

# Capítulo 1

## Aerogeneradores

Una turbina eólica es un dispositivo para extraer energía cinética del viento. Al haber extraído parte de su energía cinética, el viento debe disminuir la velocidad, pero solo esa masa de aire que pasa a través del disco del rotor se ve afectado. Suponiendo que la masa de aire afectada permanece separada del aire que no pasa a través del disco del rotor y por lo tanto no se desacelera, se puede dibujar una superficie límite que contenga a la masa de aire afectada y este límite se puede extender hacia arriba y hacia abajo formando un largo tubo de corriente de sección transversal circular. No hay flujo de aire a través del límite, por lo que el caudal másico del aire que fluye a lo largo del tubo de corriente será el mismo para todas las posiciones a lo largo de las líneas de corriente dentro del tubo de corriente. Como el aire dentro del tubo de corriente se ralentiza, pero no se comprime, el área transversal del tubo de corriente debe expandirse para acomodar el aire en movimiento más lento (Figura 3.1).

Aunque la energía cinética se extrae del flujo de aire, un cambio repentino en la velocidad no es posible ni deseable debido a las enormes aceleraciones y fuerzas que esto requeriría. Sin embargo, la energía de presión se puede extraer de forma escalonada, y todas las turbinas de viento, cualquiera sea su diseño, operan de esta manera. La presencia de la turbina hace que el aire que se aproxima, corriente arriba, gradualmente disminuya la velocidad de modo que cuando el aire llegue al disco del rotor su velocidad ya sea menor que la velocidad del viento de corriente libre. El tubo de corriente se expande como resultado del ralentizando y, debido a que aún no se ha hecho ningún trabajo sobre el aire estático, la presión aumenta para absorber la disminución de la energía cinética. A medida que el aire pasa a través del disco del rotor, por diseño, hay una caída en la presión

estática tal que, al salir, el aire está por debajo del nivel de presión atmosférica.

El aire continúa aguas abajo con velocidad y presión estática reducidas: esta región del flujo se llama la estela. Eventualmente, muy abajo, la presión estática en la estela debe regresar al nivel atmosférico para lograr el equilibrio. El aumento en la presión estática es a expensas de la energía cinética y por lo tanto causa un ralentizado del viento. Por lo tanto, entre las condiciones muy lejos aguas arriba y lejos de la estela no hay cambios en la presión estática, pero hay una reducción en la energía cinética.

El concepto de Actuador Discal El mecanismo descrito anteriormente explica la extracción de energía cinética, pero de ninguna manera explica lo que le sucede a esa energía; si bien puede ser utilizada como trabajo útil, también parte de dicha energía puede volver a vertirse en el viento como turbulencia y eventualmente disiparse en forma de calor. Podemos comenzar un análisis del comportamiento aerodinámico de turbinas eólicas sin ningún diseño específico de turbina, considerando solamente el proceso de extracción de energía. El dispositivo general que lleva a cabo esta tarea se llama un actuador discal (Figura 3.2). Aguas arriba del disco, el tubo de corriente tiene un área de sección transversal más pequeña que la del disco y aguas abajo un área más grande que el disco. La expansión del tubo de corriente se debe a que el caudal másico debe ser el mismo en todas partes. La masa de aire que pasa a través de una sección transversal dada del tubo de corriente en una unidad de longitud por unidad de tiempo es  $\rho AU$ , donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $A$  es el área de la sección transversal y  $U$  es la velocidad del flujo. El caudal másico debe ser el mismo en todas partes a lo largo del tubo de corriente, por lo tanto  $\rho A_\infty U_\infty = \rho A_d U_d = \rho A_W U_W$

El símbolo  $U_\infty$  se refiere a las condiciones muy lejanas aguas arriba,  $U_d$  se refiere a las condiciones en el disco y  $U_W$  se refiere a las condiciones en la estela lejana. Es habitual considerar que el actuador discal induce una variación de velocidad que debe superponerse a la velocidad de flujo libre. La componente en la dirección del flujo de este flujo inducido en el disco viene dado por  $-aU_\infty$ , donde  $a$  se llama factor de inducción de flujo axial, o el factor de entrada. En el disco, por lo tanto, la velocidad neta en la dirección del flujo es  $U_d = U_\infty(1 - a)$

Teoría de conservación de momento (conservación???) El aire que pasa a través del disco sufre un cambio global en la velocidad  $U_\infty - U_W$  y una tasa de cambio de momento igual al cambio global de velocidad multiplicado por la tasa de flujo másico:

$$\text{Tasa de cambio de impulso} = (U_{\text{inf}} - U_W)\rho A_d U_d$$

La fuerza que causa este cambio de impulso proviene enteramente de la diferencia de presión a un lado y otro del actuador discal, porque el tubo de corriente está completamente rodeado de aire a presión atmosférica, lo que daría una fuerza neta nula. Por lo tanto,

$$(p_d^+ - p_d^-)A_d = (U_{\text{inf}} - U_W)\rho A_d U_{\text{inf}}(1 - a)$$

Para obtener la diferencia de presión  $(p_d^+ - p_d^-)$ , la ecuación de Bernoulli se aplica por separado a las secciones aguas arriba y aguas abajo del tubo de corriente; las ecuaciones separadas son necesarias porque la energía total es diferente aguas arriba y aguas abajo.

La ecuación de Bernoulli establece que en condiciones estables, la energía total del flujo (energía cinética, energía de presión estática y energía potencial gravitatoria) permanece constante siempre que no se realice ningún trabajo sobre el fluido o por el fluido. Por lo tanto, para una unidad de volumen de aire,

$$\frac{1}{2}\rho U^2 + p + \rho gh = \text{constant}$$

Por lo tanto, aguas arriba tenemos

$$\frac{1}{2}\rho_{\text{inf}}U_{\text{inf}}^2 + p_{\text{inf}}gh_{\text{inf}} = \frac{1}{2}\rho_d U_d^2 + p_d^+ + \rho_d gh_d$$

Suponiendo que el flujo es incompresible ( $\rho_{\text{inf}} = \rho_d$ ) y horizontal ( $h_{\text{inf}} = h_d$ ), entonces

$$\frac{1}{2}\rho U_W^2 + p_{\text{inf}} = \frac{1}{2}\rho U_d^2 + p_d^+$$

Del mismo modo, aguas abajo,

$$\frac{1}{2}\rho U_W^2 + p_{\text{inf}} = \frac{1}{2}\rho U_d^2 + p_d^-$$

Restando estas ecuaciones obtenemos

$$(p_d^+ - p_d^-) = \frac{1}{2}\rho(U_{\text{inf}}^2 - U_W^2)$$

La ecuación (3.4) luego da

$$\frac{1}{2}\rho(U_{\text{inf}}^2 - U_W^2)A_d = (U_{\text{inf}} - U_W)\rho A_d U_{\text{inf}}(1 - a)$$

y entonces

$$U_W = (1 - 2a)U_{\text{inf}}$$

Es decir, mitad de la pérdida de velocidad axial en el tubo de corriente tiene lugar aguas arriba del actuador discal y la otra mitad aguas abajo.