

PRESENTE Y FUTURO DE LA ENERGÍA HIDROELÉCTRICA EN ARGENTINA

Palabras clave: Hidroelectricidad, Presas & Embalses, Beneficios e Impactos.

Key words: Hydropower, Dams & Reservoirs, Benefits and Impacts.

El presente artículo describe de manera sencilla cómo se produce la hidroelectricidad que es la manera más antigua de generar energía eléctrica y por ende la más probada de todas las tecnologías usadas hasta el presente. Se define cada uno de los componentes que conforman un aprovechamiento hidroeléctrico, se enumeran los múltiples beneficios que estos producen asociados con los distintos usos del agua y también, se dan ejemplos nacionales e internacionales, donde se enumeran los impactos que éstas pueden producir sobre el medio ambiente y que son causa de controversia con las ONG ambientalistas.

Por último, se cuantifica el potencial hidroeléctrico argentino presentando cuadros con las centrales hidroeléctricas en operación, los principales proyectos de hidroeléctricos en cartera y aquellos proyectos de Pequeñas Centrales Hidráulicas.

Present and future of hydropower in Argentina:

This article describes in a simple way how hydroelectricity, the most ancient and proven of all the technologies, is produced. Each one of the components of the peak power station are described, and the multiple benefits of the different water uses associated listed. Also the impacts that these water works can produce on the environment are mentioned. Finally, the Argentine hydroelectric potential is quantified by presenting tables with the hydroelectric plants in operation, the main hydroelectric projects in the portfolio and the principal projects of Small Hydraulic Plants.

■ INTRODUCCIÓN

La energía hidráulica es en última instancia una forma de energía solar. El Sol, principal fuente motriz del ciclo hidrológico, evapora el agua de los océanos y lagos y calienta el aire que la transporta en estado de vapor. El agua retorna a la tierra como precipitación, en sus diversas formas, y al escurrir hacia los océanos y lagos situados a cotas inferiores disipa la energía potencial acumulada.

Una corriente de agua contiene dos formas de energía: la cinética debida a su velocidad y la potencial correspondiente a su elevación con respecto a un plano de referencia. Esta propiedad física permite aprovechar a través de máquinas específicas – turbinas – tanto los pequeños

desniveles con grandes caudales (ríos de llanura) como grandes desniveles con pequeños caudales (ríos de montaña).

El potencial hidráulico mundial equivale aproximadamente al consumo energético total actual. En la actualidad sólo utilizamos la cuarta parte, por lo que la energía hidráulica tiene aún mucho por contribuir en la sustitución de los combustibles fósiles como fuente energética renovable.

La energía hidroeléctrica es la más probada de todas las tecnologías para generación de energía eléctrica a gran escala, es no contaminante, no consume al recurso hídrico, no produce residuos, su rendimiento en la transformación energética es el más elevado de todas las tecnologías

(superior al 90%), utiliza un recurso que es renovable, produce directamente energía mecánica en vez de calor para mover al generador, puede obtenerse con máquinas de casi cualquier tamaño y además tiene la ventaja de que la inversión en obras hidroeléctricas permite satisfacer otros usos del recurso hídrico como el riego, el abastecimiento de agua potable e industrial, la navegación, el control de las crecidas y las actividades recreativas, estrechamente vinculadas con el turismo, por eso las obras hidroeléctricas son consideradas de beneficio múltiple.

■ LOS COMPONENTES DE UN APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO

Las centrales hidráulicas utilizan la energía potencial generada por la

■ Gustavo Alberto Devoto

Ing. Civil Egresado de la UBA
Académico de Número de la Academia Nacional de Ingeniería (ANI)
Miembro del Instituto de Energía de la ANI

E-mail: gdevoto8@gmail.com

diferencia de cotas topográficas entre las aguas en el embalse y las de la descarga o de restitución al río. La teoría hidráulica demuestra que la potencia que puede generar un aprovechamiento hidráulico resulta producto de dos variables: el flujo de agua o caudal Q [m^3/s]^(a) por el salto H [metros]. Si el salto es casi constante y no se dispone de capacidad para almacenar los aportes del río, la potencia a obtener seguirá la evolución propia del hidrograma afluente a la central. En cambio, en caso de disponer de un embalse, se podrá modificar la variabilidad natural de un río y conseguir un régimen más regulado y un mayor aprovechamiento del recurso hídrico. El tamaño del embalse dependerá de: las características topográficas y geológicas del sitio de emplazamiento de la obra, las posibilidades tecnológicas y económicas disponibles para la época y finalmente de una serie de variables hidrometeorológicas propias de la región que definen los flujos de ingreso y egreso

al mismo como son los caudales y las evaporaciones. Un proyecto óptimo será el que equilibra toda esta multiplicidad de cuestiones y logra la solución técnico-económica más conveniente.

Las características de cada central hidroeléctrica son muy variables porque dependen de las condiciones particulares de cada sitio de emplazamiento: hidrológicas, topográficas, geológicas, etc., por lo que cada aprovechamiento hidroeléctrico es en realidad un prototipo. No obstante ello, hay estructuras que las componen que son comunes y que se mencionan a continuación:

- La obra de cierre (**la presa**),
- El reservorio de acumulación (**el embalse**),
- La obra de captación por donde ingresa el agua (**la obra de toma**),

- La conducción para transportar el agua del embalse a la central (**tubería de presión, llamada también forzada**),
- El edificio donde se alojan las turbinas hidráulicas, los generadores, puentes grúas y tableros de medición y control (**casa de máquinas**),
- La estructura de restitución al río de las aguas turbinadas (**canal de fuga**),
- La obra para la evacuación de los excesos hídricos y seguridad de la obra (**el vertedero**).

El vertedero es una estructura de gran importancia ya que de su correcta operación y dimensionado depende la seguridad de la obra y de todo el valle de aguas abajo. Para el control de los escurrimientos puede tener o no compuertas. En caso

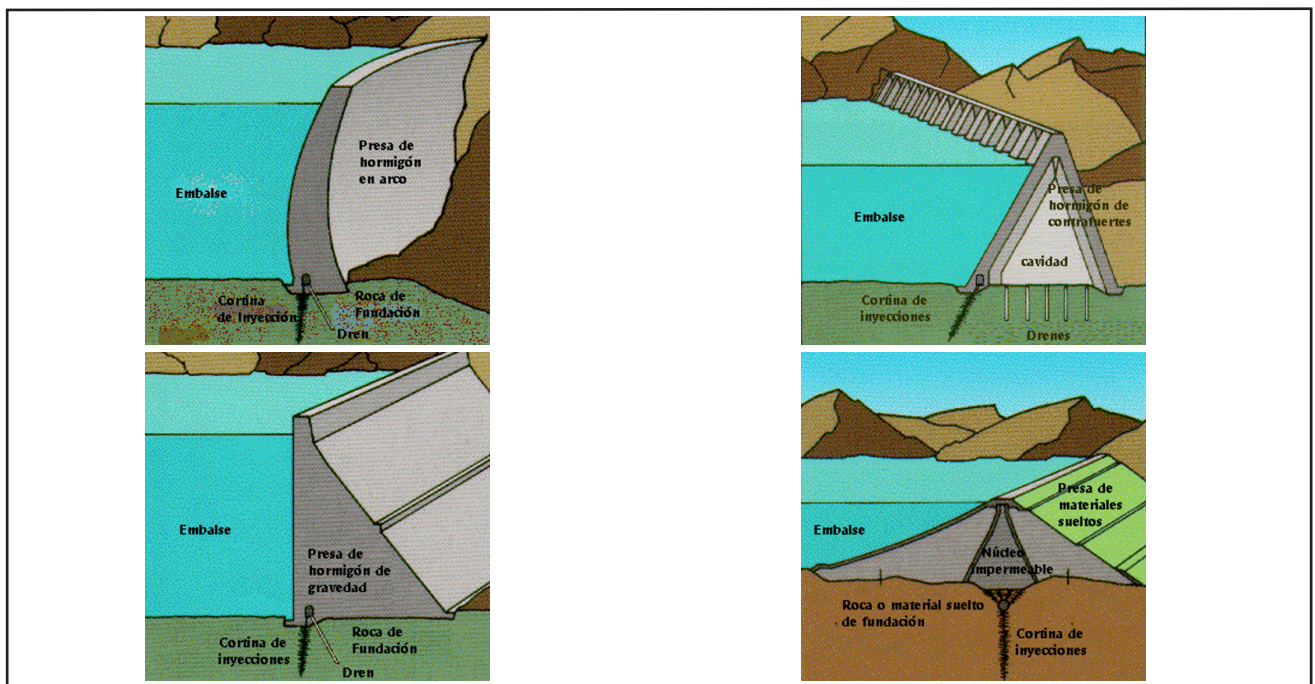


Figura 1: Cuatro tipos de presas.

de no tenerlas se habla de “vertedero libre” vale decir con descargas sólo controladas por las leyes de la hidráulica.

Para su dimensionamiento se requiere estimar la crecida de diseño de la obra que es la sollicitación hidrológica a la que se considera podría llegar a estar sometida. Los hidrólogos emplean modelos matemáticos hidrológicos para simular el funcionamiento de la cuenca en ocasión de grandes tormentas y otras veces recurren a técnicas probabilísticas para el análisis de caudales extremos a fin de calcular las crecidas de diseño del aprovechamiento y también para el desvío del río durante la construcción de la presa.

La presa es por mucho la estructura más costosa de un aprovechamiento hidroeléctrico, la de más compleja ejecución y la que debe ser controlada con mayor cuidado durante toda la vida útil de la obra para disminuir al máximo cualquier posibilidad de colapso. Para salvaguardar todas las cuestiones vinculadas con la seguridad de presas y sus estructuras auxiliares, en nuestro país se creó el ORSEP (PEN 1999).

Existen distintos tipos de presas. Cada una de ellas responde a una diferente concepción estructural del cierre, pero finalmente la elección resulta gobernada por la geología del sitio, la disponibilidad de materiales aptos para su construcción y la localización de los yacimientos. Cuando la garganta es estrecha y bastante simétrica es posible emplazar una presa de arco que es una estructura muy esbelta que resiste las cargas hidrostáticas merced a su curvatura. En cambio, cuando el sitio de cierre es más amplio y no se puede descargar los esfuerzos sobre las paredes laterales del cierre se debe recurrir a estructuras que soporten el empuje del agua por su

peso propio. En este caso, las presas de gravedad de hormigón, ya sea éstas aligeradas o no, e incluso las presas de materiales sueltos, que requieren de un enorme movimiento y clasificación de suelos, son las que se imponen.

■ DIVERSOS TIPOS DE APROVECHAMIENTOS HIDROELÉCTRICOS

Según sea la ubicación de la casa de máquinas dentro del proyecto global del aprovechamiento, pueden ser clasificados como:

- **Centrales a pie de presa**, si se encuentran junto a la obra de cierre;
- **Centrales con conducción de agua**, si están alejadas y vinculadas mediante un canal/túnel;
- **Centrales en caverna**, cuando son subterráneas.

Según sea el modo en que operan, pueden ser clasificados como:

- **Centrales de pasada**, llamadas también a pelo de agua,
- **Centrales con embalse**,
- **Centrales de bombeo**

Las centrales de pasada son aquellas que no disponen de un embalse con capacidad de almacenamiento suficiente como para regular los aportes del río. No importa su tamaño, pueden ser grandes o pequeñas. Lo relevante es si tienen capacidad o no para regular los caudales afluentes. Un ejemplo en Argentina de este tipo de centrales es la binacional de Salto Grande emplazada sobre el río Uruguay, 15 km aguas arriba de la ciudad de Concordia. En este tipo de centrales los caudales que aporta

el río se aprovechan prácticamente en igual secuencia con la que arriban. Por no disponer de un embalse de volumen suficiente en relación con los aportes que recibe, su producción energética está atada a la variación anual y estacional de los caudales, que en el río Uruguay es bastante irregular. Esta restricción operativa obliga a que el despacho de la energía generada por este tipo de centrales sea ubicado en la base misma del diagrama de cargas del Sistema Interconectado Nacional, proporcionando un aporte de potencia que sigue la disponibilidad hídrica. Comúnmente este tipo de centrales se corresponden con sitios donde las condiciones topográficas no permiten embalses con gran capacidad de almacenamiento. Otras veces, como es el caso de aprovechamientos de mucho menor tamaño conocidos en la jerga energética como Pequeñas Centrales Hidráulicas (PCH), se llegan a emplazar en canales de riego.

Las centrales con embalse por su parte son aquellas que cuentan con reservorios con un volumen de almacenamiento tal que permiten lograr una regulación importante del río. En ese tipo de aprovechamientos, el embalse juega un papel regulador de los caudales aguas abajo del mismo, permitiendo la utilización del volumen almacenado de acuerdo con las necesidades del despacho de cargas y los otros usos del agua. Un ejemplo en nuestro país de este tipo de centrales es la central de El Chocón, emplazada sobre el río Limay a 80 Km aguas arriba de las ciudades de Neuquén y Cipolletti o la de Cabra Corral en Salta sobre el río Juramento. Estas centrales son apropiadas para cubrir la punta y semipunta del diagrama de cargas pudiendo suministrar un importante aporte de potencia en un lapso muy breve. A diferencia de las máquinas térmicas, las turbinas

hidráulicas tienen la capacidad de entrar en servicio casi instantáneamente, “tomar carga” en la jerga de la generación, propiedad que las hace particularmente valiosas para la regulación de frecuencia de los grandes sistemas de potencia y que a veces obliga la construcción aguas abajo de presas compensadoras que merecen una explicación.

La operación diaria de las centrales hidráulicas de gran potencia sometidas a la demanda instantánea de energía del Sistema Interconectado Nacional, puede generar ondas de crecida artificiales más abruptas y frecuentes que las crecidas naturales. Para atenuar los efectos nocivos que éstas ondas pueden provocar sobre las márgenes del río o sobre los ecosistemas asociados, se construyen aguas abajo de estas grandes obras, embalses capaces de almacenar las descargas semanales de la central de aguas arriba con el fin de erogar los caudales de un modo más uniforme sin afectar al valle. Ejemplos en Argentina de este tipo de centrales compensadoras son la de Arroyito (aguas abajo de El Chocón) sobre el río Limay y El Chañar (aguas abajo de Cerros Colorados) sobre el río Neuquén.

Las centrales de bombeo son un caso muy particular de centrales hidráulicas en las que la turbina es reemplazada por una turbo-bomba. Esta máquina “reversible” tiene la capacidad de operar tanto como una turbina convencional y mover un generador para generar electricidad o como una bomba, cuando el generador funciona como motor eléctrico, toma energía de la red y eleva el agua para la generación posterior de energía. De este modo el agua puede ser recirculada tantas veces como se quiera en un circuito cerrado entre un embalse superior y otro inferior (contra embalse). Si bien el rendimiento global de estos

sistemas es menor que el de una central hidráulica convencional, su justificación técnicoeconómica se

funda en la diferencia de precios que suele haber entre la “energía de punta” y la “energía de base” de un

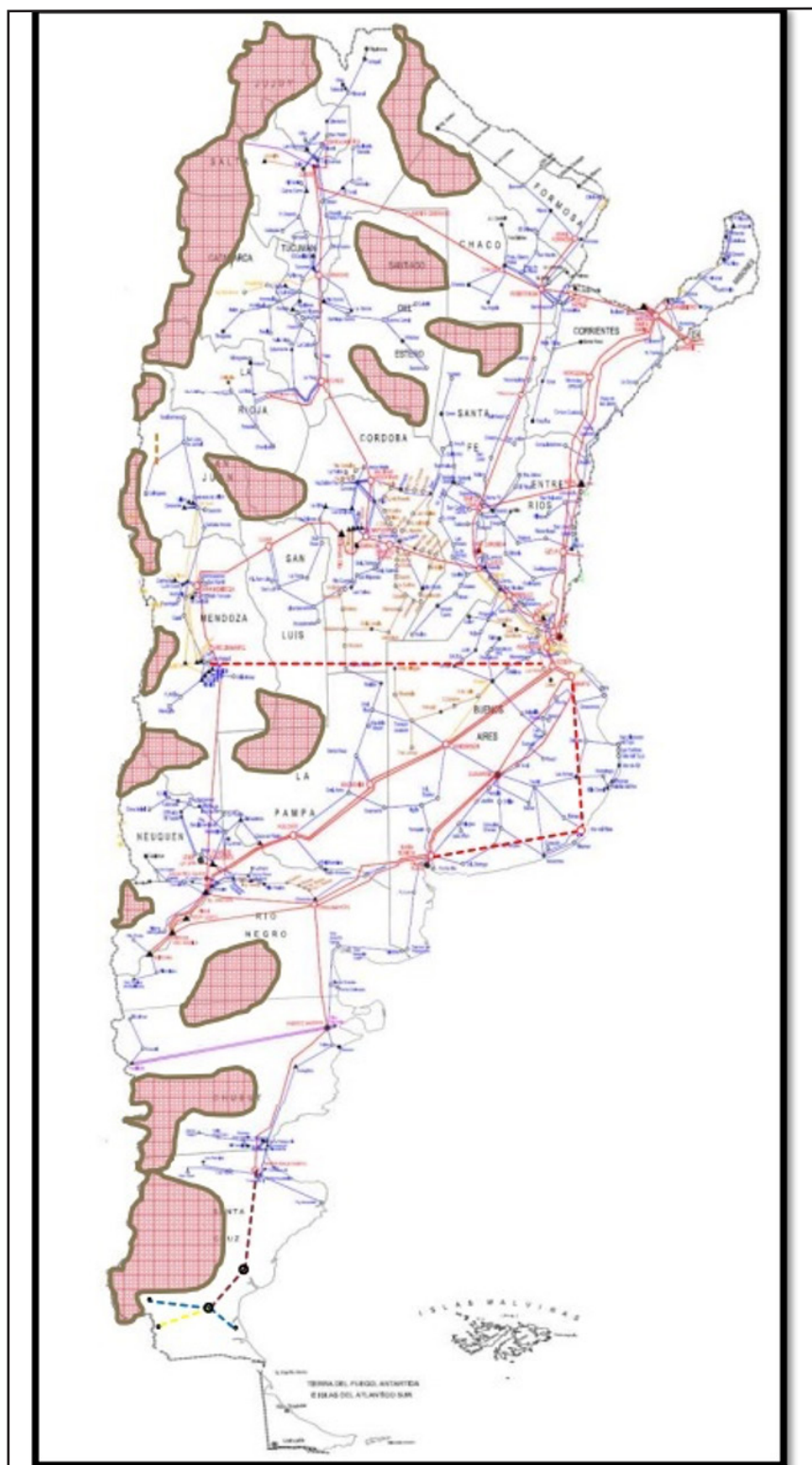


Figura 2: MAPA: LA MANCHA ELÉCTRICA Fuente: elaborado por la Secretaría de Energía, <https://www.datos.gob.ar/>.

sistema de generación interconectado. En tales circunstancias puede ser económicamente conveniente bombear durante las horas de base tomando energía barata de la red para generar en horas de punta cuando el precio de la energía es elevado. Ejemplos en Argentina de este tipo de centrales son: la Central de Embalse en Río Tercero en Córdoba y la Central El Tigre, sobre el río Diamante en Mendoza.

Las pequeñas centrales hidráulicas (PCH) merecen una mención especial dado el rol importante que cumplen en la generación de energía renovable. Un país ejemplo en su utilización es India, que junto con China son los mayores generadores de energía eléctrica por medio de pequeños aprovechamientos hidroeléctricos del Mundo. Las consecuencias del desarrollo que generan este tipo de pequeños proyectos no son menores para sociedades con amplios sectores rurales que además de los beneficios directos se nutren con la instalación de más de 20 empresas fabricantes de equipamiento en serie para estas PCH como es el caso de India.

Las PCH requieren de estudios básicos muy pocos sofisticados que se encuentran descriptos con detalle en manuales como el de la OLADE (Olade - 1985) y el de ELECTROBRAS (Electrobras - 1985). Estas centrales son de interés para zonas eléctricamente aisladas, señaladas en mapas de la Secretaría de Energía como "la mancha eléctrica" en las que no es conveniente recurrir a la generación tradicional de electricidad para satisfacer la demanda porque los costos de tendido de líneas de transporte de electricidad a lugares remotos, alejados de los centros de consumo, son muy elevados.

Las PCH suelen ser una solución apropiada para dotar de energía a aquellas comunidades de monta-

ña que por la acumulación de nieve quedan aisladas durante varios meses al año siendo condenadas a subsistir al margen de todo crecimiento y desarrollo económico por la falta de acceso a la electricidad y a combustibles líquidos. En un país tan extenso como la Argentina es poco entendible que no se haya impulsado con más vigor este tipo de solución energética con excepción de las provincias de Neuquén (a través del Ente Provincial de Energía-EPEN) y Misiones (a través de la Universidad) estableciendo una línea de préstamos muy blandos o incluso a fondo perdido.

Las Ley 27.1917/2015 de energías renovables, actualmente vigente, estableció el límite de las Pequeñas Centrales Hidráulicas en menos de 50 MW.

■ LAS TURBINAS

La turbina hidráulica es la máquina que le da razón al aprovechamiento hidroeléctrico y que lo distingue de otras fuentes alternativas de energía. Puede decirse, sin temor a equivocarse, que la turbina hidráulica es la joya mecánica sobre la que se funda este tipo de generación. Las turbinas son máquinas casi perfectas, con rendimientos superiores al 95%, diseñadas en laboratorios de hidráulica a través del ensayo de modelos reducidos (que de modo alguno deben ser confundidos con maquetas) que cumplen con la teoría de semejanza en hidráulica.

Existen dos categorías principales de turbinas: **las de acción** y **las de reacción**. Esta denominación tuvo su origen en las primeras máquinas rudimentarias, en las que la potencia provenía de la fuerza del agua al golpear las palas de la rueda o de la fuerza de reacción que proporcionaba el agua cuando las abandonaba.

En la actualidad el significado de estos términos se ha modificado con un mayor conocimiento teórico. En una turbina de acción la energía de presión se convierte en energía de velocidad antes de que el chorro, que sale de un eyector, impacte sobre el elemento rotante (cucharón). La transformación energética se realiza a presión atmosférica. Este tipo de máquinas hidráulicas quedan representadas por las turbinas **Pelton**, adecuadas a grandes saltos y bajos caudales.

En las turbinas de reacción en cambio, el escurrimiento se produce bajo presión en una cámara cerrada. La vena líquida ingresa al rotor de la turbina con una presión superior a la atmosférica y experimenta a lo largo de su pasaje a través de los álabes del rotor una caída de presión en la que va transformándose la energía de presión en cinética.

La turbina **Francis** ha sido la más frecuentemente utilizada en nuestro país. La velocidad tangencial en un rotor Francis depende del salto. Si el salto es pequeño, y se requiere tener velocidades tangenciales elevadas, el diámetro del rotor debe de ser pequeño y por ende los caudales que pueden circular sólo pueden ser bajos. Para salvar esta limitación fueron desarrolladas las turbinas Kaplan.

Las turbinas **Kaplan** también son de reacción, pero de flujo axial. Cuentan con un rotor que funciona de manera semejante a la hélice de un barco y se emplean en aprovechamientos de llanura donde coexisten los saltos pequeños con los grandes caudales. Sus álabes son regulables, vale decir que pueden cambiar el ángulo de ataque con respecto al flujo de agua, lo cual les otorga una curva muy plana de rendimientos elevados para una amplia gama de caudales. Compárese en la figura 3 la dimensión de la turbina

con la figura del hombre tomado como escala.

Las turbinas de “flujo cruzado” tipo **Michell-Banki** se utilizan con ventaja sólo en los pequeños aprovechamientos (conocidos como PCH – pequeñas centrales hidráulicas). Si bien no tienen los rendimientos de las turbinas convencionales (del orden del 70%) son más versátiles, económicas, fáciles de mantener y pueden ser construidas en talleres metalúrgicos de la zona lo que per-

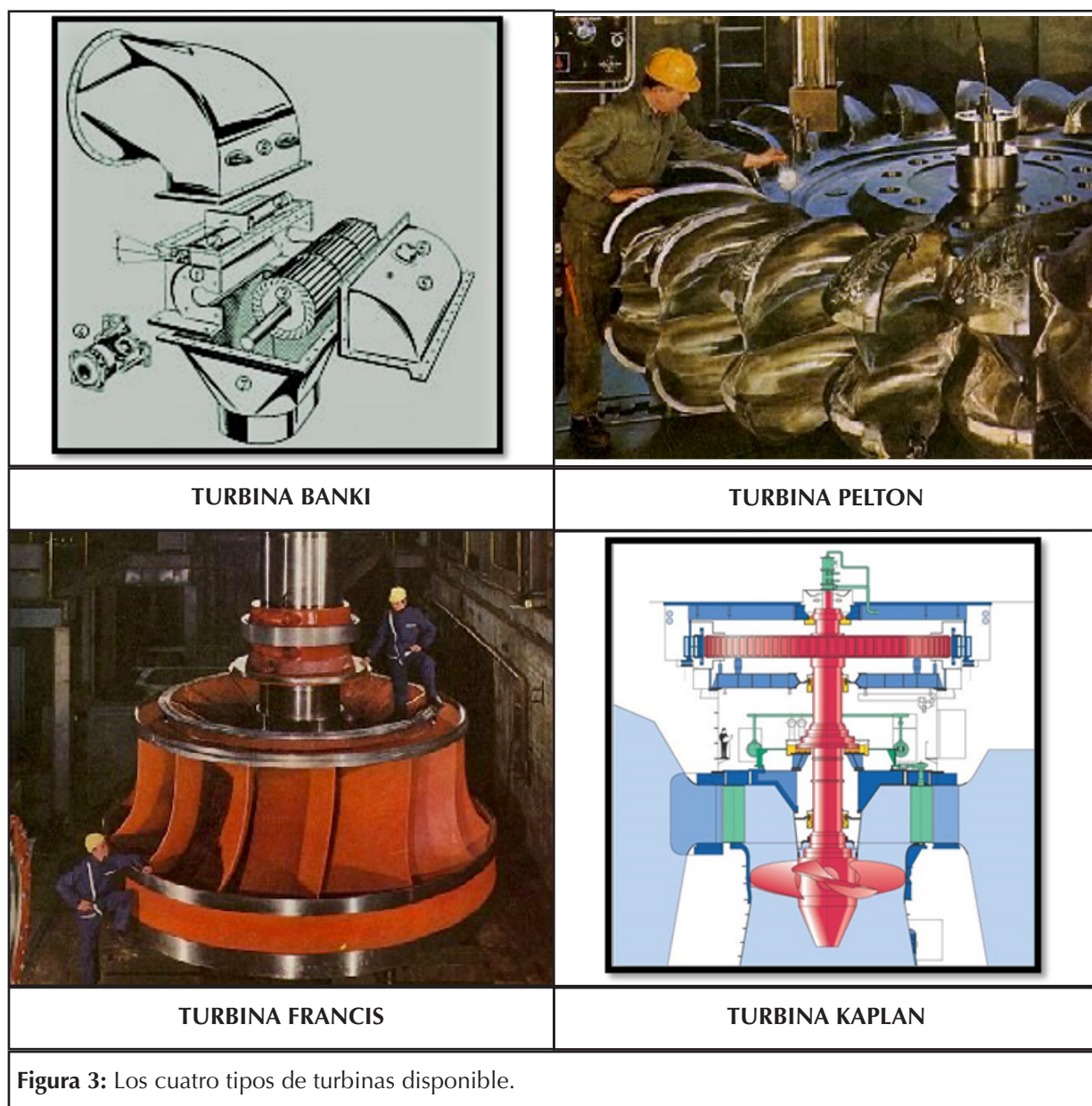
mite integrar fuerza de trabajo local en su construcción participación que se considera valiosa desde lo social.

■ EL ROL TRASCENDENTE QUE LE CABE A LAS OBRAS HIDROELÉCTRICAS

El uso vital y diversificado que tiene el recurso hídrico - agua potable, riego, navegación, piscicultura, turismo – obliga a que los proyectos hidroeléctricos deban ser evaluados a partir de un enfoque global del agua.

Los aprovechamientos de pequeña escala son obras de gran impacto local, donde la generación de energía eléctrica queda totalmente subordinada a los otros usos que son vitales para la incorporación de comunidades aisladas a la actividad productiva.

Los aprovechamientos de escala intermedia, tienen impacto significativo en el desarrollo regional, por lo que el uso hidroeléctrico tiene una mayor significación económica, pero de impor-



tancia relativa menor a la de otros usos del agua, como la regulación o el riego.

En los aprovechamientos de mayor magnitud el uso hidroeléctrico suele ser el más importante y en este segmento, las obras hidroeléctricas binacionales constituyen un capítulo especial.

En el marco del proceso de integración económica en marcha en la Cuenca del Plata, proyectos como los de Corpus Christi, Garabí y Panambí, tanto por su ubicación geográfica como por su magnitud, constituyen una alternativa fundamental para el abastecimiento del mercado eléctrico ampliado.

Los grandes proyectos hidroeléctricos, además de su escala diferente de inversiones, deben afrontar polémicas en la comunidad que pueden llegar a prolongarse en el tiempo. Por ello debe hacerse una buena identificación previa de los aspectos críticos que los condicionan, recordando que actualmente por estas circunstancias, junto con los proyectos de energía nuclear, no califican para el MDL (Mecanismos de Desarrollo Limpio).

Sin dudas la Evaluación de Impacto Ambiental en este tipo de obras es de fundamental importancia, por lo que sólo estudios serios y completos, alejados de un mero trámite administrativo, podrán asegurar la su viabilidad ante la comunidad, para identificar la viabilidad de la obra y no convertirse en un mero trámite administrativo.

Si bien la hidroelectricidad ofrece reconocidas ventajas sobre la utilización de combustibles fósiles en términos del impacto climático y está considerada como una fuente de energía limpia, de bajo costo y de tecnología probada, ha sido tema de controversia en los últimos años. El

debate se ha centrado en los impactos negativos sociales y ambientales atribuidos a los grandes proyectos hidroeléctricos así como en otros cuestionamientos que van desde los sobrecostos a los déficits de performance.

Inevitablemente, como todas las grandes obras de infraestructura, las hidroeléctricas provocan un impacto sobre el medio ambiente. Este impacto es esencialmente resultado de la presencia de la presa, pero ha sido demostrado con largueza que es posible armonizar la instalación de una hidroeléctrica con la conservación del medio ambiente y contemplar en el proyecto a los ribereños afectados.

Las Líneas Directrices para la Sustentabilidad de la Asociación Internacional de la Energía Hidráulica (IHA con sede en Suiza - 2004) son una contribución excelente para la consideración de los aspectos ambientales, sociales y económicos en la evaluación sustentable de los nuevos proyectos hidroeléctricos y la operación de los esquemas existentes.

Durante la de septiembre del 2002 el Dr. Kofi Annan, Secretario General de la ONU (1997-2006) planteó 5 áreas claves para un Desarrollo Sustentable que fueron: 1) agua, 2) energía, 3) salud, 4) agricultura y 5) biodiversidad. No debe dejar pasar desapercibido que el agua y la energía encabezan la lista.

Sin ninguna duda los proyectos hidroeléctricos - desarrollados y operados de acuerdo con buenas prácticas - pueden hacer una contribución fundamental en todas estas áreas y permitir que las comunidades de todo el mundo alcancen los objetivos de una existencia sustentable.

Los beneficios del uso múltiple de las obras hidroeléctricas, en particular en relación con la disponibilidad, confiabilidad y calidad del abastecimiento de agua potable, es una contribución a un objetivo básico, la atenuación de la pobreza y esto es esencial para los países en vías de desarrollo.

Por su flexibilidad y confiabilidad la hidroelectricidad es una fuente energética de elevada calidad, a la que le cabe un rol clave en los sistemas integrados de generación de energía eléctrica. Esta flexibilidad, a través del almacenamiento de energía en los embalses, se ha vuelto aún más importante como un modo de potenciar la contribución efectiva que pueden aportar otras fuentes renovables de energía menos concentradas y confiables como la solar y la eólica.

La necesidad de trazar un camino energético sustentable para La Humanidad sumado a que $\frac{1}{3}$ de la población mundial no tiene aún acceso a la electricidad son razones suficientes para impulsar a los ingenieros e investigadores a resolver los temas asociados a los grandes aprovechamientos hidroeléctricos que sin duda alguna serán un componente clave en el mix de la transición energética que nos depara el futuro inmediato.

Una cuestión a señalar de gran interés para nuestro país, dado su gran potencial en energía eólica, es la aún no aprovechada complementación entre estas dos fuentes de energía renovables. La utilización de embalses para almacenar energía producida por molinos eólicos permitiría resolver la intermitencia de los vientos de un modo rentable en la medida en que la normativa que regula el funcionamiento del Mercado Eléctrico Mayorista aceptase conformar unidades de negocio de

generación hidro-eólica con capacidad para celebrar contratos a término de largo plazo con los grandes usuarios (GUME) para el suministro de energía.

■ IMPACTOS SOCIALES Y ECOLÓGICOS DE ESTAS GRANDES OBRAS

La presa es la estructura civil de mayor costo de un aprovechamiento hidroeléctrico y a su vez, la que exige los controles más severos de ascultación durante toda su vida útil para reducir al máximo cualquier posibilidad de colapso.

Si bien es innegable que las grandes presas han contribuido enormemente al crecimiento económico del siglo XX, los beneficios proporcionados por estas obras han tenido su precio. Muchas de las grandes presas han fragmentado y transformado los ríos del mundo.

Como es razonable de esperar, los niveles de impacto que genera una presa no pueden ser trasladados de una obra a otra de un modo directo porque éstos se encuentran estrechamente vinculados con múltiples factores locales particulares como son las características climáticas del sitio de emplazamiento y su topografía, la hidráulica fluvial y el régimen hidrológico del río, la flora, la fauna ictícola, la estructura social y cultural de los ribereños, en definitiva del ecosistema regional entendido éste en su más amplia acepción.

Para minimizar los impactos negativos de estos grandes aprovechamientos los Organismos Internacionales de Crédito y los Gobiernos exigen sin excepción en la actualidad, Estudios de Impacto Ambiental a escala de cuenca como parte importante de los Proyectos de Factibilidad de los aprovechamientos, mientras que los Organismos de Re-

gulación y las Autoridades de aplicación en materia de Medio Ambiente requieren de los operadores la presentación de Planes de Gestión Ambiental y controlan su cumplimiento durante todo el período de construcción y funcionamiento de la obra.

Las presas son barreras físicas que pueden interrumpir el ciclo reproductivo de algunas especies ictícolas (por ej. las anguilas que migran de los ríos hacia el mar o los salmónidos que migran del mar hacia los ríos para desovar) por lo que estas obras entonces deben contar con sistemas de transferencia de peces del tipo "escalas" o semejantes a "ascensores hidráulicos" para que los cardúmenes en su migración puedan salvar el desnivel generado por la obra. Claro está que estos dispositivos creados por los ingenieros muchas veces no tienen en la práctica la eficiencia que los proyectistas suponen al diseñarlos y los peces sufren las consecuencias de adaptación al nuevo estado de situación del río.

Se sabe que las poblaciones de esturiones en el Mar Caspio sobreviven en la actualidad gracias a criaderos artificiales de peces – situados especialmente en Irán – por la interrupción de las migraciones naturales para desove provocada por las presas construidas por la ex-URSS. La desaparición de los bancos de sardinas en el Mediterráneo como consecuencia de la retención de los nutrientes del Nilo por la presa de Asuán (1971) es otro caso muy citado.

El control de las inundaciones por medio de grandes embalses, que disminuyen el caudal en época de crecidas para aumentarlo en períodos secos, conduce a una discontinuidad en el sistema fluvial. Esto, junto con la pérdida de conectividad entre hábitats en las llanuras de

inundación en aguas estancadas es vital para muchos peces fluviales que han evolucionado para aprovechar las inundaciones estacionales y utilizar las áreas inundadas para desovar y alimentarse. Perder esta conexión puede conducir a una disminución acelerada de la productividad en la pesca local y a la extinción de algunas especies.

Es conocido en la literatura especializada el caso del vertedero de Yacyretá (1994) sobre el brazo Añá-Cuá, en el que debió corregirse su diseño y el modo de operación de sus compuertas para evitar la sobresaturación de gases disueltos en la descarga que provocaba la muerte por narcosis en las especies ictícolas de aguas profundas.

Las presas obligadamente producen la interrupción del acarreo de los sedimentos de fondo de un río y favorecen la sedimentación de aquellos más finos que quedan atrapados en el embalse. Como consecuencia de la modificación en la continuidad del transporte de sedimentos, el fondo del río desciende aguas abajo de la obra por incremento de la capacidad de erosión, en un intento del río por reestablecer sus condiciones naturales de transporte. Estos descensos de fondo pueden ocasionar el descalce de estribos y pilas de puentes viales y ferroviarios así como afectar a otras obras de infraestructura. La sedimentación de los sedimentos finos en el embalse también produce que las aguas que se descargan sean más traslúcidas, lo cual favorece a que la luz solar llegue al lecho del río y se genere una mayor actividad fotosintética. El incremento de la vegetación entonces aumenta la rugosidad del cauce, y por ende se necesitan mayores tirantes para conducir los caudales que anteriormente escurrían.

El incremento de las pérdidas por evaporación es otro de los cargos que se les suele hacer a los embalses. Durante la primera mitad del siglo XX, el promedio de altura, de volumen y de área de los embalses ha aumentado en todas las regiones del mundo a la par de los avances en ingeniería de proyecto, técnicas constructivas, equipos y herramientas. La altura promedio de presas entre 1940 y 1990 era de entre 30 a 34 metros, pero aumentó a los 45 metros durante los años 90, principalmente por aquellas presas construidas en Asia. El incremento de la altura trae aparejado mayores áreas de embalse y como consecuencia, mayores evaporaciones. No menos cierto es, que las áreas bajo riego suelen ser superficies más extensas que los grandes embalses y que evapotranspiran mucho más, sin embargo las ONG conservacionistas no parecen haberle prestado demasiada atención a ello.

Las áreas inundadas por los embalses suelen además ocupar las áreas más fértiles de los valles fluviales, por lo que los proyectos con áreas extensas compiten con la utilización agrícola de los suelos.

La formación de zonas lenticas en los embalses emplazados en zonas tropicales, es otra cuestión que puede favorecer la producción de enfermedades de origen hídrico como la malaria y la esquistosomiasis.

A menudo, los que disfrutan de los beneficios del aprovechamiento es la gente que habita en las ciudades, que tienen intereses agrícolas e industriales o son consumidores que viven muy alejados de las obras, mientras que los habitantes del área inundada por el embalse y los ribereños que viven en terrenos aluviales que soportan los costos ambientales y sociales, tienen beneficios menores o ni siquiera se benefician.

El llenado del embalse puede provocar el desplazamiento obligado de cientos de miles de personas (como ha ocurrido en algunos grandes proyectos de China e India), lo que obliga a un profundo reajuste social tanto en los que son trasladados como también en aquellos que estaban establecidos en las áreas de reasentamiento. (Caso concreto el de la presa Tres Gargantas).

Valga aquí recordar el notable proyecto comandado por la UNESCO, iniciado en 1964 y ejecutado por un Consorcio Internacional, para la remoción y traslado del Gran Templo de Abu Simbel que honraba las victorias del faraón Ramsés II y que por la construcción de la presa de Asuán iba a quedar sumergido bajo las aguas del río Nilo. El monumento fue despiezado en enormes bloques de hasta 30 toneladas y vuelto a emplazar elevado a 64 metros y a 200 metros del sitio original.

Las centrales hidroeléctricas adecuan sus descargas a las demandas de energía de los grandes centros de carga por lo que generan hidrogramas de crecidas artificiales con una frecuencia muy superior a los que naturalmente produce el río. Este "tren de ondas a modo de serrucho" con fuertes gradientes de crecimiento y decrecimiento de los tirantes aguas abajo, produce el derrumbe de laderas y la consiguiente erosión de márgenes. Para evitar estas alteraciones inaceptables en el sistema fluvial se construyen embalses compensadores que operando en forma conjunta "uniformizan las descargas" y liberan a las grandes centrales hidroeléctricas de estas fuertes restricciones operativas.

Una última mención final de contribución a reducir los impactos negativos que pueden provocar las centrales hidroeléctricas: se considera de gran importancia y efecti-

vidad el establecimiento de la línea de ribera aguas abajo de las obras, tarea que debe ser apoyada por el Poder Político y ejecutada a través de las Autoridades de Aplicación en materia derecho de aguas. La delimitación del espacio "público" del "privado" y el ordenamiento territorial de la ribera son medidas no estructurales claves, que de estar realizadas antes de la entrada en servicio de la central hidroeléctrica evitarán conflictos de muy difícil solución en el futuro.

■ POTENCIAL HIDROELECTRICO DE ARGENTINA

El potencial hidroeléctrico nacional se encuentra sub aprovechado. De la energía media anual identificada (170.000 GWh/año) [Revista Petroquímica; 2006], sólo la cuarta parte es aportada por las centrales que se encuentran en operación; la energía restante corresponde a un conjunto de estudios y proyectos de muy variado nivel de desarrollo que necesitan ser actualizados. Este grupo incluye un gran número de pequeñas centrales (de potencia menor a 15 MW) que fundamentalmente tienen influencia local.

La potencia hidroeléctrica total instalada en 2019, último año no distorsionado por la pandemia por Covid-19, alcanzó a los 10.812 MW, que aportaron el 26% de la energía eléctrica total generada. Este total incluye a 675 GWh provenientes de alrededor de 60 pequeñas centrales con una potencia sumada que ronda los 180 MW, incluidas 20 micro y mini centrales pertenecientes a varios sistemas eléctricos rurales aislados, lo que indica que aproximadamente el 2 % de la oferta total hidroeléctrica de Argentina proviene de Pequeños Aprovechamientos Hidroeléctricos (de hasta 15 MW).

A través de las licitaciones del Programa Renovar se han instalado

PCH conectadas a la red de transmisión desde el año 2016 con potencia < 50 MW. CAMMESA publica en forma permanente las que están instaladas y operando [Cammesa 2020], por región, sin detalle de las centrales ni la potencia individual, según se puede ver en la Tabla 1

Tabla 1: Centrales con potencia <50 MW. Datos de octubre 2021. De referencia (CAMMESA 2020).



Región	MW
NOA	119
NEA	0
CUY	184
CEN	117
LIT	2
COM	32
PAT	47
BAS + GBA	0
Total	501

Tabla 2: Hidroeléctricas en operación

REGION	CENTRAL	POTENCIA	Nº GRUPOS	RIO
CUYO		(MW)		
	LOS REYUNOS	224	2	Diamante
	AGUA DEL TORO	130	2	Diamante
	EL TIGRE (de bombeo)	14	2	Diamante
	CACHEUTA NUEVA	120	4	Mendoza
	ALVAREZ CONDARCO	51	3	Mendoza
	NIHUIL I	74	4	Atuel
	NIHUIL II	133	6	Atuel
	NIHUIL III	52	2	Atuel
	NIHUIL IV	22	1	Atuel
	QUEBRADA DE ULLUM	43	1	San Juan
	LOS CARACOLES	185	2	San Juan
	PUNTA NEGRA	62	2	San Juan
	CUESTA DEL VIENTO	8.9	1	Jáchal
	EL CARRIZAL	17	2	Tunuyan
COMAHUE		(MW)		
	PIEDRA DEL AGUILA	1400	4	Limay
	EL CHOCÓN	1200	6	Limay
	ALICURA	1040	4	Limay
	PLANICIE BANDERITA	450	2	Neuquén
	PICHI PICUN LEUFÚ	285	3	Limay
	ARROYITO	120	3	Limay
	CASA DE PIEDRA	60	2	Colorado
NOA		(MW)		
	CABRA CORRAL	102	3	Juramento
	ESCABA	24	3	Marapa
	RIO HONDO	17	2	Dulce
	PUEBLO VIEJO	15	2	Pueblo Viejo
	CADILLAL	13	2	Salí
	EL TUNAL	11	2	Juramento
	LOS QUIROGA	2	2	Dulce
CENTRO		(MW)		
	RIO GRANDE (bombeo)	750	4	Grande
	LOS MOLINOS	63	5	Los Molinos
	REOLIN	38	3	Tercero
	SAN ROQUE	26	4	Primero
	CASSAFOUSTH	17	3	Tercero
	LA VIÑA	16	2	Los Sauces
	FITZ SIMON	11	3	Tercero
	PIEDRAS MORAS	6	1	Tercero
	LA CALERA	5	4	Primero
	CRUZ DEL EJE	2	2	Cruz del Eje
LITORAL		(MW)		
	SALTO GRANDE(1)	1890	14	Uruguay
NEA		(MW)		
	YACYRETA(2)	3100	20	Paraná
PATAGONIA		(MW)		
	FUTALEUFÚ	472	4	Futaleufú
	FLORENTINO AMEGHINO	47	2	Chubut

(1) Argentina y Uruguay reparten la generación de Salto Grande por mitades.

(2) Actualmente Argentina absorbe 90% de la generación de Yacyretá

Tabla 3: Proyectos de hidroeléctricas en cartera.

PRINCIPALES PROYECTOS EN CARTERA		
Denominación de la obra	Potencia	Energía Media Anual
	(MW)	[GWh/año] ¹
Corpus en Pindo-í (50% Argentina)	1,440	10,088
Aña Cuá 50% Argentina) (#)	135	1,000
Ampliación Yacyretá (50% Argentina)	240	1,500
Garabí (50% Argentina)	576	2,985
Panambí (50% Argentina)	524	2,738
El Tambolar	70	343
Cordón del Plata 1	847	2,291
Cordón del Plata 2	214	443
Cordón del Plata 3	325	560
Los Blancos 1	324	900
Los Blancos 2	162	450
Portezuelo del Viento	216	887
Chihuido 1	637	1,750
Chihuido 2	234	1,075
El Chañar	69	366
Río Negro Superior	117	801
Belisle	84	400
Chelforó	130	670
Chimpay Oeste	230	1,212
Pini Mahuida	320	1,409
La Invernada	320	1,402
Cerro Rayoso	261	1,144
Rincón de la Media Luna	270	1,127
Talhelum	240	1,008
La Rinconada	200	860
Corral de Piedra	376	1,492
Michihuao	621	2,869
Pte. Néstor Kirchner (#)	1,140	3,380
Gdor. Jorge Cepernic (#)	600	1,866
(#) Hidroeléctricas en construcción		

Las tres tablas siguientes resumen el estado de situación de la hidroelectricidad en Argentina.

■ NOTAS

^(a) [m³/s]: unidad de caudal usada en el S.I. en Ingeniería Civil que significa metros cúbicos por segundo.

¹ Giga Watt hora al año: unidad de energía equivalente a un millón de watt hora al año.

■ CITAS

(Cammesa 2020) [<https://cammesa.com/inicio-renovables>. Accedida 21/02/2022]

(Electrobras - 1985) Electrobrás/DNAEE, MANUAL DE PEQUEÑAS CENTRAIS HIDROELÉTRICAS, Electrobrás Co., Rio de Janeiro, Brazil, 1985

(Revista petroquímica 2006). REVISTA PETROQUÍMICA, "La Argentina sólo aprovecha una cuarta parte de su potencial hidroeléctrico"; enero 2016.

(Olade 1985) "MANUAL DE DISEÑO DE PEQUEÑAS CENTRALES

HIDROELÉTRICAS", BID - OLADE, Bucaramanga, 1985.

(PEN-1999). Organismo Regulador de la Seguridad de Presas - Decreto PEN N°239/99)

■ REFERENCIAS GENERALES

"DIEZ RAZONES PARA ARGUMENTAR A FAVOR DE LA HIDROELECTRICIDAD", aspectos consensuados entre participantes de la Conferencia de Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible, Johannesburgo, Sudáfrica, 2002, y del 3° Foro Mundial del Agua, Kyoto, Japón, 2003.

"DECLARACIÓN MUNDIAL SOBRE ALMACENAMIENTO DE AGUA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE", Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD), Comisión Internacional de Riego y Drenaje (ICID), Asociación Internacional de Hidroenergía (IHA) y Asociación Internacional de Recursos Hídricos (IWRA), Kyoto, Japón, junio, 2012.

"LAS PRESAS Y EL AGUA EN EL MUNDO, UN LIBRO SOBRE EL PAPEL DE LAS PRESAS EN LA GESTIÓN DEL AGUA", Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD), París, Francia, 2007.

“HYDROPOWER SUSTAINABILITY ASSESSMENT PROTOCOL”, International Hydropower Association (IHA), Suiza, 2010.

“SEGUNDA COMUNICACIÓN NACIONAL A LA CONVENCION MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO”, Argentina, 2006.

“REFLEXIONES SOBRE UNA MATRIZ ENERGÉTICA SOSTENIBLE”, Instituto de Energía, Academia Nacional de Ingeniería, Argentina, 2011.

“INFORME ANUAL DE CAMMESA”, 2019.

■ GLOSARIO:

OLADE: Organización Latinoamericana de Energía.

ELECTROBRAS: Órgano del gobierno brasileño responsable de la generación y distribución de la energía eléctrica.

DNAEE: Departamento Nacional de Aguas e Energia Elétrica, Brazil.

SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL (SIN): red de líneas de alta tensión (132 kV y 500 kV) que interconectan distintas regiones eléctricas de Argentina.

HIDROGRAMA: gráfico que representa la evolución de los caudales de un río en función del tiempo. Se entiende por afluentes aquellos caudales que ingresan al embalse y efluentes aquellos son erogados.

DIAGRAMA DE CARGAS: gráfico que indica la evolución de la potencia

generada por el SIN a lo largo de las 24 horas de un día cualquiera. En este diagrama en el que la potencia acompaña a la demanda se suelen distinguir tres franjas horarias: (BASE) en la que la potencia se mantiene constante, (SEMIPUNTA) experimenta variaciones de moderada magnitud y (PUNTA) donde la potencia sufre grandes variaciones. Cada franja es cubierta por máquinas de diferente performance en lo que se refiere a su capacidad de respuesta. En la base se ubican las centrales nucleares, en la semipunta los ciclos combinados y las centrales hidráulicas de pasada y en la punta las centrales hidráulicas con embalse y las turbinas a gas.

MECANISMO DE DESARROLLO

LIMPIO: procedimiento contemplado en el Protocolo de Kyoto (1977) por el cual países desarrollados pueden financiar proyectos de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) dentro de países en desarrollo, y recibir a cambio Certificados de Reducción de Emisiones vendibles, cada uno equivalente a una tonelada de CO₂.

CUMBRE MUNDIAL DE JOHANNESBURGO: reunión al más alto nivel político sobre el Desarrollo Sostenible, que tuvo lugar en Sudáfrica, del 2 al 11 de septiembre del 2002, y que tuvo como objetivo revitalizar el compromiso mundial con el desarrollo sostenible acordado una década antes en Río de Janeiro al finalizar la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo también conocida como la Cumbre para la Tierra.

MERCADO ELÉCTRICO MAYORISTA: el funcionamiento del sector eléctrico se apoya sobre tres pilares: un mercado de energía eléctrica, Mercado Eléctrico Mayorista (MEM), un sistema de precios y un administrador: CAMMESA que también controla el Despacho Unificado de Cargas. El MEM es el punto donde convergen la oferta y la demanda y en el que se efectiviza la compra-venta de energía en un Mercado a Término y en otro Mercado Spot.

GUME: Gran Usuario del Mercado Eléctrico. Aquel consumidor que puede adquirir energía directamente de un Generador o de un Comercializador reconocido por CAMMESA

TIRANTE: profundidad del flujo de un escurrimiento a superficie libre propio del que ocurre en ríos y canales.

ZONAS LENTICAS: zonas de “aguas muertas” de un lago o un embalse sin desplazamiento de la masa acuática.

TRES GARGANTAS: La mayor central hidroeléctrica del mundo con una potencia instalada de 22500 MW. Se encuentra emplazada en río Yangtzé, provincia de Hubei, China. Su construcción generó un lago de 600 km de longitud que obligó al reasentamiento de 1.000.000 de ribereños.

PROGRAMA RENOVAR: Por resolución del Ministerio de Energía y Minería MEyM 136-252/2016 y 275 - E/ 2017 de Convocatorias Abierta Nacional e Internacional a interesados en ofertar la contratación en el MEM de energía eléctrica de fuentes renovables de generación se inició “Programa RenovAr”.