

Torres energéticas — una nueva tecnología para producir energía renovable y agua desalinizada a bajo coste

Por Dan ZASLAVSKY *

Las tecnologías adecuadas para reemplazar las fuentes convencionales de energía son las que no necesitan un colector de energía solar. Se ha desarrollado una nueva tecnología que utiliza el aire cálido y seco del desierto como fuente de energía y cuyo coste previsto de producción de electricidad es menor que el del carbón y el gas natural. Además del coste de producción de electricidad hay otros beneficios adicionales.

Este artículo es un resumen, preparado por el autor, de su conferencia como invitado ante la 53.ª sesión del Consejo Ejecutivo de la OMM (junio de 2001)

52

Los principios de las torres energéticas

El principio energético es muy sencillo. Se levanta una chimenea alta de gran diámetro. Se rocía agua en la parte superior. Parte del agua se evaporará y enfriará el aire. El aire enfriado es más denso que el aire del exterior de la chimenea. Descenderá y saldrá a través de las aberturas de la parte inferior (véase la Figura 1) En su camino hacia fuera moverá las turbinas y los generadores que producirán electricidad.

Se ha resuelto la termodinámica básica. Se encontró que la eficiencia ζ de la transformación del calor del aire en trabajo mecánico potencial era proporcional a la siguiente expresión:

$$\zeta = C \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max}}, \quad (1)$$

donde:

T_{\max} [K] = la temperatura del aire exterior cerca de la base de la chimenea;

T_{\min} [K] = la temperatura del aire exterior cerca de la cima de la chimenea;

C = casi una constante, con un valor comprendido entre 0,7 y 0,8.

Bajo las condiciones de aire descendente, la relación de la parte derecha de la ecuación 1 es adiabática seca y aproximadamente igual a HC / 30 000, donde HC

es la altura efectiva de la chimenea [m]. Esta eficiencia es muy pequeña. Para una altura de 1 200 m, HC, el rendimiento HC es $(0,7 \times 12/300) = 2,8\%$, sin embargo, hay una gran abundancia de aire caliente.

Observemos primero que el rendimiento neto observable N [W] se puede expresar como sigue:

$$N = \zeta A_c \frac{-2}{3} E_{\text{net}} \sqrt{1,5} \sqrt{\frac{1}{F \bar{n}}}, \quad (2)$$

donde:

ζ [-] = la eficiencia del turbo-generador (alrededor del 0,85);

A_c [m²] = el área de la sección transversal de la chimenea;

F [-] = factor de pérdidas de energía ($E_{\text{loss}} = F \frac{\bar{n} v^2}{2}$);

\bar{n} [kg/m³] = densidad media del aire;

V [m/s] = velocidad de la corriente descendente de aire,

$$E_{\text{net}} = E_c - E_p + E_r, \quad (3)$$

donde:

E_c [Pa] = la presión extra de la columna de aire bajo condiciones estáticas (p. ej., debido al enfriamiento de 12°C en 1 200 m, $E_c = 527$ Pa);

E_p [Pa] = la energía de bombeo, incluido el producto del agua pulverizada por m³ de aire, por la altura del agua, incluidas las diferencias de elevación, la altura de la chimenea, la altura del rociado y las pérdidas por altura. Para el ejemplo anterior, suponiendo 8 g de agua por m³ de aire y una altura total de 1 350 m, se obtiene $E_p = 108$ Pa;

E_r [Pa] = la energía mecánica recuperable debido al momento del agua rociada, al peso del agua no evaporada de la columna de aire y a los desechos finales de agua salada. E_r es esencial para obtener resultados óptimos. En el ejemplo anterior, una cifra característica de E_r era 50 Pa. Sumado al ejemplo anterior, $E_{\text{net}} = 469$ Pa. Con tal de que E_{net} sea positiva, se puede obtener un rendimiento de electricidad neto.

* Profesor emérito del Instituto de Tecnología de Israel (Technion).

Una interesante prueba general demostró que el rendimiento neto óptimo obtenible se da cuando se gasta exactamente $1/3 E_{\text{net}}$ en pérdidas de energía. A continuación, se presenta una división típica de la energía mecánica bajo las condiciones climáticas y la topografía del Valle de Arava entre Eilat, en Israel, y Aqaba, en Jordania.

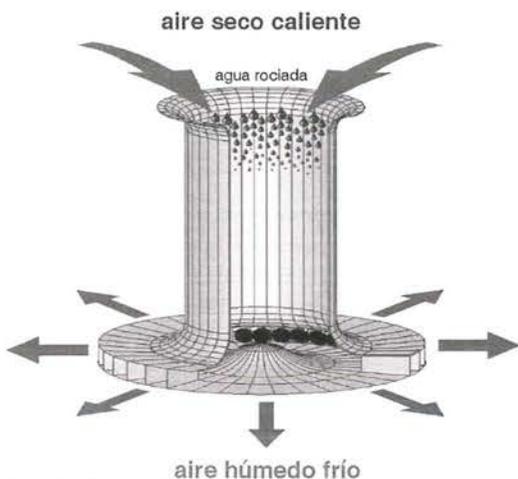


Figura 1 — El principio de la torre energética

Rendimiento típico de las torres energéticas

La Figura 3 muestra un rendimiento típico de una torre energética en función de la proporción de agua marítima rociada. La curva inferior de la potencia neta obtenible tiene un valor óptimo alrededor de 8 g de agua por kg de aire. La curva superior de la potencia total es de gran importancia porque puede utilizarse para obtener más electricidad a las horas de alta demanda de electricidad simplemente almacenando agua en zonas altas durante las horas de baja deman-

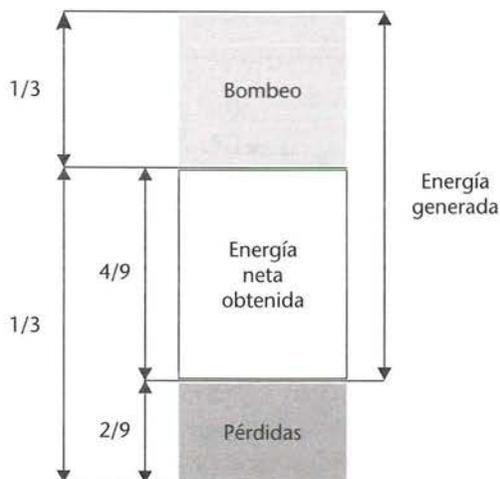


Figura 2 — Componentes de la energía mecánica en la columna de aire enfriado

da de electricidad. En el campo de la energía, este proceso se llama "almacenamiento por bombeo". Debería observarse que una parte importante de la inversión en el uso de combustible se requiere, normalmente, para satisfacer estos picos de demanda. La capacidad intrínseca de las torres energéticas para realizar el almacenamiento por bombeo es de un valor económico extremadamente alto.

Las Figuras 4 y 5 muestran los costes de producción de electricidad calculados para un diseño básico dado con tasas de descuento del 5 y del 10 por ciento en la parte meridional del Valle de Arava.

De forma interesante, el coste mínimo se encuentra sobre un amplio rango de alturas y de diámetros de torre. Sin embargo, incluso con dimensiones relativamente más pequeñas, p. ej. 400×200 m, el coste de producción de electricidad es de 4 y 6 centavos por kWh, para tasas de descuento del 5 y del 10 por ciento respectivamente.

En la Tabla I se comparan los costes de producción de electricidad a partir del carbón y del gas natural previstos para los años 2005 y 2010 utilizando la información actual de unos 18 países desarrollados de la OCDE y de otros seis países, incluidos India y China. [1]

Es importante que el coste de producción de electricidad de las torres energéticas sea menor que los valores promedio característicos de los dos "caballos de tiro de la industria" —el gas y el carbón—.

El coste de la electricidad de las torres energéticas es incluso menor que el límite inferior de los costes del carbón y del gas con una tasa de interés del 5 por ciento. Con una tasa de interés del 10 por ciento, sólo el límite inferior de los costes del gas supera a los de las torres energéticas.

Beneficios adicionales

Los beneficios adicionales se pueden dividir en tres grupos

Grupo I—Reemplazar otros gastos y evitar multas

1. La capacidad intrínseca del almacenamiento por bombeo que, bajo las condiciones israelíes de la red, ascendió a, al menos, un ingreso de 1,5 centavos por kWh.
2. Eliminar las tasas de combustible, las multas de CO_2 o los bonos de energía limpia (probablemente, entre 1 y 2 centavos)

Se ha estimado que, en la mayor parte de los países, los puntos 1 y 2 sumarán entre 2 y 3 centavos por kWh a los beneficios netos.

Grupo II—Otros productos asociados con las torres energéticas

3. Desalinización a mitad de precio del agua marítima debido a la menor inversión y a los gastos

energéticos: se estimó el ahorro en la desalinización del agua marítima en más del 45 por ciento y la contribución a las torres energéticas es superior a 0,6 centavos por kWh.

4. Eliminación de la salinidad de importantes proyectos de regadío: la aplicación puede darse en sistemas grandes tales como el río Colorado (en EE.UU.), el río Murray Darling (en Australia), el río Orange (en Sudáfrica) o el Canal Indira Gandhi (en India). El beneficio por las torres energéticas es de entre 1 y 2 centavos por kWh.
5. Piscicultura de peces marinos a gran escala, con ganancias para las torres energéticas de entre 0,25 y 1,25 centavos por kWh.
6. Enfriamiento de centrales térmicas, con beneficios para las torres energéticas superiores a 4 centavos por kWh.
7. Enfriamiento previo de aire para turbinas de gas con ahorros superiores al 10 por ciento en la inversión de la turbina de gas (alrededor de un 1 por ciento más de rendimiento por 1°C de enfriamiento previo del aire).

54

Grupo III—Beneficios debidos a factores macroeconómicos con ganancias para las torres energéticas superiores a 1/3 en la inversión o entre 0,8 y 2 centavos por kWh

8. Balance de pago mejorado.
9. Ausencia de mayores precios de combustible.
10. Ausencia de fluctuación en los precios.
11. Ausencia de dependencia y gastos estratégicos.
12. Ausencia de daños medioambientales locales.
13. Cumplimiento de los requisitos del Protocolo de Kyoto para reducir la emisión de gases de efecto invernadero al nivel de 1990.

Los Grupos II y III pueden sumar a las torres ingresos adicionales de varios centavos por kWh —de todas formas, no son realistas en todos los casos—.

Análisis y validación

El Ministerio Israelí de Infraestructuras Nacionales y la Corporación Eléctrica Israelí siguieron de cerca el desarrollo del proyecto.

La comparación exacta entre la economía del carbón y del gas, por una parte, y las torres energéticas por la otra es un tanto más complicada y larga. Sin embargo, la imagen bá-

sica es bastante clara y la conclusión básica sigue siendo la misma:

- Todos los principios físicos se probaron y se volvieron a probar más allá de toda duda.
- Se puede realizar todo el proyecto mediante tecnologías conocidas y comprobadas.
- Hay un amplio margen económico positivo que justifica el avance del proyecto hacia la comercialización.

El Ministerio Indio de Ciencia y Tecnología mostró interés y, después de recibir material sobre el proyecto, preparó a unos 100 expertos para que lo analizaran, cubriendo todos los subsistemas y procesos posibles. Se invitó a India a una delegación israelí, acompañada del autor de este artículo, y se reunió con casi 70 de estos expertos. Se hicieron preguntas; se realizó un estudio; y se mantuvieron conversaciones. Unos pocos meses después, el Ministerio indio se dirigió al gobierno israelí para cooperar con Israel en la comercialización del proyecto. Se dio una respuesta positiva. Se está formando un comité de dirección mutuo para llevar a cabo los pasos posteriores.

Potencial del proyecto

La fuente de energía es principalmente la circulación de la celda de Hadley que eleva aire caliente en los cinturones ecuatoriales, a menudo con precipitaciones. El aire se enfría a un ritmo menor de 1 K por cada 100 m y cercano a 0,5 K por cada 100 m. El aire se transmite después hacia el norte y hacia el sur y vuelve a bajar a la superficie de la Tierra entre 15°N y 35°S en dos cinturones de tierra árida y de alta presión. Al descender, el aire se calienta a casi 1 K por cada 100 m. Desde ahí, el aire regresa al ecuador, a baja presión, ganando humedad de ese modo.

Se realizó una evaluación basta, suponiendo alrededor de un 1 por ciento de eficiencia de la transformación total en electricidad, para estimar la cantidad

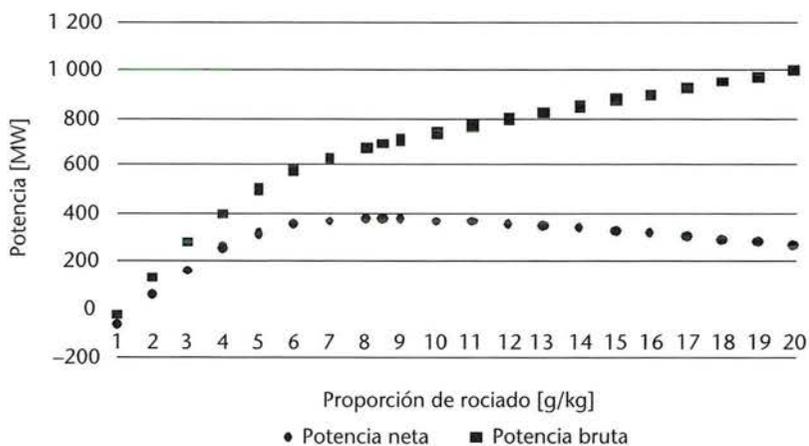


Figura 3 — Potencia bruta y potencia neta en función de la proporción de rociado en gramos de agua por kg de aire

potencial de electricidad neta obtenible sobre la tierra. Se encontró que era suficiente para entre 40 000 y 80 000 millones de personas con un nivel de consumo de electricidad similar al de Europa occidental. Podrían erigirse torres energéticas en unos 40 países. Con líneas de transmisión modernas, se podría enviar electricidad a un coste relativamente bajo a un radio de 3 000 km. De esta forma, se podría suministrar electricidad a partir de esta fuente a alrededor del 80 por ciento de la superficie de la Tierra.

Como principio general, la tecnología de las torres energéticas toma el inconveniente del desierto —su aire cálido y seco— y lo transforma en un activo.

Por ejemplo, África del Norte tiene el potencial de ofrecer a todo Europa electricidad limpia y renovable. Además, se estima que podría desalinizarse agua marítima con una reducción del coste de alrededor del 45 por ciento —o 38 centavos por metro cúbico—. El volumen total de agua desalinizada podría alcanzar entre 10 y 20 veces el río Nilo. Por lo tanto, África del Norte podría convertirse en el almacén de alimento y de energía para Europa.

Hace poco se realizó otra estimación reciente del potencial teórico mundial. El método consistió en calcular la producción de torres energéticas de 1 200 m de altitud y 400 m de diámetro utilizando datos de satélites sobre humedad, temperatura y viento a 1 200 m de elevación sobre el suelo; se concedía a cada torre 400 km² de cielo abierto para que pudieran importar aire caliente suficiente mediante la circulación de la celda de Hadley. El resultado fue, teóricamente, de 88 600 torres de entre 200 MW y 600 MW de producción neta promedio para cada torre ofreciendo $230\,000 \times 10^9$ kWh por año. Dividiendo por 5 000 kWh por persona para la población mundial, se demuestra la posibilidad teórica de ofrecer electricidad al nivel de consumo de Europa occidental para 46 000 millones de personas.

Coste de la electricidad en función de la altura de la torre para distintos diámetros
1-5% n-30 años

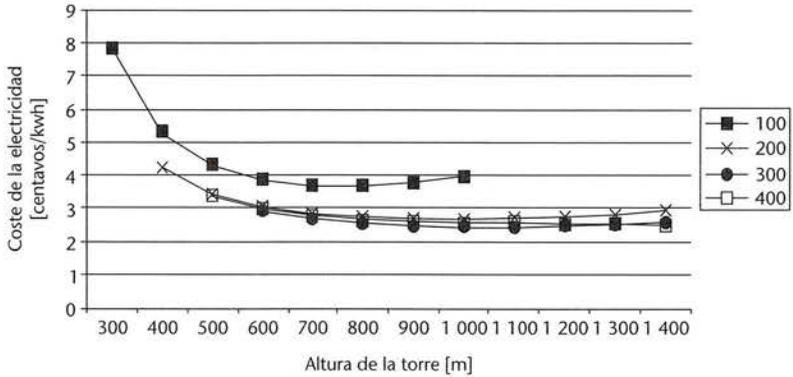


Figura 4 — Coste de la producción de electricidad a partir de las torres energéticas con una tasa de descuento del 5 por ciento

Coste de la electricidad en función de la altura de la torre para distintos diámetros
1-10% n-30 años

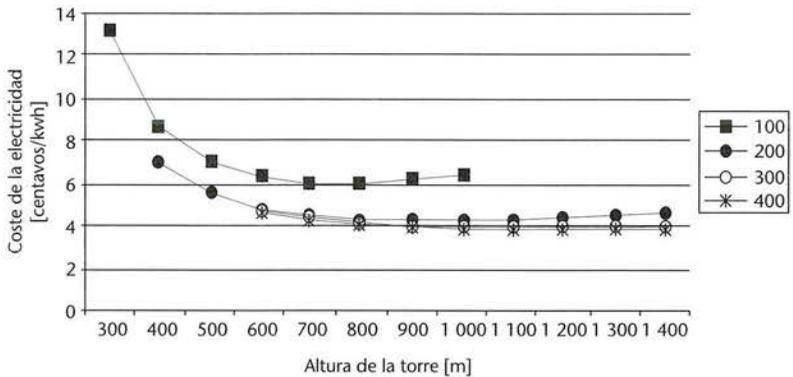


Figura 5 — Coste de la producción de electricidad a partir de las torres energéticas con una tasa de descuento del 10 por ciento

El régimen climático

El fenómeno climático que hace posible todo el proyecto son las zonas áridas con aire descendente y la mayor parte del desarrollo del proyecto entra en el terreno de la física del clima y de los efectos climáticos.

Las torres energéticas tienen un proceso de realización positiva interesante. Cuando el aire está más cálido y más seco, y cuando aumenta la necesidad de bombear agua y de enfriar el aire, aumenta también la capacidad de producción de la torre.

Hemos identificado 10 problemas medioambientales implicados en la construcción de torres energéticas. Uno de estos es la emisión de aire frío y húmedo. Parece que, en el peor de los casos, esta emisión intensifica la circulación de la celda de Hadley, y tiene también algunos efectos positivos en las condiciones climáticas locales.

Otro problema medioambiental que se produce es la emisión de agua salada finamente rociada. Si podemos producir entre 5 y 6 kWh por cada m³ de agua marítima pulverizada, la sal rociada asciende a entre

TABLA I

Coste de la generación de electricidad (centavos/kWh) para estaciones disponibles comercialmente, años 2005-2010 (en dólares EE.UU. de 1996) (factor de carga del 75%, 30 años)

Tecnología reemplazada	Serie extrema de coste		Costes promedio representativos	
	Tasa de descuento del 5%	Tasa de descuento del 10%	Tasa de descuento del 5%	Tasa de descuento del 10%
Carbón	2,48-5,64	3,74-7,61	4,065	4,99
Gas natural ciclo combinado	2,33-7,91	2,36-8,44	3,98	4,47
Torres energéticas	—	—	2,47	3,88

56

0,67 y 0,8 kg de sal por kWh. Una manera de afrontar este problema es mediante la precipitación temprana de la salmuera rociada. Esto se obtiene intensificando la colisión entre las gotitas, provocando su coalescencia y eliminando los tamaños de gotita inferiores a 300 ó 400 µm.

Los efectos medioambientales producidos por las torres de ruido, visibilidad, vertido de agua salada y sus consecuencias sobre el tráfico aéreo y sobre las aves, parecen menores comparados con los problemas medioambientales que se eliminan. Además de evitar la combustión de carburante, las torres ayudan a resolver los problemas de escasez y salinidad del agua. Al ayudar a la piscicultura de peces marinos, las torres también ayudan en otro problema medioambiental importante: es interesante observar que los peces requieren alrededor del 40 por ciento de la comida que necesita el ganado: otra forma importante de ahorrar una gran cantidad de agua.

Conclusiones

La tecnología de las torres energéticas es la primera que produce electricidad de fuentes renovables para superar a los caballos de tiro económicos del carbón y del gas. Las únicas tecnologías que compiten con las torres energéticas son la hidroelectricidad, la energía eólica y la biomasa. Todas están dentro del rango económico justificado por el principio del desarrollo sostenible. Los proyectos térmicos solares ya se están aproximando a estos límites, pero no del todo. Todavía son entre 3 y 5 veces más caros.

Las torres energéticas podrían suministrar todo el aumento anticipado de la demanda de electricidad.

Referencia

- [1] Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos y Agencia Internacional de la Energía, 1998: *Costes previstos de generación de electricidad —actualización de 1998.*

Aspectos climatológicos del Estado de Qatar

Por Ali Hamed AL-MULLA ¹, Mohammed Hassan AL-SULAITI ² y P. Govinda RAO ³

Introducción

El estudio de los datos meteorológicos recogidos durante un período de tiempo suficientemente largo en una región demuestra diversos aspectos de la variabilidad climática. Las observaciones sistemáticas en muchas partes de los países del Consejo de Coopera-

ción del Golfo (CCG) empezaron sólo a mediados de los años cincuenta y principios de los sesenta. Los estudios meteorológicos de la región comenzaron con la exploración del petróleo y del gas natural. En esta era de interacciones enormemente complicadas y sutiles entre los humanos y su entorno, pequeñas variaciones climáticas pueden tener impactos de largo alcance en el bienestar humano. La región del Golfo es más frágil a este respecto debido a su naturaleza árida. El estudio de diversos aspectos climáticos de Qatar proporciona, por tanto, información útil e interesante sobre el Estado, y constituye un estudio de caso para la región del CCG. El Estado de Qatar es una península que ocupa

¹ Director Adjunto de la Autoridad de Aviación Civil y Representante Permanente de Qatar ante la OMM. Correo electrónico: aliali96@qatar.net.qa.

² Jefe de la Oficina de Predicción del Servicio Meteorológico.

³ Funcionario científico del Servicio Meteorológico.