ENERGIA MECANICA PRODUCIDA POR EL VIENTO CONVERTIDA A ENERGIA ELECTRICA

La **energía mecánica** se puede definir como *la forma de energía que se puede convertir completamente en trabajo mecánico de modo directo mediante un dispositivo mecánico como una turbina ideal*. Las formas más familiares de energía mecánica son la cinética y la potencial. Sin embargo, la térmica no es energía mecánica puesto que no se puede convertir en trabajo de forma completa y directa (segunda ley de la termodinámica).

Una bomba transfiere energía mecánica a un fluido al elevar la presión de éste, y una turbina extrae energía mecánica de un fluido al disminuir su presión; de ahí que la presión de un fluido en movimiento se relacione también con su energía mecánica. De hecho, la unidad de presión Pa es equivalente a Pa = N/m^2 = N · m/m^3 = J/m^3, que es la energía por unidad de volumen, y el producto Pv o su equivalente P/ρ tiene la unidad J/kg, que corresponde a la energía por unidad de masa. Es importante observar que la presión por sí misma no es una forma de energía, pero una fuerza de presión que actúa sobre un fluido a través de una distancia produce trabajo, llamado *trabajo de flujo*, en una cantidad de P/ρ por unidad de masa. El trabajo de flujo se expresa en términos de las propiedades del fluido y es conveniente considerarlo como parte de la energía de un fluido en movimiento y llamarlo *energía de flujo*. Por lo tanto, la energía mecánica de un fluido en movimiento por unidad de masa se puede expresar como

$$e_{\text{mecánica}} = \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \qquad \textbf{(2-10)}$$

donde P/ρ es la *energía de flujo*, $V^2/2$ es la *energía cinética* y gz es la *energía potencial* del fluido, todas por unidad de masa. También es posible expresarla por unidad de tiempo

$$\dot{E}_{\text{mecánica}} = \dot{m}e_{\text{mecánica}} = \dot{m}\left(\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz\right) \qquad \textbf{(2-11)}$$

donde $\dot{m}$ es el flujo másico del fluido. Entonces el cambio de energía mecánica de un fluido durante flujo incompresible (ρ = constante) es

$$\Delta e_{\text{mecánica}} = \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \qquad \text{(kJ/kg)} \qquad \textbf{(2-12)}$$

y

$$\Delta \dot{E}_{\text{mecánica}} = \dot{m}\Delta e_{\text{mecánica}} = \dot{m}\left(\frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)\right) \qquad \text{(kW)} \qquad \textbf{(2-13)}$$

Por lo tanto, la energía mecánica de un fluido no cambia durante el flujo si su presión, densidad, velocidad y altura permanecen constantes. En ausencia de pérdidas, el cambio de energía mecánica representa el trabajo mecánico suministrado al fluido (si $\Delta e_{\text{mecánica}} > 0$) o extraído del fluido (si $\Delta e_{\text{mecánica}} < 0$).

Ejemplo

EJEMPLO 2-2 Energía eólica

Un sitio evaluado para construir una granja eólica tiene vientos permanentes a una velocidad de 8.5 m/s (Fig. 2-10). Determine la energía eólica *a*) por unidad de masa, *b*) para una masa de 10 kg y *c*) para un flujo de 1 154 kg/s de aire.

Solución Se tiene un sitio con una velocidad de viento especificada, donde se determinará la energía eólica por unidad de masa, para una masa especificada y un determinado flujo másico de aire.

Suposiciones El viento fluye en forma permanente a la velocidad especificada.

Análisis La única forma de aprovechar la energía del aire atmosférico es la energía cinética, la cual se dirige a una turbina eólica.

a) La energía eólica por masa unitaria de aire es

$$e = ec = \frac{V^2}{2} = \frac{(8.5 \text{ m/s})^2}{2}\left(\frac{1 \text{ J/kg}}{1 \text{ m}^2/\text{s}^2}\right) = \mathbf{36.1 \text{ J/kg}}$$

b) La energía eólica para una masa de aire de 10 kg es

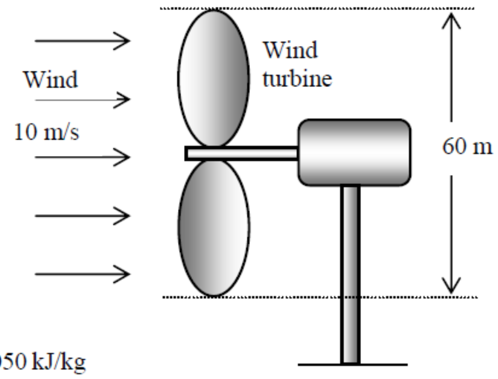
$$E = me = (10 \text{ kg})(36.1 \text{ J/kg}) = \mathbf{361 \text{ J}}$$

c) La energía eólica de un flujo másico de 1 154 kg/s es

$$\dot{E} = \dot{m}e = (1\,154 \text{ kg/s})(36.1 \text{ J/kg})\left(\frac{1 \text{ kW}}{1\,000 \text{ J/s}}\right) = \mathbf{41.7 \text{ kW}}$$

Comentario Se puede demostrar que el flujo másico específico corresponde a una sección del flujo con un diámetro de 12 m cuando la densidad del aire es de 1.2 kg/m³. Por lo tanto, una turbina eólica con un diámetro de 12 m tiene un potencial de generación de energía de 41.7 kW. Las turbinas eólicas reales convierten en energía eléctrica cerca de un tercio de este potencial.

2-14 Wind is blowing steadily at a certain velocity. The mechanical energy of air per unit mass and the power generation potential are to be determined.



Assumptions The wind is blowing steadily at a constant uniform velocity.

Properties The density of air is given to be $\rho = 1.25$ kg/m^3.

Analysis Kinetic energy is the only form of mechanical energy the wind possesses, and it can be converted to work entirely. Therefore, the power potential of the wind is its kinetic energy, which is $V^2/2$ per unit mass, and $\dot{m}V^2/2$ for a given mass flow rate:

$$e_{\text{mech}} = ke = \frac{V^2}{2} = \frac{(10\text{ m/s})^2}{2}\left(\frac{1\text{ kJ/kg}}{1000\text{ m}^2/\text{s}^2}\right) = 0.050\text{ kJ/kg}$$

$$\dot{m} = \rho VA = \rho V\frac{\pi D^2}{4} = (1.25\text{ kg/m}^3)(10\text{ m/s})\frac{\pi(60\text{ m})^2}{4} = 35{,}340\text{ kg/s}$$

$$\dot{W}_{\max} = \dot{E}_{\text{mech}} = \dot{m}e_{\text{mech}} = (35{,}340\text{ kg/s})(0.050\text{ kJ/kg}) = \mathbf{1770\ kW}$$

Therefore, 1770 kW of actual power can be generated by this wind turbine at the stated conditions.

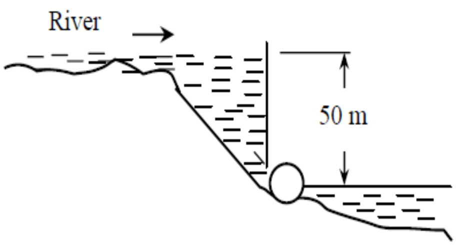
Discussion The power generation of a wind turbine is proportional to the cube of the wind velocity, and thus the power generation will change strongly with the wind conditions.

2-17 A river flowing steadily at a specified flow rate is considered for hydroelectric power generation by collecting the water in a dam. For a specified water height, the power generation potential is to be determined.

Assumptions **1** The elevation given is the elevation of the free surface of the river. **2** The mechanical energy of water at the turbine exit is negligible.

Properties We take the density of water to be $\rho = 1000$ kg/m^3.

Analysis The total mechanical energy the water in a dam possesses is equivalent to the potential energy of water at the free surface of the dam (relative to free surface of discharge water), and it can be converted to work entirely. Therefore, the power potential of water is its potential energy, which is gz per unit mass, and $\dot{m}gz$ for a given mass flow rate.



$$e_{\text{mech}} = pe = gz = (9.81\text{ m/s}^2)(50\text{ m})\left(\frac{1\text{ kJ/kg}}{1000\text{ m}^2/\text{s}^2}\right) = 0.4905\text{ kJ/kg}$$

The mass flow rate is

$$\dot{m} = \rho\dot{V} = (1000\text{ kg/m}^3)(240\text{ m}^3/\text{s}) = 240{,}000\text{ kg/s}$$

Then the power generation potential becomes

$$\dot{W}_{\max} = \dot{E}_{\text{mech}} = \dot{m}e_{\text{mech}} = (240{,}000\text{ kg/s})(0.4905\text{ kJ/kg})\left(\frac{1\text{ MW}}{1000\text{ kJ/s}}\right) = \mathbf{118\ MW}$$

Therefore, 118 MW of power can be generated from this river if its power potential can be recovered completely.

Discussion Note that the power output of an actual turbine will be less than 118 MW because of losses and inefficiencies.

EFICIENCIA EN MAQUINAS

mediante una turbina y producir potencia mecánica en la forma de una flecha que gira y propulsa un generador o cualquier otro dispositivo rotatorio. El grado de perfección del proceso de conversión entre el trabajo mecánico suministrado o extraído y la energía mecánica del fluido se expresa mediante la **eficiencia de bomba** y la **eficiencia de turbina**, definidas como

$$\eta_{bomba} = \frac{\text{Incremento de energía mecánica del fluido}}{\text{Entrada de energía mecánica}} = \frac{\Delta \dot{E}_{mecánica,fluido}}{\dot{W}_{flecha,entrada}} = \frac{\dot{W}_{bomba,u}}{\dot{W}_{bomba}} \quad \text{(2-45)}$$

donde $\Delta \dot{E}_{mecánica,fluido} = \dot{E}_{mecánica,salida} - \dot{E}_{mecánica,entrada}$ es la tasa de incremento en la energía mecánica del fluido, el cual equivale a la **potencia de bombeo útil** $\dot{W}_{bomba,u}$ suministrada al fluido, y

$$\eta_{turbina} = \frac{\text{Salida de energía mecánica}}{\text{Disminución de energía mecánica del fluido}} = \frac{\dot{W}_{flecha,salida}}{|\Delta \dot{E}_{mecánica,fluido}|} = \frac{\dot{W}_{turbina}}{\dot{W}_{turbina,e}} \quad \text{(2-46)}$$

donde $|\Delta \dot{E}_{mecánica,fluido}| = \dot{E}_{mecánica,entrada} - \dot{E}_{mecánica,salida}$ es la tasa de disminución en la energía mecánica del fluido, equivalente a la potencia mecánica extraída del fluido por la turbina $\dot{W}_{turbina,e}$, y se usa el signo de valor absoluto para evitar valores negativos en la eficiencia. En bombas o turbinas, una eficiencia de 100 por ciento indica conversión perfecta entre el trabajo de flecha

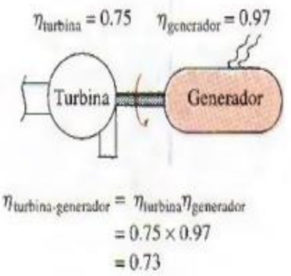


FIGURA 2-59

La eficiencia global de un conjunto de turbina y generador es el producto de las eficiencias de una y otro, y representa la fracción de la energía mecánica del fluido convertida en energía eléctrica.

La eficiencia térmica no debe confundirse con la **eficiencia del motor** y la **eficiencia del generador**, definidas como

Motor:
$$\eta_{motor} = \frac{\text{Salida de potencia mecánica}}{\text{Entrada de potencia eléctrica}} = \frac{\dot{W}_{flecha,salida}}{\dot{W}_{eléctrica,entrada}} \quad \text{(2-47)}$$

y

Generador:
$$\eta_{generador} = \frac{\text{Salida de potencia eléctrica}}{\text{Entrada de potencia mecánica}} = \frac{\dot{W}_{eléctrica,salida}}{\dot{W}_{flecha,entrada}} \quad \text{(2-48)}$$

Una bomba normalmente viene provista de un motor, y una turbina de un generador. Por lo tanto, normalmente el interés está en la **eficiencia combinada** o **global** de las combinaciones entre bomba-motor y turbina-generador (Fig. 2-59), lo cual se define como

$$\eta_{bomba\text{-}motor} = \eta_{bomba}\eta_{motor} = \frac{\dot{W}_{bomba,u}}{\dot{W}_{eléctrica,entrada}} = \frac{\Delta \dot{E}_{mecánica,fluido}}{\dot{W}_{eléctrica,entrada}} \quad \text{(2-49)}$$

y

$$\eta_{turbina\text{-}generador} = \eta_{turbina}\eta_{generador} = \frac{\dot{W}_{eléctrica,salida}}{\dot{W}_{turbina,e}} = \frac{\dot{W}_{eléctrica,salida}}{|\Delta \dot{E}_{mecánica,fluido}|} \quad \text{(2-50)}$$

2. Para producir electricidad en la base de un gran lago se instalará una turbina hidraulica generador donde la profundidad del agua es de 50 m . El agua se suministra a una tasa de 5500 kg / s . si la potencia electrica generada es de 1862 KW y la eficiencia del generador es de 95 % . a) determine la eficiencia global de la turbina generador b) la eficiencia mecanica de la turbina.

Análisis a) Se toma el fondo del lago como el nivel de referencia por conveniencia, por lo que las energías cinética y potencial del agua son igual a cero, mientras el cambio en su energía mecánica por unidad de masa se convierte en

$$e_{\text{mecánica,entrada}} - e_{\text{mecánica,salida}} = gh - 0 = gh = (9.81\ \text{m/s}^2)(50\ \text{m})\left(\frac{1\ \text{kJ/kg}}{1\,000\ \text{m}^2/\text{s}^2}\right)$$
$$= 0.491\ \text{kJ/kg}$$

Entonces la tasa a la que el fluido suministra energía mecánica a la turbina y la eficiencia total son

$$|\Delta \dot{E}_{\text{mecánica,fluido}}| = \dot{m}(e_{\text{mecánica,entrada}} - e_{\text{mecánica,salida}})$$
$$= (5\,000\ \text{kg/s})(0.491\ \text{kJ/kg}) = 2\,455\ \text{kW}$$

$$\eta_{\text{global}} = \eta_{\text{turbina-generador}} = \frac{\dot{W}_{\text{eléctrica-salida}}}{|\Delta \dot{E}_{\text{mecánica,fluido}}|} = \frac{1\,862\ \text{kW}}{2\,455\ \text{kW}} = 0.76$$

b) Conociendo las eficiencias global y del generador, la eficiencia mecánica de la turbina se determina a partir de

$$\eta_{\text{turbina-generador}} = \eta_{\text{turbina}}\eta_{\text{generador}} \rightarrow \eta_{\text{turbina}} = \frac{\eta_{\text{turbina-generador}}}{\eta_{\text{generador}}} = \frac{0.76}{0.95} = 0.80$$

c) La salida de potencia de flecha se determina de la definición de eficiencia mecánica,

$$\dot{W}_{\text{flecha-salida}} = \eta_{\text{turbina}}|\Delta \dot{E}_{\text{mecánica-fluido}}| = (0.80)(2\,455\ \text{kW}) = 1\,964\ \text{kW}$$

Comentario El lago suministra 2 455 kW de energía mecánica a la turbina, la cual convierte 1 964 kW en trabajo de flecha que impulsa al generador, que a su vez produce 1 862 kW de potencia eléctrica. Hay pérdidas relacionadas con cada componente.

3. En un cierto lugar el viento sopla continuamente a 10 m/s . Calcule la energia mecanica del aire por unidad de masa y la potencia que puede generar una turbina eolica , con 60 m de diametro de alabe . suponga una densidad de aire de 1.25 Kg/m^3 .

4. Un chorro de agua sale por una tobera a 60 m/s, con una tasa de flujo de 120 Kg /s , se va a usar para generar electricidad al chocar con las paletas en la periferie de una rueda. Calcule la potencia que puede generar ese chorro.

5. En un cierto lugar hay grandes turbinas eolicas con 100 m de diametro de aspa. Para generar energia electrica , en dicho lugar el viento sopla a 8 m/s (constante). Si se toma como eficiencia global de la turbina como 32 % y la densidad del aire de 1.25 kg /m^3 . Determine la potencia electrica que generan las turbinas.