

De la rueda hidráulica a las estaciones hidroeléctricas

INTRODUCCIÓN

Desde hace siglos, la humanidad ha venido realizando el aprovechamiento energético de los recursos hidráulicos. Para ello el hombre ha inventado distintos aparatos que han ido permitiendo la utilización de la energía hidráulica en mayor cantidad y con mejor calidad. Durante casi dos mil años las ruedas hidráulicas fueron perfeccionándose y mejorando su eficiencia, pero la carga aprovechable por estas máquinas estaba restringida por su diámetro, que tenía un límite desde el punto de vista mecánico. Se imponía la creación de una máquina que pudiera utilizar grandes cargas y producir potencias mayores. Fue así que a principios del siglo XIX surgieron las primeras turbinas hidráulicas dignas de ese nombre.

Las ruedas hidráulicas primero, y las turbinas después, hasta fines del siglo XIX, suministraban potencia mecánica para aplicarla directamente, ya sea en una pequeña instalación o en las industrias, pero con la invención del generador eléctrico en 1880 y la popularización de la electricidad como fuente de energía, comienza la historia de los aprovechamientos hidroeléctricos. Hoy en día, con las posibilidades de transmitir la electricidad a grandes distancias, ha sido corriente la construcción de grandes centrales hidroeléctricas en los países que disponen de abundantes recursos hidroenergéticos.

El presente trabajo tiene el objetivo de ilustrar brevemente el desarrollo histórico de las máquinas que se han utilizado para aprovechar la energía hidráulica, presentar una visión panorámica de la utilización de esa forma de energía y destacar su importancia como fuente renovable y no contaminante.

CARACTERÍSTICAS GENERALES

DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA

La energía hidráulica es un recurso limitado, pero al ser renovable en ciclos más o menos anuales, no se agota

Resumen / Abstract

Se presenta el desarrollo histórico de la utilización de la energía hidráulica, la que ha venido aprovechándose por el hombre, desde hace poco más de dos mil años, transformándola en energía mecánica, primero, con las llamadas ruedas hidráulicas y a partir del siglo XIX, con las turbinas hidráulicas. Se destacan las características generales de este tipo de energía renovable y las ventajas económicas y ambientales de su utilización. Se estudian brevemente los distintos tipos de ruedas y turbinas hidráulicas y los principios de su funcionamiento. Se ve como, con la invención del generador eléctrico en 1880 y la popularización de la electricidad como fuente de energía, surgen naturalmente los aprovechamientos hidroeléctricos y se explica como la posibilidad de transmitir la electricidad a grandes distancias ha dado lugar a la construcción de grandes centrales hidroeléctricas en los países que tienen abundantes recursos hidroenergéticos. Se destaca, como en la actualidad han adquirido una gran importancia los pequeños aprovechamientos, no solamente en lugares aislados y la tendencia a ejecutar proyectos medianos, ya que se pueden proyectar y construir en menos tiempo y financiarse más fácilmente y son menos susceptibles de crear problemas ambientales. Finalmente, se destaca la necesidad de priorizar la utilización de este tipo de energía en el nuevo siglo XXI.

Palabras clave: ruedas hidráulicas; energía hidráulica; turbinas hidráulicas; estaciones hidroeléctricas; energía renovable.

The historical development of the utilization by mankind of the hydraulic energy is presented. Since a little more than 2 000 years, this type of energy has been transformed into mechanical energy, first through the water wheels, and later, from the beginning of the 19th century by hydraulic turbines. The general characteristics and the economical and environmental advantages of this type of renewable energy are emphasized. The different types of wheels and turbines are studied briefly. It is shown how the invention of the electric generator in 1880 and the popularization of the electricity as source of energy derived naturally to the hydroelectric exploitations. It is also explained how the possibility of transmitting the electricity to great distances, has made possible the construction of very big hydroelectric stations in some countries with plentiful hydroenergetic resources. It is also shown that at the present time, small and medium size hydroelectric developments have acquired a great importance on account of their advantages from the point of view of projection, construction and financing. Finally the necessity of giving a high priority to the utilization of hydraulic energy in the new 21th century is emphasized.

Key words: water wheels; hydraulic energy; hydraulic turbines; hydroelectric stations; history of hydraulics; renewable energy.

con el uso y entre otras ventajas que se verán posteriormente: puede acumularse, no contamina el ambiente, es muy segura, se produce a muy bajo costo y la tecnología de su utilización está suficientemente desarrollada a nivel mundial, por lo que no requiere en general investigaciones fundamentales adicionales para su aplicación inmediata, como ocurre por ejemplo, con la mayoría de las fuentes renovables de energía que hoy se tratan de desarrollar.

■ EL CONCEPTO DE CARGA HIDRÁULICA

La energía hidráulica se manifiesta a través de lo que se conoce como carga hidráulica total, H , que es la energía que tiene el fluido por unidad de peso del mismo y que se mide en unidades de longitud (metros).

En Hidráulica se utiliza para medir la energía, la ecuación de Bernoulli, que es la expresión en ese campo del principio de conservación de la energía. La ecuación de Bernoulli establece que la carga hidráulica total se conserva a lo largo de una corriente fluida y que la diferencia de carga entre dos puntos de dicha corriente, se debe a las pérdidas de energía (carga), h_f , debidas a la circulación del fluido entre los dos puntos.

La energía hidráulica de una partícula de fluido, o sea la carga, se presenta en tres formas:

- La energía de posición o potencial por unidad de peso, medida respecto a un plano de referencia, llamada carga a elevación, h . También se denomina carga estática.
- La energía por unidad de peso debida a la presión, denominada carga a presión, representada por la expresión p/γ .
- La energía cinética por unidad de peso, debida a la velocidad del fluido, o carga a velocidad, expresada por $U^2/2g$.

donde:

h : Altura de la partícula respecto al nivel de referencia.

p : Presión sobre la partícula.

γ : Peso específico absoluto del fluido.

U : Velocidad de la partícula.

g : Intensidad de la gravedad.

El principio se aplica a la corriente fluida, tomando una partícula representativa del movimiento medio de la corriente, y se expresa por la ecuación:

$$p/\gamma + h + U^2/2g = H = \text{constante} \quad \dots(1)$$

que indica que la carga total, es la suma de la carga a presión, la carga a elevación y la carga a velocidad.

Por otra parte, es muy importante destacar que las formas de la energía hidráulica son intercambiables, o sea, que cualquiera de ellas puede transformarse en cualquiera de las otras.

DESARROLLO HISTÓRICO DEL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA. RUEDAS HIDRÁULICAS ■ Y TURBINAS HIDRÁULICAS

De las tres formas en que se presenta la energía hidráulica, la primera que se utilizó fue la debida a la velocidad de las corrientes de aguas superficiales, o sea la carga a velocidad. Según Singer,¹ esto ocurrió aparentemente en Grecia en el siglo primero A.C. en forma de un molino de agua para moler cereales, que en su versión más primitiva, estaba formado por una rueda hidráulica horizontal, compuesta por cucharones montados en un eje vertical. (Ver figura 1.)

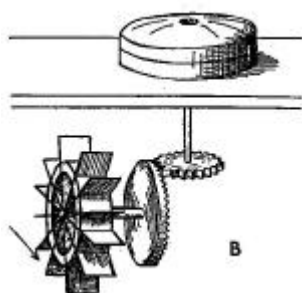
En realidad la aparición de esta rueda hidráulica como motor primario, implicó un mero cambio de la potencia motriz, de los músculos de los animales hacia una máquina impulsada por el agua en movimiento, más que un nuevo nivel de producción de energía, ya que su potencia estaba alrededor de 0,3 kW; o sea, del mismo orden de magnitud que los molinos movidos por dos esclavos o un burro.



FIG.1 Rueda hidráulica horizontal primitiva.

Sin embargo, cuando en el primer siglo D.C., los ingenieros romanos convirtieron este molino primitivo, en el llamado molino de Vitrubio, crearon un motor primario, que aún en su forma más elemental podía producir unos 2,5 kW, hubo un cambio cuantitativo que posteriormente con el desarrollo técnico y la diseminación de los conocimientos, puso en manos de la humanidad una máquina capaz de desarrollar potencias del orden de 30 a 45 kW.

En este caso, la rueda hidráulica se colocó en posición vertical, con eje horizontal, y utilizando los conocimientos helenísticos elementales sobre engranajes, llevaron el movimiento del eje horizontal al eje vertical de las piedras del molino, lo que permitió a la vez moverlas más rápidamente. (Ver figura 2.)

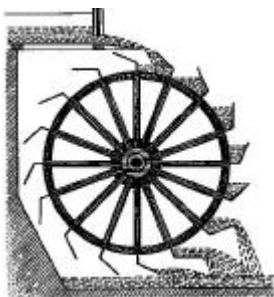
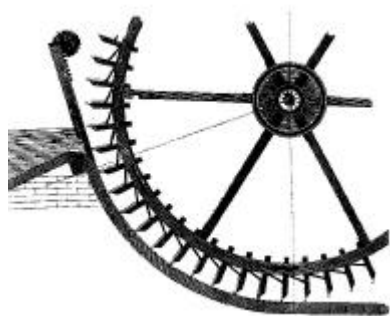
FIG. 2 *Molino de Vitrubio.*

A través del tiempo se desarrollaron tres tipos de ruedas hidráulicas verticales:

- De impulsión por debajo.
- De alimentación superior.
- De pecho.

La rueda hidráulica de impulsión por debajo (figura 2), aunque es la menos eficiente, fue el tipo más común durante siglos, hasta que se encontró en la práctica, que se podía obtener mayor eficiencia, haciendo que el agua incidiera en la parte superior de la rueda, comunicándole de ese modo un movimiento de rotación por efecto del agua descendente.

En las ruedas hidráulicas de impulsión por debajo, la energía que se utiliza es la de la carga a velocidad. En las ruedas de alimentación superior (figura 3) y en las de pecho (figura 4) se utiliza la energía de la carga a elevación.

FIG. 3 *Rueda hidráulica de alimentación superior.*FIG. 4 *Rueda hidráulica de pecho.*

Con el desarrollo tecnológico, la rueda hidráulica amplió su campo de aplicación como motor primario, a otras actividades, tales como molinos de mármol y de pólvora, aserraderos, etcétera.

Las ruedas hidráulicas, junto a los molinos de viento, dominaron la tecnología hasta finales del siglo XVIII. En el siglo XIX con el desarrollo de la Ingeniería Hidráulica y la introducción del hierro forjado, fue posible mejorar el diseño y construcción de las ruedas hidráulicas alcanzando eficiencias razonables para este tipo de máquinas.²

No obstante, la carga a elevación aprovechable por las ruedas estaba restringida por su diámetro, que tenía un límite desde el punto de vista mecánico. Se imponía la creación de una máquina que pudiera utilizar grandes cargas y producir potencias mayores.

Fue así que a principios del siglo XIX, surgieron las primeras turbinas hidráulicas dignas de ese nombre, como resultado de los trabajos de dos ingenieros franceses: Claude Burdin y Benoit Fourneyron.³

Burdin sometió en 1824 a la Academia de Ciencias Francesa la memoria "Las turbinas hidráulicas o máquinas rotatorias a gran velocidad" que describió una nueva forma de utilizar la energía hidráulica en un motor primario e introdujo la palabra turbina en la terminología ingenieril. En 1827 Fourneyron construyó una unidad experimental que demostró la practicabilidad de las ideas de Burdin.³ De ahí en adelante, diversos investigadores introdujeron mejoras en el diseño de las turbinas, que las han llevado a la gran confiabilidad y altísimas eficiencias que tienen en la actualidad.

Las turbinas hidráulicas convierten la energía hidráulica en energía mecánica a partir de la carga a velocidad creada en la propia turbina por transformación de la carga a presión de que disponen a la entrada de las mismas. Antes de llegar a la turbina, el agua debe convertir la carga a elevación creada por el salto, en carga a presión, para lo cual se conduce a la entrada de la turbina por una tubería a presión.

La turbina está compuesta por dos órganos fundamentales: el distribuidor y el rotor. El distribuidor convierte la carga a presión existente a la entrada de la turbina en carga a velocidad (energía cinética). Una vez que el agua ha adquirido la velocidad adecuada, incide sobre el rotor, que gira, y es allí que se extrae prácticamente toda la energía hidráulica del agua, que se convierte en energía mecánica disponible en el eje o árbol de la turbina.

El agua, al dejar el distribuidor puede hacerlo de dos formas: a presión atmosférica o a una presión diferente de la atmosférica, lo que sirve como criterio de clasificación de las turbinas, en turbinas de acción o de reacción, respectivamente.

Cuando el agua al salir del distribuidor lo hace a la presión atmosférica e incide sobre los álabes del rotor en forma de chorro libre, la turbina se conoce como turbina de acción o

de impulso. De este tipo de turbina, la que más se usa en la actualidad es la conocida como turbina Pelton (figura 5).

Cuando el agua al dejar el distribuidor no ha cedido toda la carga a presión y todavía una parte de dicha carga se convierte en carga a velocidad dentro del rotor, manteniéndose llenos de agua todos los pasajes interiores de la turbina, sin tener acceso a ellos el aire atmosférico, se dice que la turbina es de reacción (figura 6).

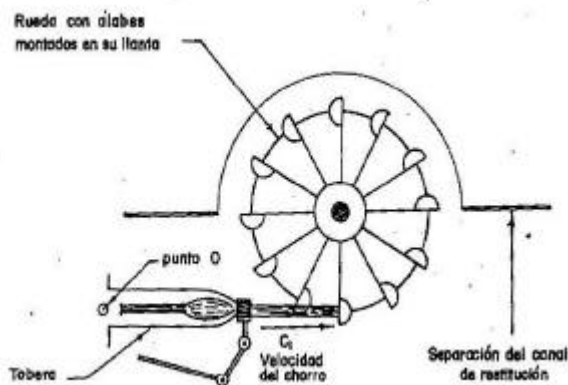


Fig. 5 Esquema de una turbina Pelton.

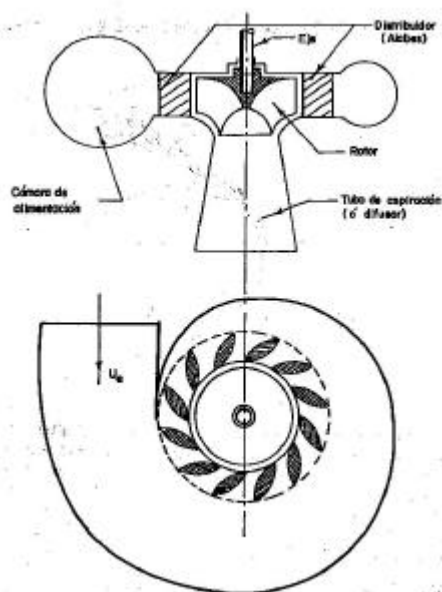


Fig. 6 Esquema de una turbina de reacción.

Los trabajos de Francis en 1849 produjeron un desarrollo significativo en la construcción de las turbinas de reacción, mientras que las turbinas de acción, tuvieron su contrapartida, con la construcción en 1880 de la primera turbina diseñada por Pelton.³

En 1913, Kaplan patentó su turbina de paletas fijas para aprovechar cargas hidráulicas pequeñas, la que fue seguida poco tiempo después por la turbina de aletas ajustables. Aunque Kaplan es el inventor de ambos tipos de turbinas, llamadas también de propela, solo se designa como turbina Kaplan a la de paletas ajustables.³

En la actualidad se utilizan distintos tipos de turbinas, tanto de acción como de reacción.

Como se ha señalado, entre las turbinas de acción la que más se usa es la del tipo Pelton, aunque también se utilizan las conocidas como turbinas de acción de flujo cruzado, de los tipos Ossberger y Michel-Banki, que están limitadas a pequeños tamaños (saltos de 100 a 200 m y potencias hasta de 1000 kW).

En el caso de las turbinas de reacción, las más utilizadas son las de tipo Francis de flujo radial y mixto y las de propela o de flujo axial, entre las que pueden destacarse las de propela fija, las del tipo Kaplan y las de bulbo.

Las turbinas hidráulicas son los motores que en forma general están sometidos a una variación más amplia en las condiciones de trabajo. Las cargas pueden ser desde 1 m, hasta prácticamente 2 000 m y las potencias a desarrollar, desde muy pequeñas, hasta tan altas como 200 o 500 MW en una sola unidad. O como en el caso de Itaipú, turbinas de 715 MW cada una. Es decir, que el diseño debe cubrir multitud de combinaciones de cargas, velocidades de rotación y potencias.

■ APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS

Hasta aquí hemos examinado el desarrollo histórico del aprovechamiento de la energía hidráulica a través de las máquinas que ha inventado el hombre para ello, comenzando con las ruedas hidráulicas con su baja potencia y eficiencia, hasta llegar a las modernas turbinas hidráulicas.

Las ruedas hidráulicas primero, y las turbinas después, hasta fines del siglo XIX, suministraban potencia mecánica para aplicarla directamente, ya sea en una pequeña instalación o en las industrias, pero con la invención del generador eléctrico en 1880 y la popularización de la electricidad como fuente de energía, comienza la historia de los aprovechamientos hidroeléctricos.

Hoy en día, con las posibilidades de transmitir la electricidad a grandes distancias, la construcción de grandes centrales hidroeléctricas ha sido corriente en los países que disponen de abundantes recursos hidroenergéticos. Son ejemplo de esos gigantes hidroeléctricos, las estaciones de: Krasnoyarsk en Siberia (6 000 MW); Grand Coulee en los Estados Unidos (6 300 MW); Guri en Venezuela (10 300 MW) e Itaipú (la mayor de las instalaciones, con 12 600 MW) en Paraguay-Brasil. En la actualidad se construye la Central de Tres Gargantas en China, que promete ser la mayor.

La energía para los aprovechamientos hidroeléctricos se toma en general del caudal, Q , que circula a través de una corriente de agua superficial, en un tramo de dicha corriente, en que exista una diferencia de nivel, H , entre dos puntos, en uno de los cuales (el más alto) se construye una obra de retención, creando así un salto artificial, que pueda dar origen a un volumen razonable de energía.

Algunos de los elementos fundamentales que configuran un aprovechamiento hidroeléctrico, son:

- La obra de retención (una presa pequeña o grande, según sea necesario).
- El vertedor de demasías.
- La obra de toma.
- El desarenador.
- El canal de derivación.
- La cámara de puesta en carga.
- El aliviadero.
- El conducto a presión o tubería de carga.
- Las turbinas hidráulicas con sus generadores y los demás elementos alojados en la casa de máquinas.
- El canal de restitución.

Con todos esos elementos, lo que se pretende es desviar el caudal del río por una vía diferente a la natural, para que la diferencia de nivel existente entre los dos puntos, pueda ser utilizada en la forma más adecuada para la producción de energía.

■ ENERGÍA Y POTENCIA DE UN SALTO

Los dos factores esenciales en la captación de la energía disponible de un salto, para convertirla primeramente en energía mecánica a través de las turbinas y posteriormente en energía eléctrica mediante los generadores, son la carga hidráulica, H y el caudal, Q , existentes en el lugar seleccionado, elementos a partir de los cuales se definirán las características del aprovechamiento y la potencia de las máquinas que van a instalarse.

La potencia del salto es función del producto de estos dos factores, Q y H . Debe recordarse, que la carga hidráulica expresa la energía por unidad de peso de que dispone un líquido, expresada en altura de ese líquido sobre un nivel de referencia determinado. Como el caudal se expresa en unidades de volumen por unidad de tiempo, la potencia del salto (energía en la unidad de tiempo) será fácil de determinar multiplicando el producto QH por el peso de la unidad de volumen del líquido.

La energía para un período determinado de tiempo, se calculará lógicamente, multiplicando la potencia del salto por el tiempo que corresponda.

Teniendo en cuenta el análisis realizado anteriormente, la potencia del salto, N_s , quedará expresada por:

$$N_s = \gamma Q H \quad \dots(2)$$

Si se expresa el caudal en m^3/s y la carga en metros, como el agua tiene un peso específico absoluto de $9\,810 \text{ N/m}^3$ y $1 \text{ kW} = 1\,000 \text{ W}$, la potencia del salto expresada en kW, será:

$$N_s = 9,81 Q H \quad \dots(3)$$

Lógicamente, debido a las pérdidas de energía que se producen en las obras de captación y conducción, en las

turbinas y los generadores eléctricos, la potencia disponible o utilizable del salto, N_u , es una fracción de la potencia del mismo. Se puede considerar que esa fracción tiene un valor promedio de 0,775, por lo que la potencia utilizable del salto, puede expresarse a los efectos prácticos como:

$$N_u = 7,6 Q H \quad \dots(4)$$

■ ACUMULACIÓN DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA

Una de las ventajas que se ha señalado que tiene la energía hidráulica, es que se puede acumular.

¿Por qué y para qué se puede y se debe acumular?

La demanda diaria de energía eléctrica varía poco de un día a otro a través del año. Sin embargo, las variaciones de la demanda de potencia eléctrica que se producen durante las horas de un mismo día, son mucho mayores. Mientras que el consumo total del día de máxima demanda dentro de un año determinado, pudiera ser 1,3 veces el del día promedio; de 7 a 9 de la noche de un día cualquiera, por ejemplo, la potencia demandada puede alcanzar de dos a tres veces la media del día promedio. Por otra parte, el régimen de caudal de los ríos se presenta con características opuestas: varía poco durante un mismo día, pero es muy variable a través del año.⁴

De lo anteriormente expuesto, resulta claro, que una red eléctrica consumidora no puede alimentarse con estaciones hidroeléctricas que funcionen, utilizando solamente de modo directo los caudales naturales de los ríos, por lo que resulta necesario y conveniente, adaptar de alguna forma al consumo, la producción de las centrales hidroeléctricas.

Una de las formas de lograr esta adaptación, es la de construir embalses de acumulación, que permitan almacenar el agua que escurre entre dos períodos de fuerte hidraulicidad o de bajo consumo, a fin de utilizar el agua acumulada (energía acumulada) durante los períodos adecuados (fuerte demanda o baja hidraulicidad).

El volumen de agua acumulada dentro de un embalse, que pueda ser utilizado para alimentar las turbinas dependientes del mismo, se denomina volumen útil, V_u . La energía media acumulada por el volumen útil del embalse, W_{ac} , disponible a la salida de los generadores en la casa de máquinas, considerando una carga bruta media, H_m y un rendimiento global de la instalación de 0,733, puede demostrarse que está representada en kWh por:

$$W_{ac} = (V_u \cdot H_m)/500 \quad \dots(5)$$

Formulación práctica que permite expresar, que 1 m^3 de agua, almacenado a 500 m de altura sobre el canal de restitución, puede generar en la estación hidroeléctrica 1 kWh de energía.

IMPORTANCIA ACTUAL DE LOS PEQUEÑOS ■ APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS

Si se tiene en cuenta la potencia instalada, puede hablarse de grandes y pequeños aprovechamientos hidroeléctricos (PAH).

El límite entre estas dos categorías se ha definido de modo diferente en diversos países y por distintas autoridades. Aquí se utilizará el criterio establecido por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), que considera como pequeños aprovechamientos hidroeléctricos los que tienen una potencia menor de 5 MW, aunque otros consideran ese límite como de 15 MW y hasta de 30 MW.

Hasta mediados de la década de 1960 existía una tendencia en los países desarrollados de abandonar los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos. Pero el encarecimiento del petróleo en el mercado mundial, que se produjo entonces, provocó una regresión en esa tendencia, que no se ha revertido, ya que independientemente del problema del precio, está presente el del agotamiento de las reservas del combustible. Es de destacar inclusive, que con motivo del resurgir de los P.A.H. se han desarrollado nuevos criterios de construcción de equipos por parte de los fabricantes, entre los que pueden señalarse: la estandarización de las máquinas hidráulicas pequeñas y la simplificación de los equipos eléctricos y mecánicos que las acompañan. De ese modo, la pequeña hidroenergética se ha situado entre las más prometedoras fuentes de recursos energéticos renovables.

Los grandes proyectos hidroenergéticos que hace algunos años se preferían en distintas partes del mundo y que se beneficiaban en alto grado de la economía de escala, en la actualidad han reducido su atractivo, debido a los altos costos de construcción, el impacto ambiental y el tiempo que se necesita para su planeamiento y construcción. Aunque esto no quiere decir en modo alguno que se hayan abandonado.

En comparación, los pequeños aprovechamientos y aquellos no tan grandes, se pueden proyectar y construir en menos tiempo y son menos susceptibles a la creación de problemas ambientales. Aunque el costo por kilowatt instalado resulte mayor, los proyectos menos grandes son más fáciles de financiar. Esto hace, que la pequeña hidroenergía se haga atractiva para los países en desarrollo, donde la instalación a corto plazo de sistemas dispersos de energía, resulta esencial para el desarrollo económico y social. Además, las pequeñas instalaciones hidroeléctricas son una fuente de energía limpia y pueden competir económicamente con otras soluciones, como son los generadores Diesel, las celdas fotovoltaicas, el viento y la biomasa.

Por otra parte, debe destacarse, que países desarrollados, que tienen una red de distribución eléctrica muy densa, como Francia, tienen conectadas a dicha red, gran cantidad de hidroeléctricas menores de 50 kW, algunas de ellas, propiedad de particulares a los que les resulta

negocio hacer la inversión, para vender la electricidad producida a la Empresa Eléctrica Francesa. Esto demuestra a las claras, que el aprovechamiento de los pequeños recursos hidroenergéticos no está restringido a los lugares aislados, sino que es también favorable incorporarlos a los grandes sistemas nacionales. En adición, la disponibilidad de recursos hidroenergéticos sin explotar todavía en diversos países y las ventajas que tiene desde el punto de vista económico y ambiental la utilización de este tipo de energía, abren la perspectiva de su utilización intensiva en este nuevo siglo XXI.

■ CONCLUSIONES

Se ha presentado un estudio histórico breve, del desarrollo de la utilización por el hombre, de la energía hidráulica y de las máquinas que ha inventado para ello (ruedas y turbinas hidráulicas). Se destacan las características generales de la energía hidráulica enfatizando en su carácter renovable y no contaminante, definiendo el concepto de carga hidráulica y las tres formas en que se presenta la energía hidráulica y la convertibilidad entre ellas. Se señala como a fines del siglo XIX, con la aparición del generador eléctrico y la popularización de la electricidad como fuente de energía, se dieron las condiciones para la creación de aprovechamientos hidroeléctricos, que en los países que disponen de abundantes recursos hidroenergéticos al aprovechar la posibilidad de transmitir la electricidad a grandes distancias han dado lugar a la construcción de verdaderos gigantes hidroeléctricos. Se analizan las características de los saltos artificiales creados por el hombre y las razones que hacen necesaria y conveniente la acumulación en embalses de la energía hidráulica, destacando la importancia que hoy adquieren los pequeños y medianos aprovechamientos y las perspectivas de la utilización de la energía hidráulica en el nuevo siglo XXI.

■ REFERENCIAS

1. SINGER, CHARLES; E. J. HOLMYARD AND A. R. HALL: *A History of Technology*. Oxford at the Clarendon Press, Third impression (with corrections), 1965.
2. MÜLLER, GERALD : The "modern" engineered water wheels of the late 19th century. *IAHR Newsletter*, Vol. 21, No. 2, 2004.
3. ROUSE, HUNTER AND SIMON INCE: *History of Hydraulics*. Dover Publications Inc., New York, 1963.
4. PÉREZ FRANCO, DIOSDADO : Máquinas hidráulicas rotodinámicas, Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría, La Habana, Cuba, 1999.

Copyright of Ingenieria Hidraulica y Ambiental is the property of Facultad de Ingenieria Civil and its content may not be copied or emailed to multiple sites or posted to a listserv without the copyright holder's express written permission. However, users may print, download, or email articles for individual use.