de su puño y letra) y este guion, para consultarlos durante el control o examen.

El informe es trabajo individual y copiar de otros (de este curso o de cursos

anteriores) es ilegal, y tiene la consideración académica de copiado o plagio.

## 6.0 Objetivos

Los objetivos de esta práctica son:

1. Afianzar su comprensión de las fuerzas que un fluido en movimiento ejerce sobre cuerpos sólidos.
2. Familiarizarse con conceptos básicos de aerodinámica.
3. Conocer, de forma simplificada, cómo funciona un aerogenerador.
4. Aplicar las técnicas del Análisis Dimensional al estudio del funcionamiento de un aerogenerador.

## 6.1 Introducción

Para optimizar el funcionamiento de los aerogeneradores, en los parques eólicos se mide continuamente la dirección y velocidad del viento. Con estos datos, los sistemas de control orientan el aerogenerador en la dirección normal al viento y ajustan las palas con respecto al plano de rotación para generar la potencia deseada.

En esta práctica implementaremos un modelo sencillo para el estudio del comportamiento de un aerogenerador de eje horizontal de tres palas, como el mostrado en la Figura 6.1.

Para ello se estudiará la interacción del viento con **una** de las palas, suponiendo que la velocidad del viento es igual para las tres palas y en toda la extensión de cada una de ellas ( ►1▷ ; es esto cierto? Discuta en tres líneas).

El modelo utilizará una discretización de la pala en elementos de longitud pequeña (“rodajas”), implementada en una hoja de cálculo; en cada elemento discreto se usarán las ecuaciones de la aerodinámica necesarias para obtener las fuerzas y los momentos ejercidos por el viento sobre el elemento. Con ello estimaremos la potencia transmitida al aerogenerador en función de los parámetros de operación más relevantes, tales como la velocidad del viento, la velocidad de rotación y la orientación (**pitch**) de las palas.

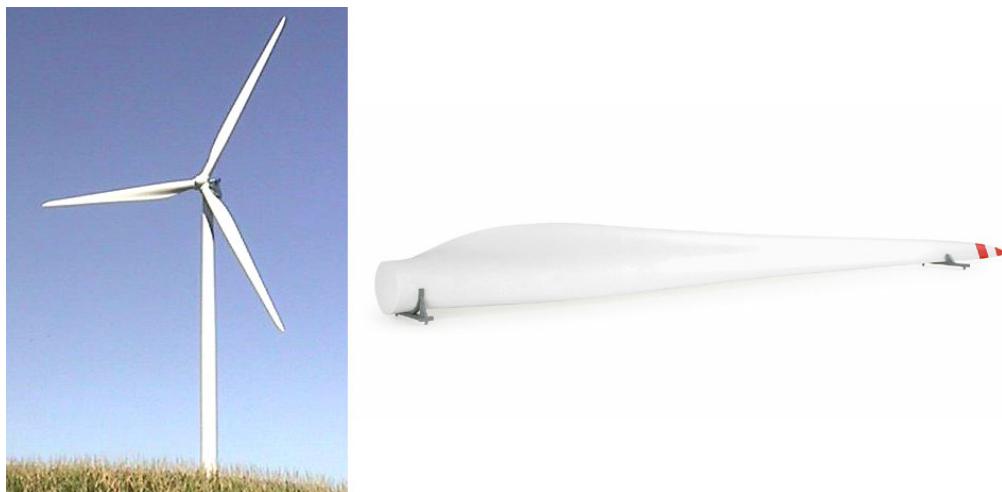


Figura 6.1: Aerogenerador tipo (izda.) y detalle de una pala (dcha.).

## 6.2 Geometría de la pala, composición de velocidades y fuerzas

Para estimar la fuerza y la potencia intercambiada entre el viento y el aerogenerador es esencial entender la geometría de la pala, la composición de velocidades y las direcciones de las fuerzas.

### 6.2.1 El perfil alar

- La sección de una pala tiene forma de **perfil alar**, cuyo tamaño, e incluso forma, suelen variar con la distancia al eje. La Figura 6.2 muestra un ejemplo de perfil alar. Consideraremos la pala del aerogenerador como una sucesión de perfiles alares.
- La **cuerda** de un perfil alar,  $c$ , es la distancia entre el borde de ataque del perfil y el borde de salida (ver Figura 6.2). La cuerda es frecuentemente la longitud característica que se utiliza cuando se hace análisis dimensional en este tipo de problemas (por ejemplo, es la longitud de referencia para calcular el número de Reynolds).
- El **ángulo de ataque**,  $\alpha$ , es el ángulo formado por la cuerda y la velocidad (relativa) incidente,  $\vec{w}$  (ver Figura 6.2). Note que usamos la veloci-

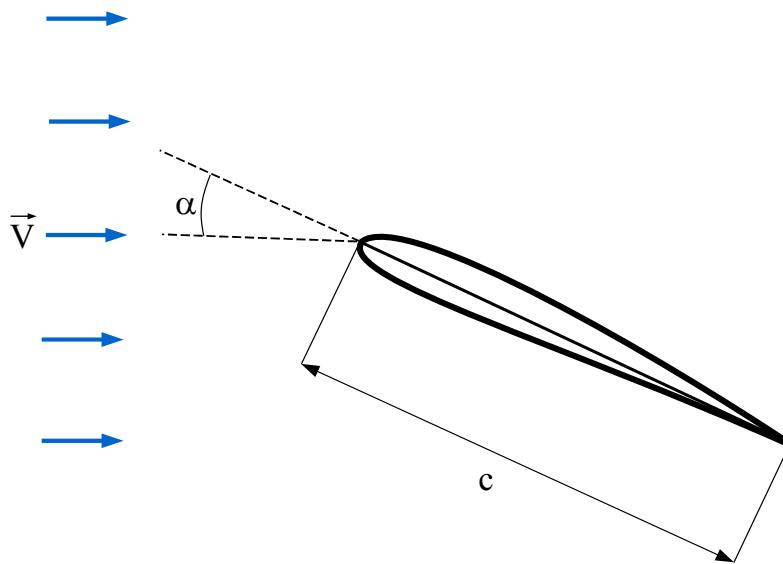


Figura 6.2: Definición de cuerda,  $c$ , y ángulo de ataque,  $\alpha$ .

dad relativa porque a menudo el perfil se mueve; ciertamente lo hace en un aerogenerador.

- Como se observa en la Figura 6.1, las palas se diseñan de tal forma que este perfil alar gira a lo largo de longitud de la pala (la pala está alabeada). El ángulo que forma la cuerda con el plano de rotación del aerogenerador se denomina el **pitch** (ver Figura 6.3), y varía tanto porque el perfil gira (por construcción) a lo largo de la pala como porque la pala puede ser girada, mecánicamente, como un todo alrededor de su eje longitudinal. El primer pitch se denomina **pitch geométrico**  $\psi(r)$  y depende de la distancia  $r$  a lo largo de la pala, y el segundo pitch de pala  $\phi$ . A una distancia  $r$  del eje a lo largo de la pala, el pitch total es:

$$\gamma(r) = \psi(r) + \phi \quad . \quad (6.1)$$

Formalmente, el pitch geométrico  $\psi(r)$  es el ángulo que forma la cuerda de la sección más alejada del eje del aerogenerador (la más próxima a la punta de la pala) con la cuerda de la sección que está a una distancia  $r$  del eje (Figura 6.3); y el pitch de pala es el ángulo formado por la cuerda de la sección más alejada del eje y el plano de rotación.

Para esta práctica, supondremos que la forma de la sección de la pala es geométricamente semejante en toda su extensión y que la cuerda a lo largo de

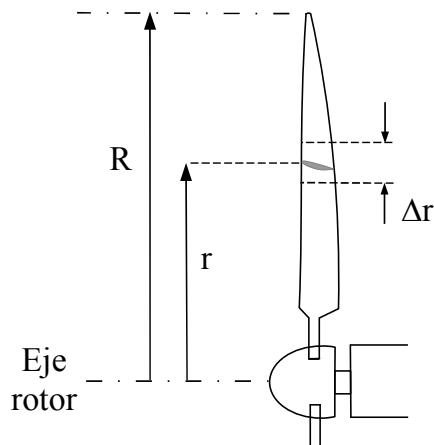


Figura 6.3: Esquema de una pala.

la pala según:

$$c(r) = 0,003r^2 - 0,15r + 2,4 \quad , \quad (6.2)$$

donde  $r$  es la distancia de la sección al eje de giro del aerogenerador.

Supondremos que el *pitch geométrico* varía según:

$$\psi(r) = 0,075r^2 - 3,85r + 49,4 \quad , \quad (6.3)$$

con  $\psi$  expresado en grados.

## 6.2.2 Composición de velocidades

La fuerza sobre la pala es causada por la velocidad relativa entre la pala y el viento.

Para analizar la geometría de la composición de velocidades, imagine que una de las palas pasa en su giro por la posición vertical, y que en ella toma una una sección horizontal (un perfil alar) a una distancia  $r$  del eje (ver Figura 6.4). Las velocidades involucradas son:

- La velocidad del viento,  $\vec{V}$ , enfrentada al plano de rotación del aerogenerador;

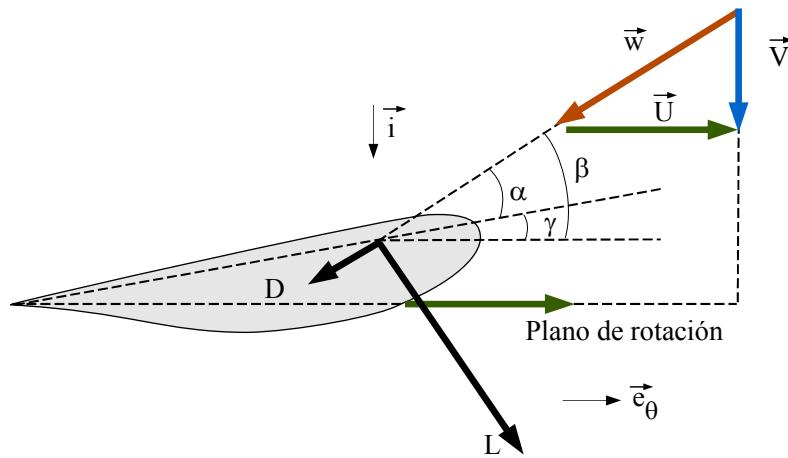


Figura 6.4: Esquema de velocidades en la sección de pala.

- La velocidad lineal de la pala debida a su rotación con velocidad angular  $\Omega$ ,  $\vec{U} = \Omega r \vec{e}_\theta$ , que es en dirección angular;
- La velocidad relativa, que es la diferencia de ambas:

$$\vec{w} = \vec{V} - \Omega r \vec{e}_\theta \quad . \quad (6.4)$$

Observe que el ángulo entre la velocidad relativa  $\vec{w}$  y la cuerda (es decir, el ángulo de ataque  $\alpha$ ) viene dado por la diferencia entre el ángulo  $\beta$  entre la velocidad relativa y el plano de rotación, y el pitch  $\gamma$  de la sección:

$$\alpha = \beta - \gamma \quad . \quad (6.5)$$

### 6.2.3 Las fuerzas de arrastre y sustentación

La fuerza sobre cada una de las palas la calcularemos integrando la fuerza que actúa sobre cada sección (perfil alar) situada a una distancia  $r$  del eje de giro.

Calcularemos separadamente las dos componentes clásicas de esta fuerza en Aerodinámica:

- La fuerza en la dirección de la velocidad relativa, llamada **fuerza de arrastre** (*drag*, en inglés),  $D$ , en la dirección de la velocidad del aire incidente (Figura 6.2); y

- La fuerza en la dirección perpendicular a la velocidad relativa, llamada **fuerza de sustentación** (*lift*, en inglés),  $L$  (Figura 6.2).

Con estas fuerzas se definen los números adimensionales  $C_D$ , **coeficiente de arrastre**, y  $C_L$ , **coeficiente de sustentación**:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho w^2 A} \quad C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho w^2 A} \quad , \quad (6.6)$$

donde  $w$  es la velocidad **relativa** del aire incidente,  $\rho$  es la densidad del aire y  $A$  es el área de la planta del perfil, igual al producto de la cuerda por la longitud en dirección normal a la sección.

Estos coeficientes  $C_D$  y  $C_L$  varían con el ángulo de ataque,  $\alpha$ , y con el número de Reynolds,  $Re$ , y esta dependencia se puede estudiar en un túnel de viento mediante experimentación. En las décadas de 1930 y 1940 el NACA<sup>1</sup> llevó a cabo extensos estudios sobre distintos tipos de perfiles; para esta práctica tomaremos una versión simplificada de los coeficientes correspondientes al perfil NACA 4415<sup>2</sup>:

$$C_D = (1,5 \cdot 10^{-5} |\alpha^3| + 0,01) \log\left(\frac{2,4 \cdot 10^7}{Re}\right) \quad -20 \leq \alpha \leq 45 \quad ; \quad (6.7)$$

$$C_L = \begin{cases} 0,1\alpha + 0,444 & -20 \leq \alpha \leq 7 \\ -0,005\alpha^2 + 0,16\alpha + 0,27 & 7 \leq \alpha \leq 25 \\ 1,145 & 25 \leq \alpha \leq 45 \end{cases} \quad , \quad (6.8)$$

donde el ángulo de ataque  $\alpha$  se expresa en grados sexagesimales, y  $Re$  está basado en la cuerda.

#### 6.2.4 Potencia, momento y fuerza sobre la pala

La potencia desarrollada por la pala viene dada por la expresión:

$$\dot{W} = M_x \Omega \quad , \quad (6.9)$$

<sup>1</sup>National Advisory Committee for Aeronautics, disuelto en 1958 y cuyo personal e instalaciones se transfirieron a la NASA.

<sup>2</sup>Para más información sobre perfiles NACA, ver <http://www.aerospaceweb.org/question/airfoils/q0041.shtml> o buscar en wikipedia “NACA airfoils”.

donde  $\Omega$  es la velocidad de rotación de la pala y  $M_x$  es el momento del aire sobre la pala con respecto al eje de rotación (y en la dirección del eje del aerogenerador). El momento viene dado por la integral de los momentos diferenciales a lo largo de la pala:

$$M_x = \int_0^R r f_\theta(r) dr , \quad (6.10)$$

donde  $f_\theta$  es la fuerza en dirección tangencial por unidad de longitud de pala. Análogamente, la fuerza axial total soportada por una pala es:

$$F_x = \int_0^R f_x(r) dr , \quad (6.11)$$

donde  $f_x$  es la fuerza en dirección axial por unidad de longitud de pala. Esta fuerza es la que debe soportar la estructura (la torre).

### 6.2.5 Composición de fuerzas

Note que tanto la fuerza de arrastre  $D$  como la de sustentación  $L$  contribuyen a la fuerza axial  $f_x$  y a la tangencial  $f_\theta$ . Estas contribuciones se pueden deducir fácilmente a partir de la geometría (Figura 6.5), a través del ángulo  $\beta$ . Note también que las contribuciones de  $D$  y  $L$  a la fuerza axial se suman, mientras que las contribuciones a la fuerza tangencial se restan (con el esquema de ángulos de la Figura 6.5).

### 6.2.6 Discretización

Dada la complejidad de las expresiones resultantes, no es posible realizar la integración analítica de las ecuaciones (6.10) y (6.11); realizaremos la integración de forma numérica, discretizando la pala en  $N$  perfiles consecutivos, cada uno de anchura  $\Delta r$ . En cada uno de estos sectores calcularemos las fuerzas,  $f_{x,i}$ ,  $f_{\theta,i}$ , y momentos,  $r f_{\theta,i}$ , por unidad de longitud; multiplicando por la anchura del perfil y sumando para todos los perfiles discretos a lo largo de la pala obtendremos la fuerza axial total y el momento angular total (y con él la potencia):

$$M_x \simeq \sum_{i=1}^N r_i f_\theta(r_i) \Delta r ; \quad (6.12)$$

$$F_x \simeq \sum_{i=1}^N f_x(r_i) \Delta r . \quad (6.13)$$

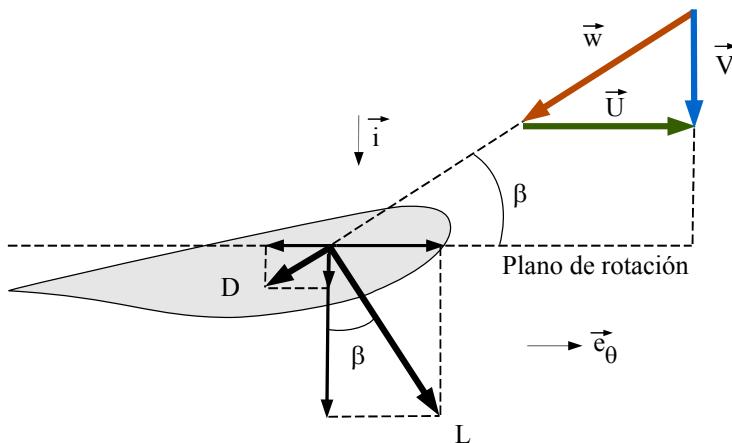


Figura 6.5: Esquema de fuerzas sobre la sección de palanca.

En el límite  $\Delta r \rightarrow 0$ , las expresiones (6.12) y (6.13) se convierten en las integrales (6.10) y (6.11), respectivamente.

### 6.3 Realización de la práctica

Considere un aerogenerador de tres palas en el que:

1. Cada una de las palas tiene una longitud de 26 m;
2. Estas tienen las características geométricas descritas en las secciones anteriores (cuerda, pitch);
3. Se puede despreciar la contribución de los dos metros de pala más cercanos al eje<sup>3</sup>;
4. El rango de velocidades de rotación  $\Omega$  está entre 14 y 30 rpm;
5. La velocidad del viento a la que arranca el aerogenerador es 4 m/s (es decir, no opera para velocidades de viento menores);
6. La velocidad del viento de corte del aerogenerador es de 25 m/s;

<sup>3</sup>Esto es justificable dado que el rotor tiene un cierto diámetro y que la zona de la pala más cercana a este tiene una geometría orientada a asegurar la integridad estructural, no a generar potencia.

7. La velocidad nominal (de diseño) de rotación es de 26 rpm, para una velocidad del viento de 15 m/s.

Para realizar la práctica, escoja una discretización de  $\Delta r = 1$  m (si quiere, puede estudiar el efecto de variar este parámetro e incluir las conclusiones en su informe), y haga lo siguiente:

- Basándose en la plantilla proporcionada, ▶2▷ elabore una hoja de cálculo que implemente el método explicado en las secciones anteriores y genere como resultado la potencia suministrada por el aerogenerador y las fuerzas axiales sobre este, en función de la velocidad del viento, la velocidad de rotación y el *pitch de pala*,  $\phi$ .
- ▶3▷ Represente gráficamente la potencia y la fuerza axial total frente al pitch de pala  $\phi$  para tres velocidades de viento (5, 15 y 25 m/s), para la velocidad de rotación nominal.
- En condiciones de poco viento, ▶4▷ ¿utilizaría velocidades de rotación altas o bajas? ¿por qué? ¿qué ventajas (e inconvenientes si los hay) presenta su respuesta?
- ▶5▷ Represente gráficamente las fuerzas axiales y angulares a lo largo de la pala para distintos  $\Omega$  y pitch de pala  $\phi$  (para el resto de condiciones nominales), comentando brevemente los resultados.
- En la segunda pestaña de la hoja de cálculo modelo, encontrará la curva de potencia de un aerogenerador comercial, comparable al que usted está modelando. ▶6▷ Calcule el coeficiente de potencia, definido como el ratio de la potencia suministrada por el aerogenerador y la potencia  *contenida* en el viento,  $\rho V^3 A/2$  (siendo  $A$  el área barrida por las palas). ▶7▷ Represente gráficamente de forma conjunta la potencia y el coeficiente de potencia (en dos ejes diferentes) frente a la velocidad del viento. Razoné el resultado.
- ▶8▷ ¿Cómo operaría el aerogenerador que ha modelado para obtener una curva de potencia similar a la del aerogenerador comercial? ▶9▷ Represente gráficamente, de forma cualitativa, el *pitch de pala*,  $\phi$ , en función de la velocidad del viento para la operación que ha descrito en la cuestión anterior.

## 6.4 Cuestiones adicionales (X)

- ►10► X ¿Qué criterios buscaría usted a la hora de diseñar la variación del *pitch geométrico* a lo largo de una pala?
- A lo largo de la práctica se ha estudiado el comportamiento de una única pala aislada, despreciando así el posible efecto de la presencia de las otras dos palas. ►11► X Comente este efecto, relacionándolo con la velocidad de giro del aerogenerador y el número de palas de este.
- ►12► X Formule unas breves conclusiones sobre el efecto de las diferentes variables en un aerogenerador y su importancia relativa (sea conciso).