Año internacional de la
Energía Sostenible
para todos

La energía potencial del agua

Francisco Alcrudo
LITEC (CSIC) – Universidad de Zaragoza

Una central de ciclo combinado, la más eficiente de las centrales térmicas, tiene un rendimiento cercano al 60%. Es decir, de la energía calorífica del combustible, en general gas natural, el 60% se transforma en energía eléctrica para la red, y el resto se disipa calentando el medio (la atmósfera o una corriente de agua). Frente a ésto, el rendimiento de una gran turbina hidráulica excede de 90%. El 10% restante calienta ligeramente (décimas de grado a lo sumo) el flujo de agua que la atraviesa. Y existe una ventaja adicional: la energía obtenida del fluir del agua se recarga automáticamente cuando llueve.

El ciclo hidrológico es un gigantesco motor termodinámico que transforma la energía procedente del sol en energía mecánica. Cada año 500.000 km^3 de agua (unas 9.000 veces la capacidad de los embalses de españoles, 55 km^3) se evaporan de la superficie de la tierra y los océanos para volver a caer en alguna forma de precipitación. Poco más de una quinta parte, unos 105.000 km^3 caen sobre tierra firme. El resto lo hace sobre los océanos. Un gran porcentaje del agua que cae sobre tierra firme se evapora, pero el resto, aproximadamente 35.000 km^3, fluye a través de los ríos y acuíferos camino del mar. Tomando la elevación media de la tierra firme como 840 m, la energía potencial ($E_\rho = \rho \cdot V \cdot g \cdot h$) que posee dicha masa de agua sería de unos $3 \cdot 10^{20}$ Julios (J), es decir, el equivalente a 260 veces el consumo anual de electricidad en España o casi cuatro veces el de todo el mundo. Desgraciadamente, sólo un pequeño porcentaje de toda esa energía puede aprovecharse.

La producción mundial anual de energía hidroeléctrica es de $1.2 \cdot 10^{19}$ J, lo que representa el 4% de la energía potencial del agua superficial estimada arriba. Con ello se cubre entre el 16% y el 20% de la energía eléctrica anualmente consumida en el mundo. De forma global representa una contribución nada despreciable y debe contarse con ella para garantizar el desarrollo humano. Algunos países consumen casi exclusivamente energía eléctrica procedente de saltos hidráulicos, como es el caso de Noruega (más del 98%), Brasil (más del 85%) o Venezuela (69%). Sin embargo, existe un límite a su aprovechamiento, ligado a la utilización de la superficie terrestre y a los otros usos del agua. Diferentes estudios indican que sería técnicamente posible producir hasta $5 \cdot 10^{19}$ J anuales (17% de la energía potencial disponible) aunque sólo parece económicamente viable llegar hasta $3 \cdot 10^{19}$ J (10%) ya que alcanzar el límite técnico supondría generar electricidad a un coste demasiado elevado. El aumento del precio de la energía puede incrementar el límite económico al hacer viables explotaciones que a día de hoy pueden no serlo.

Texto publicado en la página web **www.energia2012.es**

GOBIERNO DE ESPAÑA · MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD · CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas · FECYT Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología · 2012 Año Internacional de la Energía Sostenible para todos

La energía hidroeléctrica se utilizó por primera vez para iluminar la mansión de un ingeniero e industrial británico, William George Armstrong. La turbina hidráulica empleada se venía utilizando desde 1868 para mover algunos ingenios de la casa: una lavadora y un ascensor. En 1870 se le acopló una dinamo Siemens para producir electricidad y en 1878 se alimentó con ella una lámpara de arco que finalmente fue sustituida por bombillas incandescentes en 1880.

Sin embargo, la primera planta hidroeléctrica industrial fue la de Schoelkopf, en el río Niágara, que comenzó a producir energía el año 1881 para abastecer primero su propia industria y más tarde una calle de la ciudad de Niágara Falls (NY, EEUU). Es interesante mencionar que la generación eléctrica se realizaba en corriente continua. Hacia 1904 se construyó allí una segunda central que generaba 34.000 caballos de vapor, unos 25 MW.

Desde entonces, el desarrollo de la energía hidroeléctrica ha tenido un crecimiento espectacular, alcanzando en la actualidad más de 1.000 GW de potencia instalada. Es decir, el equivalente a 1.000 reactores nucleares tipo. Desafortunadamente, las plantas hidroeléctricas no funcionan todas las horas del año a su potencia de diseño. El factor de capacidad de una planta mide la relación entre la energía efectivamente producida en un año y la que se hubiese producido funcionando las 8.760 horas del mismo a la potencia nominal. El factor de capacidad global mundial es algo inferior al 40% (las centrales nucleares ofrecen un factor de capacidad cercano a 1) pero varía fuertemente entre unas centrales y otras y, para una misma central, depende también de la climatología anual.

Los aprovechamientos hidráulicos actuales son extraordinariamente diversos, y las tecnologías desarrolladas para transformar la energía potencial del agua en electricidad también. Las centrales hidroeléctricas pueden clasificarse atendiendo a diversos criterios. El más evidente es el tamaño medido por la potencia instalada, pero la altura del salto, su caudal o la presencia o no de embalse son elementos definitorios de una central.

Existen macro centrales con potencias instaladas de varios GW como la planta alimentada por la presa de las Tres Gargantas en el río Yangtze en China, cuya capacidad es algo superior a 20 GW repartida entre 29 grandes turbinas. Produce $2.9 \cdot 10^{17}$ J anualmente. El complejo de Itaipú, en el río Paraná, entre Brasil y Paraguay, produce $3.3 \cdot 10^{17}$ J, a pesar de tener una potencia instalada notablemente inferior, 14 GW (20 turbinas de 700 MW) gracias a su mayor factor de capacidad.

El salto de Valdeávila, en el río Duero, con 1.14 GW instalados, es la mayor central hidroeléctrica española. En total, la potencia instalada en España se acerca a los 17 GW, produciendo $1.5 \cdot 10^{17}$ J, lo que arroja un factor de capacidad del 28.4%, considerablemente bajo y atribuible en gran parte a la climatología del país: debido a la existencia de estaciones húmedas y secas, muchos saltos están dimensionados para aprovechar caudales superiores al medio, aunque en realidad operen durante bastante tiempo a caudales inferiores a éste.

Texto publicado en la página web **www.energia2012.es**

GOBIERNO DE ESPAÑA · MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD · CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas · FECYT Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología · 2012 Año Internacional de la Energía Sostenible para Todos

El equipo hidromecánico (turbinas) y eléctrico (alternadores) instalado en grandes centrales es de diseño específico para cada proyecto concreto y es objeto de estudios y ensayos muy rigurosos. El objetivo es garantizar la fiabilidad y el rendimiento para maximizar la producción eléctrica y, por tanto, el beneficio económico del proyecto. En estas potencias es frecuente alcanzar rendimientos de turbina y alternador superiores al 90% y al 95 % respectivamente.

Frente a las grandes centrales con múltiples turbina de gran potencia están los pequeños aprovechamientos mini hidráulicos, cuya potencia es inferior a 10MW (en los EEUU se consideran minicentrales hasta 30MW). En España, más del 10% de la energía hidroeléctrica es producida en este tipo centrales. El equipo hidromecánico puede ser de diseño específico o de fabricación seriada al menos de algunos elementos.

Existen, además, saltos en el rango de kWs, generalmente para el abastecimiento de una pequeña comunidad en lugares aislados de la red. Son muy utilizados en países en vías de desarrollo. En ocasiones están conectados a la red. Se habla de Micro plantas hidroeléctricas las que están por debajo de 100kW y de Pico plantas hasta los 5kW. En estos casos, la turbina y el alternador se suministran como un bloque unitario cerrado de fabricación en serie, de manera que sólo se requiere una pequeña obra civil para su instalación. En instalaciones aisladas se suelen combinar con paneles fotovoltaicos para complementar las variaciones estacionales del recurso solar e hidráulico. Como curiosidad, merece la pena comentar que existe un programa de equipamientos micro hidroeléctricos para comunidades aisladas basado en la utilización de bombas centrífugas de serie operando en sentido inverso (rotación y flujo) como turbinas. Este sistema, aun cuando ofrece un rendimiento bajo (inferior al 70%), presenta un coste muy reducido, debido al empleo de componentes baratos disponibles en el mercado, lo que lo hace especialmente atractivo para países en desarrollo.

Figura 1.
Rodete doble de una Turbina Pelton.

Texto publicado en la página web **www.energia2012.es**

En relación a la altura del salto existen aprovechamientos con desniveles que van desde un metro a más de 1000. En general, los saltos más bajos corresponden a centrales de agua fluyente; es decir, las que no disponen de embalse. Los de gran salto se localizan en zonas montañosas y están equipados con turbinas de diseño especial, llamadas turbinas Pelton. En este tipo de máquinas, la energía potencial del agua es primero convertida en energía cinética, al pasar por una tobera o boquilla. El chorro a alta velocidad, hasta más de 100 m/s impacta contra los álabes con forma de cuchara en la periferia de la rueda haciéndola girar. Las dimensiones del chorro y de la rueda están limitadas por la resistencia del material de construcción, usualmente acero, de manera que la potencia máxima por máquina rara vez supera los 200 MW. Cuando la potencia del salto es mayor el caudal se divide entre varias máquinas, ya que el caudal unitario máximo es de unos 70 m^3/s en las más grandes. El agua es conducida hasta la turbina por medio de una tubería de acero de alta presión que suele construirse a la vista y resulta muy aparente en las laderas de las montañas.

En los saltos más bajos se utilizan turbinas de tipo hélice. Se llaman así porque el rotor es similar a la hélice de un barco. Con este tipo de máquinas se consigue cubrir el rango de saltos que va desde un metro hasta casi 80. Existen turbinas hélice para saltos de incluso medio metro en aprovechamientos micro hidráulicos. Las turbinas de tipo hélice se adaptan bien a variaciones grandes de caudal y por ello se utilizan en saltos de agua fluyente; es decir, aquéllos que se construyen remansando una corriente mediante un azud pero sin formar un embalse con capacidad de almacenamiento. En estas circunstancias, el caudal turbinable es el de la corriente que puede sufrir grandes fluctuaciones.

Para adaptarse a las variaciones de caudal y de altura que puedan producirse, las turbinas de tipo hélice disponen de palas orientables. La realización más sofisticada, que es la que habitualmente equipa las centrales más grandes de poca altura de salto, es la turbina Kaplan, desarrollada a principios del siglo XX por el profesor austríaco Viktor Kaplan. El agua entra en la máquina a través de un anillo de álabes orientables llamado distribuidor. Esto permite ajustar el ángulo de incidencia de la corriente sobre el rodete, que a su vez también dispone de palas orientables. Así se consigue un rendimiento elevado para un rango amplio de caudales y saltos. Las turbinas Kaplan ofrecen potencias unitarias de hasta 120 MW.

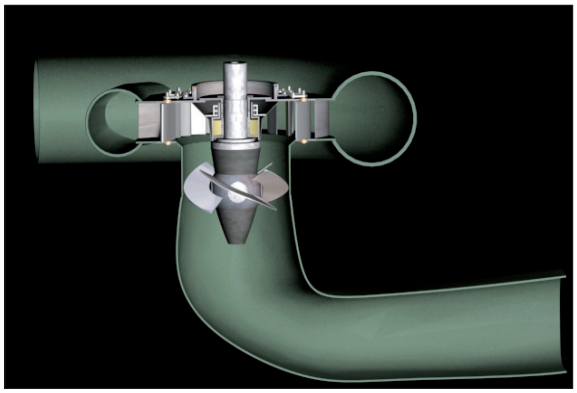

Figura 2.
Esquema de una turbina de Kaplan.

Texto publicado en la página web **www.energia2012.es**

Una variante especial del diseño Kaplan es la conocida como turbina Bulbo, por la forma de la carcasa sumergida que aloja el alternador. Se desarrollaron a mitad del siglo XX para plantas mareomotrices (en particular la del estuario de La Rance, en Francia). Son máquinas muy compactas, con doble regulación (distribuidor y palas del rodete) para saltos de muy pocos metros dispuestas con el eje horizontal.

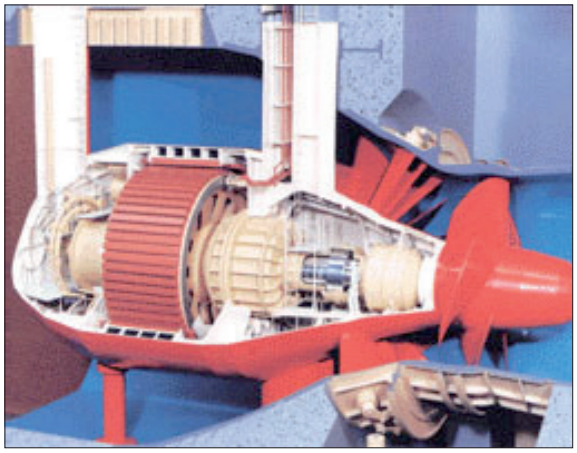

Figura 3.
Corte de un modelo de turbina Bulbo.

Los saltos intermedios son cubiertos por la turbina Francis. En la práctica, la evolución de este diseño alcanza a cubrir un rango de saltos que va desde los 20 hasta los 700 metros, admitiendo caudales entre 1 y 900 m^3/s. Esto la convierte en la reina de las turbinas hidráulicas con potencias unitarias desde 0.5 hasta 800 MW. Básicamente, la turbina Francis puede considerarse como una bomba centrífuga operando en sentido inverso. Las turbinas Francis que operan con gran altura de salto son las que más se parecen a una bomba. Las diseñadas para saltos más bajos pierden dicha similitud. La regulación de la potencia se realiza variando la orientación de los álabes del distribuidor.

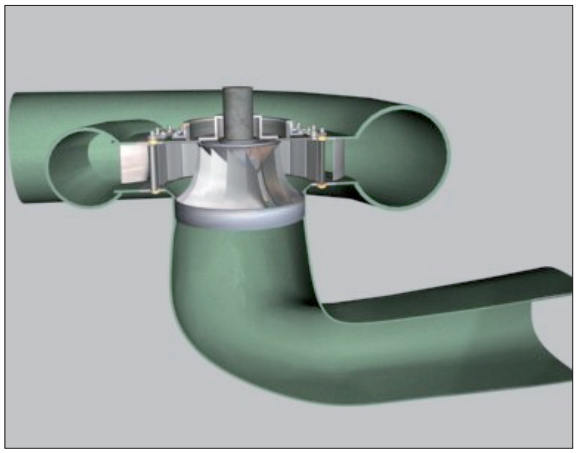

Figura 4.
Turbina Francis.

En algunos casos, además, una central hidroeléctrica puede utilizarse como almacén de energía, bombeando agua hacia el embalse en los períodos de poca demanda de electricidad, p.ej. durante la noche, para turbinarla después en períodos punta. En la actualidad, existen proyectos hidráulicos expresamente con ese uso, y se denominan centrales reversibles o de bombeo. Son particularmente útiles en combinación con esquemas eólicos. Dado el carácter intermitente de la energía eólica, su acoplamiento con una central hidráulica reversible es muy beneficioso. España, que tiene una potencia eólica instalada de unos 20 GW con una previsión de 36 GW en 2020, confía en las centrales reversibles para integrar su producción eólica, y existen varias de ellas en construcción. Las primeras centrales reversibles utilizaban electrobombas para elevar el agua al embalse superior durante los períodos valle. Actualmente, es frecuente la instalación de bombas-turbina, que son máquinas que pueden operar con un alto rendimiento en ambos sentidos de rotación y flujo, aunque siempre es varios puntos inferior en el modo bomba. Las bombas-turbina corresponden a un diseño de tipo Francis. El total de potencia instalada en el mundo en centrales de bombeo es de 95 GW con algunas plantas de potencia próxima a 3 GW. En España se cuenta con casi 4.9 GW en centrales reversibles. De ellos, casi 2.5 GW corresponden a centrales dedicadas exclusivamente a bombeo. La previsión es alcanzar 3.2 GW en 2020 y 8.1 GW en un futuro más lejano.

La principal ventaja de la energía hidroeléctrica es su origen 100% renovable, característica que sólo comparten la energía eólica, solar y mareo o undimotriz. Su explotación no genera gases de efecto invernadero, aunque los primeros años, tras la construcción de un embalse, se liberan a la atmósfera considerables cantidades de CO_2 y de CH_4, producto de la descomposición de la materia orgánica (madera y vegetales) en el vaso del embalse. Las centrales hidroeléctricas son las que menor tiempo de respuesta tienen a la hora de hacer frente a un incremento de la demanda, lo que les da un valor enorme desde el punto de vista de la regulación de la red eléctrica. Algunas centrales se mantienen en funcionando al nivel de potencia mínima con el fin de estar sincronizadas con la frecuencia de la red de manera constante. Ante un aumento de la demanda eléctrica pueden incrementar su nivel de potencia casi instantáneamente para garantizar el suministro. Se las denomina Potencia Rodante de la red.

Como desventajas, se debe citar la superficie inundada por los embalses y la perturbación de los ríos y las cuencas afectadas. La energía hidroeléctrica tiene implicaciones sociales que incluyen desplazamientos de la población y cambios en los medios y formas de vida de las personas. También existen impactos ambientales considerables, consecuencia de los cambios en régimen hidráulico de los ríos. Todas estas afecciones pueden ser minimizadas, pero no se pueden evitar totalmente. Por otra parte, en muchos casos, el motivo de la construcción de los embalses no es estrictamente la generación eléctrica, sino garantizar el almacenamiento y abastecimiento de agua para uso humano, la agricultura y la industria. La historia reciente ha demostrado que el balance de más de un siglo de energía hidroeléctrica es netamente positivo para la humanidad.

Texto publicado en la página web **www.energia2012.es**

GOBIERNO DE ESPAÑA · MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD · CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas · FECYT Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología · 2012 Año Internacional de la Energía Sostenible para todos