

Energía Hidroeléctrica

EyMA Mayo – 2024

S. Gil

Introducción

La energía hidroeléctrica aprovecha la fuerza del agua para generar electricidad, transformando la energía potencial del agua en lugares elevados, en energía mecánica y luego en energía eléctrica. Este proceso se realiza a través de turbinas y generadores en centrales hidroeléctricas, que pueden ser de embalse, de flujo de río o de bombeo. Las centrales de bombeo son únicas porque pueden almacenar energía al bombear agua hacia arriba durante la baja demanda y generar electricidad durante los picos de demanda. La energía hidroeléctrica es una fuente renovable y eficiente, contribuyendo significativamente a la producción de energía limpia en el mundo.

Sobre la base de la conservación de la energía, el ciclo de conversión que tiene lugar en una central hidroeléctrica se muestra esquemáticamente en la **Figura 1**.

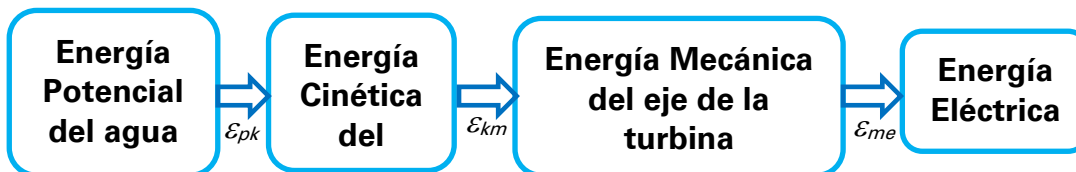


Figura 1. Procesos de conversión asociado al de una central Hidroeléctrica. Cada una de estos pasos tiene asociada una eficiencia de conversión característico.

La energía hidroeléctrica es una forma de energía renovable que se obtiene del aprovechamiento de la energía potencial del agua acumulada en alturas elevadas. Esta energía se transforma en energía cinética a medida que el agua desciende, impulsada por la gravedad, y finalmente se convierte en energía eléctrica mediante el uso de turbinas y generadores.



Figura 2. Ciclo hidrológico del agua en la generación hidroeléctrica. Como se ve claramente, la energía que hace posible este proceso, es la energía proveniente del sol. [1]

El proceso se basa en el ciclo hidrológico, ver **Figura 2**, que es impulsado por la energía del sol, y consiste en la evaporación del agua de mares y lagos, su precipitación como lluvia o nieve, y su retorno a los océanos a través de ríos y corrientes. Las centrales hidroeléctricas pueden ser de *embalse*, utilizando una presa para almacenar agua y liberarla según la demanda; *de pasada o desvío*, aprovechando el flujo natural de los ríos; o de *bombeo*, donde el agua se bombea a un depósito superior durante períodos de baja demanda y se libera para generar electricidad cuando la demanda aumenta. Estas instalaciones son altamente eficientes y pueden variar desde pequeñas centrales de pocos kW hasta grandes plantas de más de 10 GW.

La energía hidroeléctrica, una de las fuentes renovables más antiguas, pero sigue siendo un pilar fundamental en la generación de electricidad. A pesar de los desafíos planteados por el cambio climático, como sequías e inundaciones que pueden afectar su producción, se proyecta que su capacidad global aumentará un 17% para 2030, seguirá siendo la principal generadora de electricidad de fuentes renovables.

La energía hidroeléctrica, como fuente de energía renovable, presenta varias ventajas significativas. Es una fuente de energía baja emisiones y segura, ya que no produce emisiones directas de gases de efecto invernadero (GEI) ni residuos contaminantes durante su operación. Aunque como veremos más adelante, hay emisiones de metano y varios otros impactos ambientales. Es asimismo muy eficiente en la conversión de energía potencial en electricidad y ofrece una producción flexible que puede adaptarse a las fluctuaciones de la demanda energética. La hidroelectricidad también contribuye a la seguridad energética de los países y puede tener una larga vida útil con un mantenimiento adecuado.

Historia de la energía hidráulica

La energía hidroeléctrica ha sido utilizada durante siglos por la humanidad para proporcionar energía mecánica para diversas aplicaciones, su historia que se remonta a más de dos milenios y aún hoy es una fuente importante de electricidad limpia y sostenible. Desde las antiguas ruedas de agua hasta las modernas turbinas hidroeléctricas, esta forma de energía ha evolucionado significativamente. Antes de 1900, era la fuente energía mecánica dominante en industrias como el tejido y la molienda de cereales. Ver Figura 3, Figura 4.

La primera planta hidroeléctrica fue instalada en Appleton, Wisconsin en 1882, marcó el comienzo de una era de aprovechamiento del poder de los ríos para generar electricidad. Aunque su participación en la producción global de electricidad ha disminuido en comparación con otras fuentes renovables, la hidroelectricidad sigue siendo esencial para un futuro sostenible.



Figura 3. Los molinos hidráulicos de eje horizontal que se usaron en la antigua Roma, Grecia, y China. También fueron muy usados en la edad media.

La energía hidroeléctrica ha sido una fuente vital de energía a lo largo de la historia, transformando la fuerza del agua en electricidad y potencia mecánica. Las ruedas hidráulicas también impulsaron varias industrias a comienzos de la Revolución Industrial. Así llegamos a actualidad, con modernas turbinas que generan electricidad para millones de personas, esta forma de energía renovable ha demostrado ser eficiente y confiable. Las instalaciones varían enormemente en tamaño, desde pequeñas operaciones que alimentan comunidades aisladas hasta gigantescas plantas que proveen energía a naciones enteras. Además, la energía hidroeléctrica juega un papel crucial en la mitigación del cambio climático, ya que es una fuente de energía limpia que reduce la dependencia de los combustibles fósiles. Con el avance de la tecnología, se espera que la hidroelectricidad continúe expandiéndose y evolucionando, ofreciendo soluciones sostenibles para las crecientes necesidades energéticas del mundo.



Figura 4. Molino de agua. La energía potencial del agua, se convierte en energía de movimiento del molino.

Energía Hidráulica en la actualidad

Las centrales hidroeléctricas son fundamentales para la generación de energía renovable y tienen un papel importante en la infraestructura energética mundial. A pesar de su robustez y longevidad, el desarrollo de estas instalaciones debe considerar cuidadosamente los impactos ambientales, como la migración de peces y la calidad del agua.

La integración de la hidroelectricidad con otras fuentes renovables y su contribución al control de inundaciones demuestran su versatilidad y potencial para un futuro energético sostenible. Sin embargo, los desafíos planteados por el cambio climático requieren una planificación y gestión adaptativas para asegurar su viabilidad a largo plazo.

La energía hidroeléctrica representa una fuente significativa de energía renovable con un potencial teórico considerable, aunque su desarrollo enfrenta desafíos multifacéticos. Las preocupaciones ambientales, la disponibilidad de terrenos adecuados y las variaciones en el suministro de agua debido a cambios climáticos y demandas humanas, como la agricultura, son factores críticos que influyen en su expansión.

Sin embargo, también existen otras desventajas notables. La construcción de presas y reservorios puede tener un impacto ambiental significativo, alterando ecosistemas y afectando a las comunidades locales. Está sujeta a la variabilidad climática, lo que puede afectar la disponibilidad de agua y, por ende, la generación de energía. Por ejemplo, la Agencia Internacional de Energía (IEA) en su informe de 2023 destaca que, las emisiones energéticas habían aumentado ese año en 1.1% a nivel global, en gran medida a causa de la caída de la generación hidráulica mundial que ese año alcanzó el 40%, mostrando lo

vulnerable que esta esta fuente a la variación climática. Además, los costos iniciales de construcción son elevados y no todos los lugares son aptos para su desarrollo debido a requerimientos geográficos específicos.

La emisión de GEI por parte de las presas hidroeléctricas es una preocupación creciente, especialmente en regiones tropicales donde la producción de estos gases es sustancialmente más alta. En regiones tropicales, los embalses a menudo inundan grandes extensiones con frondosa vegetación. Además, los mismos ríos tributarios a estas presas arrastran material orgánico en forma permanente que finalmente se deposita en su fondo. Toda esta materia orgánica, se descompone en forma anaeróbica en el fondo, generando metano y otros GEI. Varias investigaciones recientes dan cuenta sobre una importante liberación de GEI de las aguas abajo de las presas, [2], [3] ya que estos datos raramente se monitorean y pueden tener un impacto significativo en la evaluación de la huella de carbono de los depósitos hidroeléctricos. Los estudios recientes que miden la variabilidad estacional y diaria en la emisión de los GEI sugieren que las operaciones hidroeléctricas podrían necesitar reevaluaciones más precisas para entender completamente su contribución al ciclo global del carbono. Algunas fuentes sugieren que las emisiones de algunas instalaciones hidroeléctricas podrían emitir tanto GEI como las que queman combustibles fósiles.

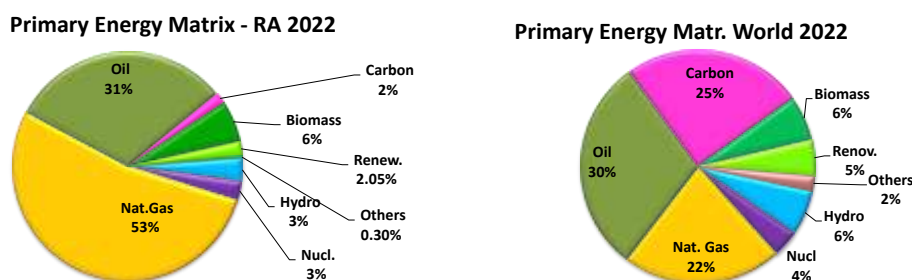


Figura 5. Matriz energética mundial (derecha) y de Argentina para el año 2022. LA energía hidroeléctrica (*Hydro*) constituyen el 6% y 3% respectivamente.

Tabla 1. Mayores centrales hidroeléctricas del mundo, con sus potencias y años de inicio de su producción.

| | Nombre | País | Potencia TW | Año de inicio de producción |
|---|----------------|-------------------|-------------|-----------------------------|
| 1 | Tres Gargantas | China | 22.5 | 2012 |
| 2 | Baihetan | China | 16.0 | 2022 |
| 3 | Itaipú | Brazil - Paraguay | 14.0 | 1984 |
| 4 | Xiluodu | China | 13.9 | 2014 |
| 5 | Belo Monte | Brazil | 11.2 | 2019 |
| 6 | Guri | Venezuela | 10.2 | 1969 |
| 7 | Wudongde | China | 10.2 | 2021 |

A pesar de estos desafíos, la energía hidroeléctrica sigue siendo una parte crucial de la matriz energética mundial, contribuyendo a la transición hacia fuentes de energía más sostenibles, aunque siempre se debe tener una mirada crítica a estas aseveraciones generales.

Aún con estos reparos, el potencial no explotado sigue siendo notable, y su aprovechamiento requiere inversiones financieras sustanciales y consideraciones estratégicas que van más allá de la generación de electricidad, incluyendo la gestión del agua, el control de inundaciones y el suministro de agua para necesidades agrícolas y recreativas.

La energía hidroeléctrica sigue siendo un componente vital en la matriz energética mundial, con países como China y Brasil expandiendo rápidamente su capacidad. A pesar de la madurez de las infraestructuras en los países de la OCDE, aún hay un potencial significativo para el crecimiento mediante la modernización y expansión de las instalaciones existentes. En general existe la expectativa que, con políticas adecuadas, se podría aprovechar aún más el potencial hidroeléctrico, especialmente a través de “pequeñas centrales hidroeléctricas” lo que podría añadir una capacidad considerable para el futuro cercano. En la Tabla 1 se indican las mayores centrales hidroeléctricas del mundo, con sus potencias y años de inicio de su producción. Por su parte la Tabla 2 muestra las mayores centrales hidroeléctricas de Argentina.

La capacidad hidroeléctrica de China ha experimentado un crecimiento significativo, reflejado en proyectos como la presa de las Tres Gargantas, que es la central eléctrica más grande del mundo con una generación anual de aproximadamente 84.7 mil TWh. A pesar de la poca información sobre todas sus represas, se estima que China posee una capacidad explotable de energía hidroeléctrica de 687 GW. Además, el país ha sido un actor clave en la construcción de represas a nivel mundial, lo que ha generado debates sobre los impactos ambientales y las cuestiones políticas relacionadas con los derechos del agua. La energía hidroeléctrica ofrece ventajas como la capacidad de almacenamiento y despacho, lo que es crucial ante el aumento global de la electrificación y la demanda de energía renovable. Al año 2023, la generación hidroeléctrica global, era similar a la combinación de la generación solar FV y eólica combinada, aunque no tenían la vertiginosidad, como se ve en la Figura 7.

Tabla 2. Principales centrales hidroeléctricas de Argentina, con sus potencias y años de inicio de su producción.

| | Nombre | Prov. País | Potencia TW | Año de inicio de producción |
|----------|--------------------------|------------------------------|--------------------|------------------------------------|
| 1 | Yacyretá | Corrientes y Paraguay | 3.1 | 1998 |
| 2 | Salto Grande | Entre Rios- Uruguay | 1.9 | 1979 |
| 3 | Piedra del Águila | Neuquén - Río Negro | 1.4 | 1992 |
| 4 | El Chocón | Neuquén - Río Negro | 1.3 | 1973 |
| 5 | Alicurá | Neuquén - Río Negro | 1.1 | 1985 |
| 6 | Río Grande | Córdoba | 0.8 | 1986 |
| 7 | Futaleufú | Chubut | 0.5 | 1978 |

La energía hidroeléctrica se destaca por su *capacidad de almacenamiento y despacho*, permitiendo una gestión flexible de los recursos hídricos para la generación de electricidad. En otras palabras, la hidroelectricidad es una forma de energía despachable, pero con algunas restricciones. Esta característica es cada vez más valiosa en el contexto actual de creciente electrificación global y de uso intensivo de fuentes renovables. La capacidad de *almacenamiento por bombeo* ha experimentado un notable crecimiento, reflejando la importancia estratégica de esta forma de energía. [4] Ver Figura 6. Además, estas *centrales de bombeo* tienen mucha complementariedad con otras fuentes renovables

intermitentes, como la eólica y la solar, ya que potencia su rol en la transición energética hacia sistemas más sostenibles y confiables. Al año 2020, el 92% de la capacidad de almacenamiento de energía eléctrica se hacían en centrales de bombeo, ver Figura 8. Aún en Argentina ya existe al menos una central de este tipo, el Complejo hidroeléctrico Río Grande en Córdoba. [5]

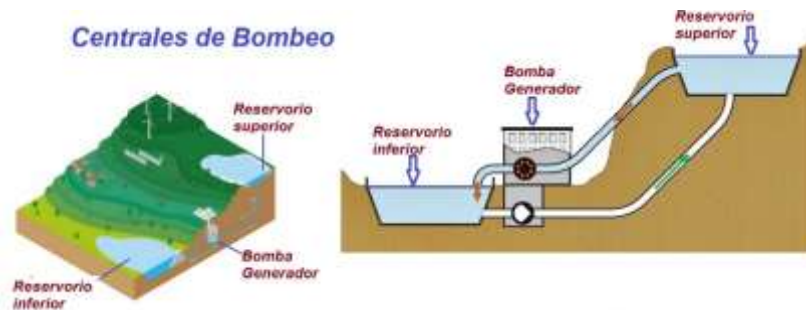


Figura 6. Centrales de bombeo, consistente en dos reservorios de agua a distintas alturas. Cuando no hay demanda de energía, se usa esta para bombear agua al reservorio superior. Cuando la demanda se incrementa, se usa la energía potencial del agua en el reservorio superior, para generar electricidad.

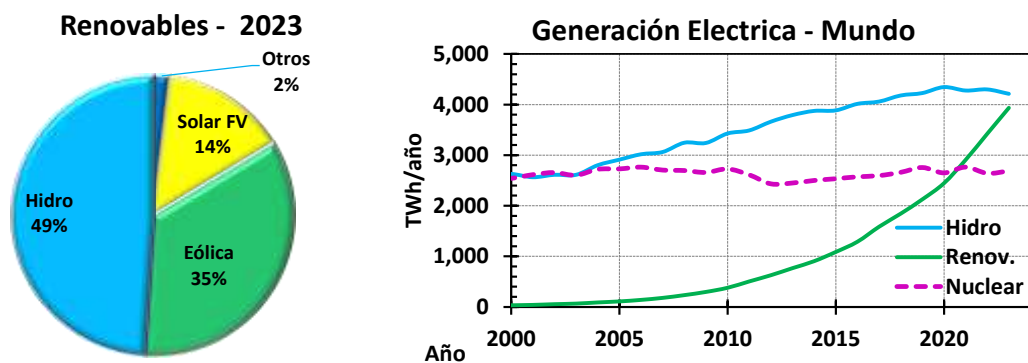


Figura 7. Izquierda, distribución de las energías renovables (incluyendo la hidráulica) en 2023 en el mundo. Derecha, variación de la generación eléctrica con fuentes hidroeléctricas, renovables (Eólica + Solar FV) y nuclear. [6]



Figura 8. Capacidad de almacenamiento de electricidad por tecnología en el mundo a 2020. [7]

La energía hidroeléctrica es un ejemplo fascinante de cómo la naturaleza y la tecnología pueden trabajar juntas. Utilizando el *ciclo hidrológico natural*, que involucra la evaporación y condensación del agua, las plantas hidroeléctricas convierten la energía potencial del agua en altura en energía eléctrica. A medida que el agua fluye hacia abajo debido a la gravedad, su energía potencial se transforma en energía cinética, que luego se utiliza para mover turbinas y generar electricidad. Ver Figura 9. Este proceso es un componente clave de las estrategias de energía renovable, aprovechando los recursos naturales sin emitir gases de efecto invernadero. Desde luego, no toda la energía potencial del agua, se transforma energía potencia del agua, algo de energía se pierde en la fricción

con el canal de salida (*penstock*), caracterizada por una eficiencia de conversión: ϵ_{pk} . Asimismo, hay pérdidas de energía en la transformación de energía cinética en energía de rotación de la turbina (ϵ_{km}) y por último también en el generador eléctrico (ϵ_{me}). La eficiencia total de la transformación de energía potencial en energía eléctrica de todo el proceso será: $\epsilon_{HE} = \epsilon_{pk} \times \epsilon_{km} \times \epsilon_{me}$.

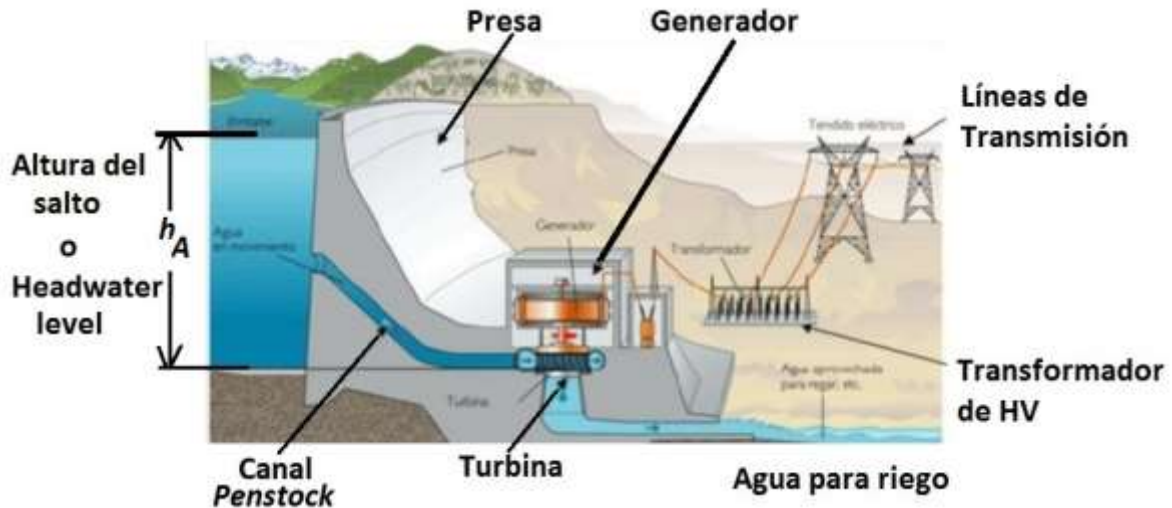


Figura 9. Esquema de una central hidroeléctrica moderna.

El nivel *altura de carga*, o *altura del salto* o “*headwater level*”, h_A , se define como la diferencia entre la altura máxima del agua en la represa y la altura del nivel del agua, después que pasó por la turbina.

La *altura de carga* es directamente proporcional a la energía potencial. Cuando una masa de agua m_a , se mueva desde el nivel máximo al nivel mínimo tenemos la siguiente variación de energía potencial:

$$E_p = m_a \cdot g \cdot h_A, \quad (\text{xx.1})$$

Al llegar a la turbina esta energía, menos las pérdidas, se transforma en energía cinética del agua, E_k .

$$E_k = \epsilon_{pk} \cdot E_p = \epsilon_{pk} \cdot m_a \cdot g \cdot h_A = \frac{1}{2} \epsilon_{pk} \cdot m_a \cdot v^2, \quad (\text{xx.2})$$

siguiendo esta secuencia, la energía eléctrica que finalmente obtenemos de la turbina, será:

$$E_E = \epsilon_{HE} \cdot m_a \cdot g \cdot h_A. \quad (\text{xx.3})$$

En esta eficiencia se tiene en cuenta la eficiencia del agua en transmitir su energía en las paletas o alabes (ϵ_{km}) de las turbinas y la eficiencia del generador eléctrico (ϵ_{me}). Si llamamos Q_a al flujo volumétrico de agua (m^3/s), si ρ es la densidad del agua ($1000\text{kg}/\text{m}^3$), $dm_a/dt = \rho \cdot Q_a$, por lo que la potencia de la central hidroeléctrica será:

$$P_E = \epsilon_{HE} \cdot \rho \cdot g \cdot Q_a \cdot h_a. \quad (\text{xx.4})$$

Si expresamos h_a en metro, Q_a en m^3/s y ρ y g en unidades MKS, la P_E estará expresada en Watts. Así vemos que la potencia de una central hidroeléctrica depende básicamente de dos parámetros, h_a y Q_a .

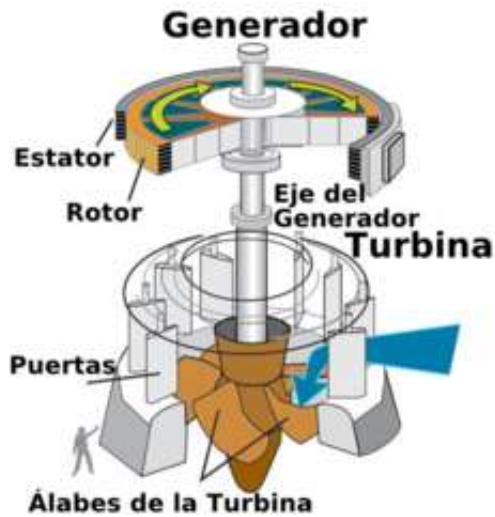


Figura 10. Esquema de una turbina asociada a su correspondiente generador.
Tipos de Turbinas

Según el caudal y características de la central, se usan diversos tipos de turbinas, siendo los más comunes los ilustrados en la **Figura 11**. En la **Figura 12** se muestra alturas y caudales, donde se puede apreciar las turbinas más adecuadas para cada caso.



Figura 11. Diferentes tipos de turbinas, en la *Peltron* el sentido de la velocidad del agua se desvía poco de su dirección inicial, siendo la incidencia perpendicular al eje de la turbina. En la *Kaplan*, la velocidad de entrada es paralela al eje de la turbina. En la *Francis*, la velocidad del agua cambia 90° su dirección.

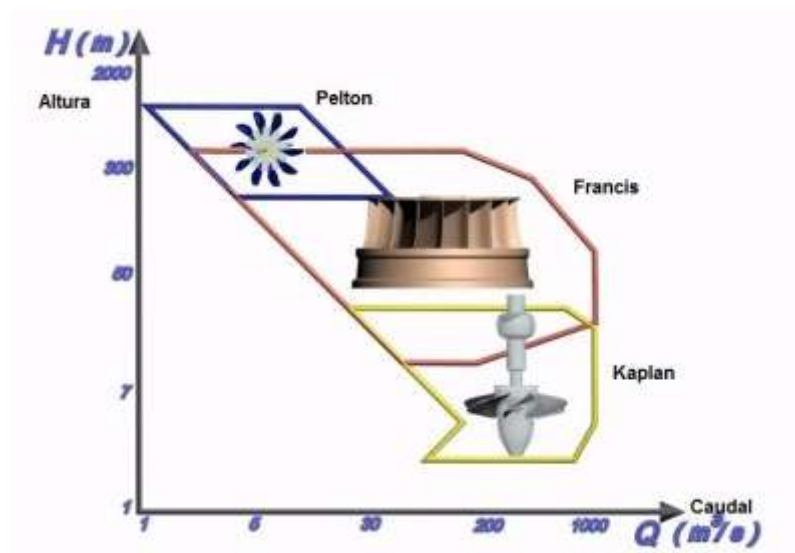


Figura 12. Este esquema ilustra cómo según el caudal y la altura del salto, que turbina es la más conveniente.

La capacidad de generación varía ampliamente, desde microsistemas hasta instalaciones de gran escala.

Ejemplo 1. Consideremos una central hidroeléctrica como la de Salto Grande con un caudal de turbinado de unos $8.400 \text{ m}^3/\text{s}$ y una altura de salto $h_A = 39 \text{ m}$. ¿Cuál es la máxima potencia que la central podría generar? Según la Ec.(xx.4), $P_{E_Max} = \rho \cdot g \cdot Q_a \cdot h_A \approx 9.8 \times 8.4 \times 39 \text{ MW} = 3200 \text{ MW}$. La potencia eléctrica máxima es de central es de 1900 MW , por lo que $\varepsilon_{HE} \sim 0.6$.

Generación hidroeléctrica

Las centrales Hidroeléctricas tienen ventajas y desventajas: en ente las primeras:

Ventajas:

- ✓ No requieren combustible, el ciclo de agua, evaporada por el Sol y que vuelve en forma de nieve o lluvia, es la fuerza impulsora. No tiene un costo económico.
- ✓ Es relativamente limpia, pues no contamina ni el aire ni el agua.
- ✓ A menudo puede brindar otros beneficios, como riego, protección contra las inundaciones, suministro de agua, caminos, navegación y posibilita deportes náuticos y el turismo.
- ✓ Los costos de mantenimiento y explotación son bajos.
- ✓ Las obras de ingeniería necesarias para aprovechar la energía hidráulica son de larga duración, varias décadas.
- ✓ Las turbinas hidráulicas son máquinas simples, eficiente y segura. Puede ponerse en marcha y detenerse con rapidez y requiere poca vigilancia siendo sus costes de mantenimiento, por lo general, reducidos.
- ✓ General una energía despachable, es decir pueden responder a las demandas, dentro de ciertos límites.
- ✓ Se combinan muy bien con la generación Eólica y solar, compensando su intermitencia.
- ✓ Pude usarse para almacenar energía por algunas horas.

Desventajas:

- ✓ Los costos de instalación iniciales son muy altos. “*Upfront cost*” elevados.
- ✓ Su ubicación, está *condicionada por la geografía natural*, suele estar lejos de los centros de consumo y obliga a construir un sistema de transmisión de electricidad, aumentando los costos de inversión y de mantenimiento y aumentando la pérdida de energía.
- ✓ La *construcción implica mucho tiempo* en comparación con la de las centrales termoeléctricas.
- ✓ El espacio necesario para el *embalse inunda muchas hectáreas de terreno*.
- ✓ La disponibilidad de energía puede fluctuar, de acuerdo con el régimen de lluvias, de estación en estación y de año en año. Vulnerable a los cambios climaticos.
- ✓ Puede afectar significativamente el ecosistema.
- ✓ Si inunda bosques, esta materia orgánica al descomponerse de forma anaeróbica en el fondo de la represa, *genera gases efecto de Invernadero*, que muchas veces se ignora.
- ✓ Las represas pueden tener efectos significativos en los *ecosistemas acuáticos*, especialmente en las rutas migratorias de especies como el salmón. Estos peces realizan impresionantes viajes río arriba para reproducirse, y las barreras físicas

como las represas pueden interrumpir su ciclo natural. Afortunadamente, soluciones ingeniosas como las escaleras para peces ayudan a mitigar estos impactos, permitiendo a los peces sortear los obstáculos y continuar con su migración vital.



Figura 13. Esquema de una central hidroeléctrica de pasada, aprovecha el flujo natural de los ríos para generar electricidad, sin la necesidad de grandes represas que acumulen agua. Este tipo de instalación es ideal para lugares con ríos que tienen un descenso constante, permitiendo así la producción de energía eléctrica de manera más sostenible y con menor impacto ambiental.

Tipos de Centrales Hidroeléctricas

Central Hidroeléctrica de Pasada. Es una central hidroeléctrica fluyente se caracteriza por no tener una acumulación significativa de agua "corriente arriba" de sus turbinas. En cambio, estas turbinas son movidas por la corriente natural del río. Algunas centrales con presas tampoco pueden retener el agua por mucho tiempo. Las turbinas deben operar con el caudal disponible, que varía a lo largo del día, las estaciones y según el clima. Cuando el caudal es bajo, la potencia generada disminuye, y en caso de exceso de agua, esta debe ser desviada a tiempo según lo planificado en la construcción de la central.

Según su potencia instalada, las centrales hidroeléctricas pueden ser:

- ✓ Centrales hidroeléctricas de gran potencia: más de 10MW de potencia eléctrica.
- ✓ Minicentrales hidroeléctricas: entre 1MW y 10MW.
- ✓ Microcentrales hidroeléctricas: menos de 1MW de potencia.

Curvas de Carga: Las curvas de carga eléctrica de un país representan la variación de la demanda de electricidad a lo largo del tiempo. Estas curvas muestran cómo cambia la cantidad de electricidad consumida por los usuarios en diferentes momentos del día, semanas, meses o incluso años. En la **Figura 14** se muestra una curva de carga de Argentina en una día de verano típico, c.2021. [8]

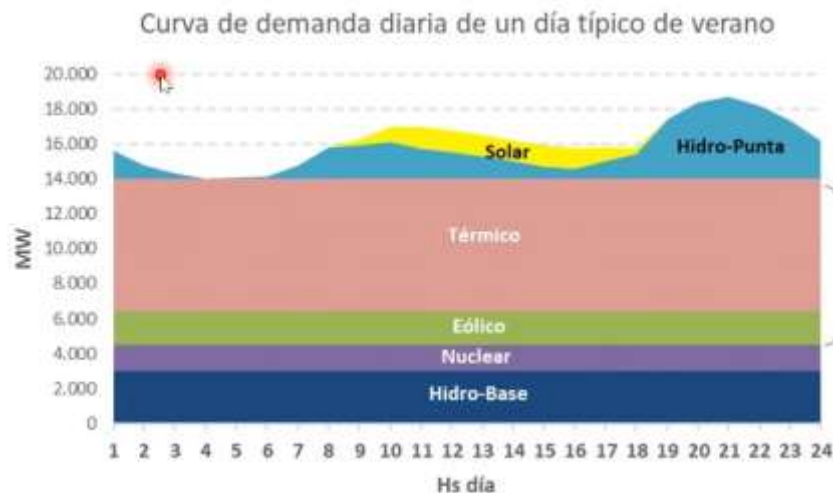


Figura 14. Curva de carga o consumo de electricidad de Argentina para un día típico de verano de 2021. Para responder esta demanda en general se usan centrales hidroeléctricas de punta, junto a centrales térmicas para responder esta variación de la demanda. La variación del consumo de las distintas fuentes esta ilustrada por el color de las bandas. [8]

Almacenamiento de energía – Energy Storage

¿Cómo se almacena la energía renovable para cuando el sol no brilla y el viento no sopla? Esa es una de las cuestiones más que se interponen en el camino de una red eléctrica más limpia. Los bancos de baterías podrían ser una respuesta. Pero son caros y por ahora solo capaces de almacenar energía durante unas pocas horas, no para largos períodos de tiempo nublado o calma. Su capacidad de almacenamiento es limitada. Por ahora, o se pueden de una estación a otra. Una posible estrategia es utilizar el excedente de energía para calentar una gran masa de materia a temperaturas ultra altas y luego aprovechar la energía según sea necesario, pero de nuevo se tratan de ideas en desarrollo, no soluciones maduras de las que se pueda hacer depender un sistema eléctrico. Otras ideas consisten en hacer edificios que levantan bloques de cemento y almacenen la energía como energía potencial. Aún estas ideas, no es claro cuál es la magnitud de la energía que se pueda almacenar, por cuanto tiempo, y menos su costo y de dependibilidad o confiabilidad.

Las tecnologías de almacenamiento varían desde métodos mecánicos como el bombeo hidroeléctrico hasta soluciones electroquímicas como las baterías de iones de litio, que han visto una reducción significativa en costos y son cada vez más populares. Estos sistemas no solo mejoran la eficiencia energética, sino que también promueven la independencia energética y apoyan la descarbonización de los sistemas energéticos.

Pero como se indico previamente, el *almacenamiento por bombeo* es la tecnología más utilizada actualmente. [4] Ver Figura 6. Las *centrales de bombeo* tienen mucha complementariedad con otras fuentes renovables como la eólica y la solar. Al año 2020, el 92% de la capacidad de almacenamiento de energía eléctrica se hacían en centrales de bombeo, ver Figura 8.

Aquí se resumen algunos métodos y tecnologías en desarrollo:

- ✓ **Centrales de bombeo:** Como se indicó previamente, [4] Ver Figura 6, estas consisten en dos reservorios de agua a distintas alturas. Cuando no hay demanda de energía, se usa esta energía para bombear agua al reservorio superior. Cuando la demanda se incrementa, se usa la energía potencial del agua en el reservorio superior, para generar electricidad. Actualmente es la tecnología dominante en el mundo. Ver Figura 8.
- ✓ **Bancos de baterías:** Son una opción viable, pero actualmente son caros y solo pueden almacenar energía durante unas pocas horas, no para períodos largos sin sol o viento.
- ✓ **Almacenamiento térmico:** Utiliza el excedente de energía para calentar una gran masa de materia a temperaturas ultra altas, liberando la energía según sea necesario. Esta tecnología aún está en desarrollo y no es una solución madura.
- ✓ **Almacenamiento mecánico:** Ideas como edificios que levantan bloques de cemento para almacenar energía como energía potencial. Estas tecnologías también están en etapas experimentales y su capacidad y coste aún no están claros.
- ✓ **Sistemas de almacenamiento mecánico e hidráulico:** Incluyen el bombeo hidroeléctrico, donde el exceso de energía se utiliza para bombear agua a un embalse elevado, que luego puede generar electricidad cuando se necesite.
- ✓ **Baterías de iones de litio:** Cada vez más populares debido a la significativa reducción de costos y su versatilidad. Sin embargo, su capacidad para largos periodos de almacenamiento es limitada.
- ✓ **Baterías de flujo:** Como las de vanadio, que ofrecen ventajas en términos de vida útil y reciclaje, aunque también requieren más investigación y desarrollo para ser plenamente viables.

Los sistemas de almacenamiento de energía son esenciales para capturar la energía cuando la producción es alta y liberarla durante los picos de demanda, mejorando la eficiencia energética y apoyando la descarbonización de los sistemas energéticos. Cada tecnología tiene su papel único y, aunque algunas están más desarrolladas que otras, todas contribuyen a un futuro energético más sostenible.

Energía hidroeléctrica en Argentina

Como ve en la Figura 5 y la Tabla 2, la energía hidroeléctrica tiene un papel muy importante en Argentina. La mayor central argentina, en asociación con Paraguay es justamente Yacyretá que analizaremos brevemente. [9], [10], [11]

Yacyretá: La represa hidroeléctrica de Yacyretá (del guaraní "*tierra de la Luna*") es una central hidroeléctrica construida sobre los saltos de Yacyretá-Apipé en el río Paraná, entre la provincia argentina de Corrientes y el departamento Misiones de Paraguay. [11] Es una de las mayores obras de Latinoamérica. Para su funcionamiento fue necesario construir una gran represa o embalse sobre el río Paraná. El espejo de agua, o sea la superficie de agua de la represa, tiene unos 1600 km², equivalentes a unas 8 veces la ciudad de Buenos Aires.

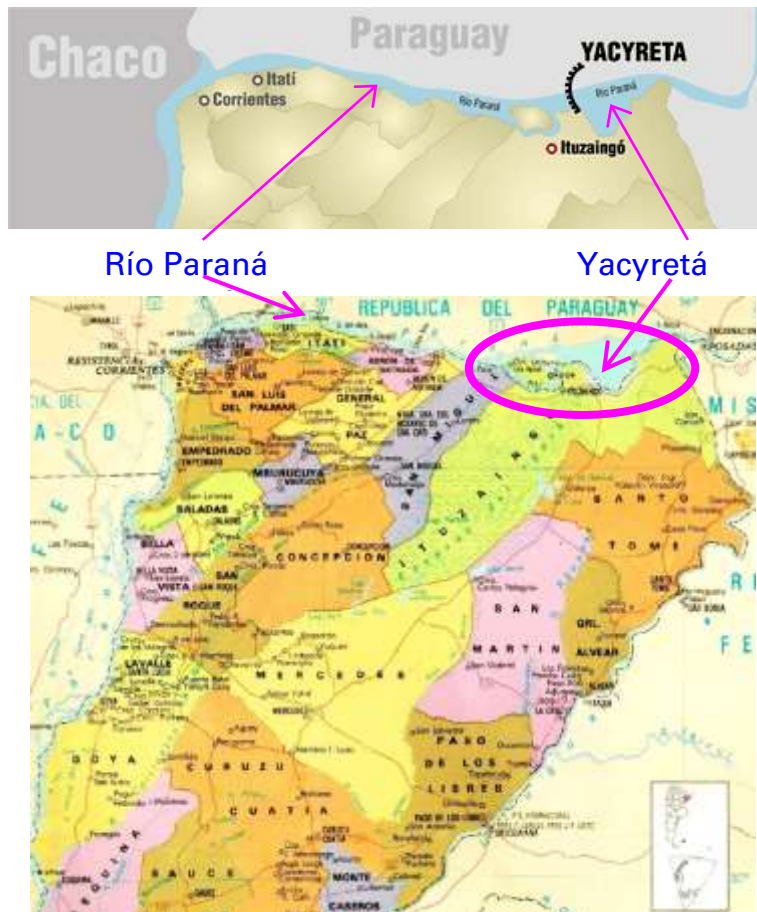


Figura 15. Mapa de la provincia argentina de Corrientes. En el norte puede observarse el curso del Río Paraná y la región del embalse de Yacyretá.



Figura 16. Embalse de Yacyretá. Área cuenca aportante: 970.000 km². Caudal promedio río Paraná: 12.000 m³/s. Potencia nominal 3200 MW.

En 1994 se inició el llenado del embalse hasta la cota de 76 metros (altura del nivel de agua del embalse, sobre el nivel del mar). Sin embargo, las primeras tratativas para la construcción de la represa se inician mucho antes, en 1925. En el año 1958 se crea la

Comisión Mixta Argentino-Paraguaya, encargada de desarrollar los estudios técnicos de aprovechamiento del río. En 1973 se suscribe el Tratado de Yacyretá, por el cual los dos Estados se comprometen a realizar la obra. Para ello se creó la Entidad Binacional Yacyretá, en condiciones igualitarias de las dos partes, la cual realizó los estudios preliminares, proyectó y ejecutó la obra.

La construcción se inicia en 1983. En el año 1993 se habilita un curso de navegación para salvar la diferencia de alturas. Los primeros generadores comenzaron a funcionar en 1994 y para 1998 ya funcionaban las 20 turbinas de esta primera etapa. Se tomaron muchas medidas para mitigar los efectos del impacto ambiental de la obra. Se creó un Plan de Manejo de Medio Ambiente para realizar la gestión ambiental en Yacyretá. Su objetivo es que las decisiones de operación y mantenimiento de la Central Hidroeléctrica, así como el manejo del embalse y otras actividades de la obra, estén en conformidad con las normas y procedimientos del desarrollo sustentable y la preservación del medio ambiente. En ese sentido se tomaron recaudos para posibilitar que los peces puedan moverse a lo largo del río. Con este fin se construyó un *ascensor de peces* que supera un desnivel de 23 metros. Otro impacto no menor es el social. Hubo que liberar las áreas a ser inundadas, realizando expropiación de inmuebles, relocalización de la población y crear nuevas actividades económico-productivas, y realizar una rehabilitación socioeconómica de la población reasentada. Desde luego, muchas de estas medidas causaron y siguen causando dificultades y controversias.

La potencia instalada total de Yacyretá, con las 20 turbinas, en 2022 alcanzaba los 3200 MW. Con esta potencia se puede abastecer el 7.1% del total de la demanda de electricidad argentina en 2023. Nivel de agua de 83 m (cota máxima de diseño), el espejo de agua ha anegando una zona en la vivían unas 80.000 personas.

A través de las 20 turbinas pueden pasar unos $12000 \text{ m}^3/\text{s}$ y la altura media del salto de agua es de unos 15m. Con la nueva cota a 83 m, la altura del salto es de $h_A \approx 21.3 \text{ m}$. Según la Ec.(xx.4) la potencia máxima esperada es: $P_{E_Max} = \rho \cdot g \cdot Q_a \cdot h_A \approx 9.8 \times 12 \times 21.3 \text{ MW} \approx 3100 \text{ MW}$. Con una potencia pico de unos 2100 MW, $\varepsilon_{HE} \sim 0.68$. En este tipo de centrales eléctricas, el embalse sirve como acumulador de energía potencial. Esta energía se la produce cuando hay demanda de electricidad.

Es interesante comparar el flujo de Yacyretá con el de las Cataratas de Iguazú. Estas tienen 70 metros de altura y un caudal medio de $1750 \text{ m}^3/\text{s}$ (aproximadamente un noveno del caudal que pasa por Yacyretá).

La cantidad de agua que fluye por Yacyretá es de unos 52 millones de m^3 de agua por hora, o sea que por las 20 turbinas de Yacyretá pasa en una hora el equivalente al consumo de agua potable de 17 días de la ciudad de Buenos Aires. El embalse también actúa como acumulador de agua y energía. También puede atemperar crecientes y el embalse genera condiciones muy favorables para emprender desarrollos turísticos.

Otras tecnologías de aprovechamiento de energía hidráulica

Centrales mareomotrices con dique: Utilizan el flujo y reflujos de las mareas, es decir se aprovecha el fenómeno natural de las mareas. Las centrales mareomotrices transforman la energía derivada de las mareas en energía eléctrica. Las mareas son consecuencia de la

atracción gravitatoria la Luna, y en mucho menor medida del Sol, que alteran periódicamente el nivel del agua del mar. Las mareas de los océanos constituyen una fuente gratuita, limpia e inagotable de energía.

La energía mareomotriz ha experimentado un desarrollo significativo desde sus primeras implementaciones en la década de 1960. Con la construcción de la presa de mareas más grande en Corea del Sur y la introducción de más de 40 nuevos dispositivos entre 2006 y 2013, la tecnología ha avanzado rápidamente. Las turbinas, que son el corazón de estas tecnologías, han evolucionado para basarse en ejes verticales u horizontales, y algunas incluso están cerradas. Grandes empresas de ingeniería y fabricantes de turbinas han entrado en el mercado, lo que indica un creciente interés y confianza en la viabilidad de la energía mareomotriz como una fuente de energía renovable y sostenible.

La energía mareomotriz se divide en tres categorías principales:

- ✓ **Tecnologías de rango de marea:** Utilizan una presa u otra barrera para recolectar energía de la diferencia de altura entre la marea alta y la marea baja.
- ✓ **Tecnologías de corrientes de marea:** Introducidas con más de 40 nuevos dispositivos entre 2006 y 2013, estas tecnologías utilizan turbinas que pueden tener un eje vertical u horizontal.
- ✓ **Centrales mareomotrices sumergidas:** Utilizan la energía de las corrientes submarinas. Hay pocos prototipos en el mundo, y ninguna en el país.
- ✓ **Aplicaciones híbridas:** Combinan tecnologías de rango de marea con la planificación y diseño de nuevas infraestructuras para zonas costeras, presentando un gran potencial si se implementan adecuadamente.

Estas categorías representan las principales formas de aprovechar la energía de las mareas, cada una con sus propias tecnologías y aplicaciones específicas.

La central de La Rance, en el norte de Francia, funciona desde 1967. Consiste en una presa concurrida en el estuario del Río La Rance, donde las mareas alcanzan unos 13 m. La central consta de 24 turbinas y genera 240MW. Ha funcionado bien durante su vida útil sirvió de prototipo para proyectos similares. La central de Kislogubskaya, Rusia, está ubicada en el mar de Barentz, con una potencia de 400KW, fue la segunda de esta clase en el mundo. Otros prototipos se concretaron en Gran Bretaña y Canadá. [12] En general se construyen en zonas costeras donde hay grandes mareas y la geografía es apropiada. Por ejemplo, existen bahías o estuarios con una salida relativamente pequeña, que hace posible construir un dique a costos competitivos. Cuando la marea es alta, se llena el dique, cuando baja la marea se genera electricidad. Una limitación de este tipo de centrales es el alto costo de las obras civiles que eleva el precio de la electricidad que producen. En Argentina no disponemos de este tipo de centrales.

- ✓ **Centrales undimotrices:** Aprovechan el movimiento de las olas. Estas centrales utilizan la energía de las olas del mar que son generadas por los vientos (no las mareas que las produce la atracción gravitatoria lunar). Un modo de funcionamiento de estas centrales consiste en un dispositivo anclado en el fondo del mar, unido a una boya por un cable, que tiene un generador eléctrico. El movimiento de la boya se utiliza para

accionar el generador. En Escocia se construyó un prototipo de unos 2 MW, que fue destruida por un temporal. En los últimos años, Bandon, al sur de Oregon (EE.UU.), la compañía irlandesa Finavera, instaló una boya experimental con un generador eléctrico. Se espera instalar otros prototipos en los próximos años. Son por ahora modelos experimentales aun en desarrollo, más que usinas comerciales.

Conclusión

En síntesis, la generación de la energía hidráulica se basa en un complejo mecanismo natural, simple de entender. El Sol es quien provee la energía para que todo el ciclo funcione. Evapora el agua, produciendo nubes que luego llenan el embalse. Una vez en el embalse, el agua tiene energía potencial que puede almacenarse en la represa. Cuando se requiere energía se hace que ella pase por los turbo-generadores, que transforman la energía potencial del agua en energía eléctrica. Esta energía eléctrica viaja por los cables de alta tensión que la transportan por miles de kilómetros desde el embalse hasta los puntos de consumo.

Es interesante señalar que, en Argentina, como en muchos otros países existe una red interconectada o malla eléctrica que abarca casi todo el país. Las distintas centrales eléctricas alimentan esta red, como los afluentes de un río. Luego esta energía es consumida en distintos puntos del país. De este modo, la energía que no se consume en un punto puede ser aprovechada por otro que la necesita. Esto optimiza el sistema de transporte de energía.

Asimismo, existen otros tipos de aprovechamientos de la energía hidráulica, como la de las mareas, las olas, etc. Sin embargo, el grado de desarrollo y madures de estas tecnologías es aun escaso. Por el momento, la energía hidroeléctrica basada en grandes embalses es aun dominante en el mundo y Argentina.

Problemas

- 1) A) Calcule la potencia eléctrica de una central hidroeléctrica (kW), si el salto de agua es de $h_A=25$ m, la turbina que emplea es tiene una eficiencia de $\varepsilon_{HE}=75\%$ y el caudal es de $500 \text{ m}^3/\text{s}$. B) si la central tiene un factor de desempeño del 35%, y funciona 11 meses al año. Cuanta energía produce al año en MWkh/año. C) cuantas viviendas puede esta central abastecer si su consumo medio es similar el argentino, de unos 3 MWh/año.
- 2) En un campo se dese bombear agua para el ganado a un tanque australiano. El consumo de agua 2000 litro/diarios. Si se bombea agua desde unos 50 metros de profundidad. A) Calcular la potencia mecánica necesaria para llenar el tanque en 5 horas con un rendimiento del 55%. B) si tiene un molino de viento de 8 pies (2,4m de diámetro) y el viento sopla a unos 25 km/h al menos 6 horas por día. ¿Se podrá bombear esta agua? C) Si desea hacer lo mismo con una bomba eléctrica conectada a paneles solares, con una eficiencia de bombeo del 85% que área de paneles necesitaría, si la eficiencia de su bomba eléctrica es del 90%, en una zona con Radiación media de $4.5 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{día}$, con loa panales generando de 9:00 a 17:00 hs. La eficiencia de los paneles es del 21%. D) discuta las ventajas y desventajas de cada una de estas alternativas, incluyendo conectarse directamente a la red eléctrica, si esta estuviese disponible.
- 3) ¿Por qué muchos programas de promoción de energías sostenibles, favorecen el desarrollo de las centrales hidroeléctricas de paso, mas que les basada en embalses?

- 4) A diferencia de los paneles solares FV, ¿por qué las centrales hidroeléctricas de paso, tienen costos de operación y mantenimiento mayores que las solares FV?

Referencias

- [1] USGS, «Hydroelectric Power: How it Works,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/hydroelectric-power-how-it-works>.
- [2] «Study of the emissions of greenhouse gases produced by the packages of the hydroelectric power stations of Peru,» *Tecnia vol.31 no.2 Lima jul./dic. 2021 Epub 01-Jun-2021*, vol. 31, n° 2, p. 1, 2021.
- [3] E. Calamita y et al., «Unaccounted CO2 leaks downstream of a large tropical hydroelectric reservoir,» *ENVIRONMENTAL SCIENCES*, vol. 118, n° 25, p. e2026004118, 2021.
- [4] A. Blaker, M. Stocks, B. Lu y C. Cheng, «A review of pumped hydro energy storage,» *Prog. Energy*, vol. 3, n° 022003, pp. 1-18, 2021.
- [5] Wikipedia, «Complejo hidroeléctrico Río Grande,» 2024. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Complejo_hidroel%C3%A9ctrico_R%C3%ADo_Grande.
- [6] Our World in Data, «Electricity Mix,» 2024. [En línea]. Available: <https://ourworldindata.org/electricity-mix>.
- [7] China Energy Storage Alianza (CNESA), «CNESA Global Energy storage Project Database,» 2020. [En línea]. Available: <https://en.cnesa.org/latest-news/2020/5/28/cnesa-global-energy-storage-market-analysis-2020q1-summary>.
- [8] Cammesa, «Informe anual 2023,» Buenos Aires, 2023.
- [9] argentina.gov.ar, «Centrales Hidroeléctricas,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.argentina.gov.ar/economia/energia/energia-electrica/hidroelectrica/centrales-hidroelectricas>.
- [10] G. V. Malinow, «EN EL LARGO PLAZO, ¿QUÉ PAPEL PUEDE TENER EN NUESTRO PAÍS LA ENERGÍA HIDROELÉCTRICA?,» *Proyecto Energético*, vol. 33, n° 108, pp. 32-35, 2024.
- [11] Entidad Binacional Yaciretá, «Central Electrica Yaciretá,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.eby.org.ar/>.
- [12] D. MacKay, *Sustainable Energy – without the hot air*, UIT Cambridge, 2019.
- [13] D. Giancoli, *Physics Principles with Applications 7th Edition*, NY: Pearson, 2014.
- [14] . M. Zemansky, «Calor y Termodinámica (Trad. de: Heat and Thermodynamics - 5th Ed. McGraw Hill N.Y. 1968),,» Madrid 1975, Aguilar , 1975.
- [15] Y. Çengel, *Transferencia de Calor – Y. A. Çengel- 2da. Ed.*, Mexico DF, Excelente y muy completa presentación de la transferencia de calor, incluyendo conducción, radiación y convección.: Mc Graw Hill , 2004.
- [16] IRENA, «TIDALENERGY TECHNOLOGY BRIEF,» IRENA Ocean Energy Technology Brief 3, 2014.

Apéndice A: ¿Cómo se genera la energía eléctrica en una central hidroeléctrica?

Los generadores eléctricos son máquinas que transforman la energía mecánica en energía eléctrica. Esta transformación se consigue gracias a la ley de inducción de Faraday. [13]

Este principio fue descubierto por el físico Inglés Michael Faraday (1791-1871). Faraday nace en Newington, Gran Bretaña, en el seno de una familia humilde durante los turbulentos días de la Revolución Francesa. Su padre, James Faraday, era un hombre de poca

salud, se mudó a Londres cuando Michael era aún un niño. A los 13 años comenzó a trabajar como ayudante de mandados de un encuadernador y bibliotecario. Al poco tiempo Michael aprendió bien el oficio y aprovechó el contacto con los libros para aprender de ellos. Se puede decir que recién entonces fue cuando empezó el verdadero proceso de educación de Michael Faraday, quien fue un eximio autodidacta. Durante los 7 años que trabajó allí leyó libros de temas científicos y realizó experimentos en el campo de la electricidad, desarrollando un gran interés por la ciencia. A causa de esta precaria formación, Faraday no tenía muchos conocimientos de matemáticas, desconocía el cálculo diferencial, pero tenía una habilidad innata para trazar gráficos y realizar experimentos. Pronto se convirtió en uno de los más eminentes de los experimentadores del siglo XIX.



Figura 17. Fotografía de Michael Faraday

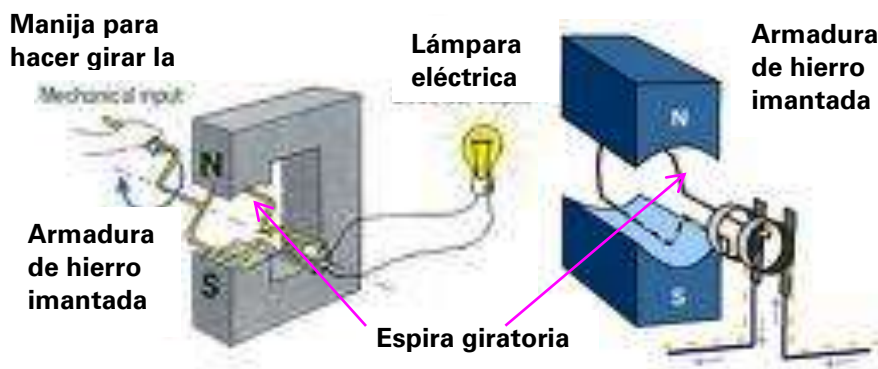


Figura 18. Principio de inducción de Faraday. Si una espira o bobina gira dentro del campo magnético de un imán (armadura de hierro imantada), se genera una corriente eléctrica que puede usarse para encender una lámpara u otra aplicación.

Fascinado por los fenómenos eléctricos que comenzaban a estudiarse, en el año 1813 le regalaron una entrada para escuchar una clase del eminente profesor de química de la “Royal Institution” (Instituto Real) de Londres, Sir Humphry Davy. Entusiasmado de lo que había escuchado, le escribió a Davy y le envió unas notas que había elaborado sobre la clase. Davy lo cito le ofreció un puesto de ayudante en el laboratorio de este destacado investigador. De ayudante del maestro se transformó en su sucesor en el Instituto Real, al cual permaneció ligado durante casi toda su vida. Con Davy tuvo la oportunidad de entrar en contacto con las ideas científicas más relevantes de la época. La celebridad de Faraday aumentó extraordinariamente en la década de 1820. ¡Años después, Davy solía comentar que el descubrimiento más importante de su carrera fue Faraday!

Uno de los múltiples descubrimientos de Faraday, fue que al hacer girar una espira o bobina dentro del campo magnético de un imán se generaba una corriente eléctrica. Con

estos descubrimientos se demostró que magnetismo y electricidad eran manifestaciones de un mismo fenómeno. El experimento de Faraday que diseñó para lograr la conversión del magnetismo en electricidad, parece algo muy sencillo. Con el tiempo dio origen a los grandes generadores que se utilizan en la actualidad para producir electricidad.

La *Ley de Inducción de Faraday* establece que un cambio en el flujo magnético a través de una bobina de alambre induce una fuerza electromotriz (voltaje) en el alambre. En otras palabras, cuando el campo magnético que atraviesa una bobina cambia, se genera un voltaje en la bobina. Esta ley es fundamental para el funcionamiento de generadores eléctricos, transformadores y muchos otros dispositivos eléctricos.

Volviendo a los generadores eléctricos, éstos funcionan gracias a la Ley de inducción de Faraday.