El rol cambiante de la energía hidroeléctrica: Desafíos y oportunidades



Este informe está dirigido a los responsables políticos y profesionales de la energía hidroeléctrica para crear conciencia entre las partes interesadas de IRENA sobre los desafíos y necesidades percibidos de la energía hidroeléctrica, y para servir como catalizador para el debate en el contexto del Marco de colaboración de IRENA sobre energía hidroeléctrica.

ISBN: 978-92-9260-522-3

La energía hidroeléctrica es un componente importante de los sistemas de energía en todo el mundo. Es la mayor fuente de electricidad renovable y puede permitir una mayor penetración de energías renovables variables, como la solar y la eólica, al proporcionar servicios de equilibrio y flexibilidad. Más allá de la electricidad, la energía hidroeléctrica también brinda otros servicios, incluido el almacenamiento de agua potable y de riego, una mayor resistencia a las inundaciones y las sequías, y oportunidades recreativas.

A pesar de ser la tecnología renovable más madura, la energía hidroeléctrica enfrenta una serie de desafíos. Estos incluyen la necesidad de garantizar la sostenibilidad y la resiliencia climática; flotas envejecidas y requisitos de inversión relacionados; la necesidad de adaptar la operación y el mantenimiento (O&M) a los requisitos del sistema eléctrico moderno; y estructuras de mercado y modelos comerciales obsoletos que no reconocen la gama completa de servicios proporcionados por la energía hidroeléctrica. A pesar de lo desafiante que es la situación actual, también presenta oportunidades para modernizar las centrales hidroeléctricas y equiparlas con los medios para continuar brindando servicios críticos a los sistemas de energía a nivel mundial.

Este informe está dirigido a los responsables políticos y profesionales de la energía hidroeléctrica dentro de los Estados miembros de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA). Su objetivo es crear conciencia entre las partes interesadas de IRENA sobre los desafíos y necesidades percibidos de la energía hidroeléctrica, y servir como catalizador para el debate en el contexto del Marco de colaboración de IRENA sobre energía hidroeléctrica. El informe también proporciona una instantánea del estado actual de la energía hidroeléctrica y presenta una visión de cómo se puede realizar todo su potencial.

INTRODUCCIÓN

Durante más de un siglo, la energía hidroeléctrica ha contribuido al desarrollo mundial mediante la generación de empleos locales y el suministro de electricidad limpia asequible y fiable. La energía hidroeléctrica es un componente muy importante de los sistemas de energía en todo el mundo. Es la mayor fuente de electricidad renovable y permite una mayor penetración de energías renovables variables como la solar y la eólica al proporcionar servicios de equilibrio y flexibilidad. La energía hidroeléctrica de almacenamiento por bombeo (PSH) es la fuente más grande de almacenamiento de energía, representando el 95% de la capacidad de almacenamiento de electricidad del mundo (DOE, 2020). Más allá de la electricidad, la energía hidroeléctrica también proporciona otros servicios, incluido el almacenamiento de agua potable y de riego, una mayor resiliencia a las inundaciones y sequías, y oportunidades recreativas.

Sin embargo, a pesar de ser la tecnología renovable más madura, la energía hidroeléctrica enfrenta desafíos. Estos incluyen la necesidad de garantizar la sostenibilidad y la resiliencia climática; abordar el envejecimiento de las flotas y la necesidad de nuevas inversiones; adaptación en términos de operación y mantenimiento (O&M) para cumplir con los requisitos modernos del sistema de energía; y estructuras de mercado y modelos de negocio actualizados que reconozcan y recompensen todos los servicios prestados por la energía hidroeléctrica más allá de la generación de energía.

La modernización, el uso de los últimos avances tecnológicos, junto con garantizar la sostenibilidad social y ambiental, son claves para superar estos desafíos. Debido a la creciente penetración de las energías renovables variables, y a medida que las centrales hidroeléctricas se ven cada vez más llamadas a operar fuera de las condiciones para las que fueron diseñadas originalmente, los mercados y los modelos de negocio tendrán que adaptarse y recompensar adecuadamente el conjunto completo de servicios proporcionados por la energía hidroeléctrica más allá de la generación de energía.

Este documento, producido en el contexto del Marco de Colaboración sobre Energía Hidroeléctrica de IRENA, está dirigido a los responsables políticos y profesionales de la energía hidroeléctrica. Proporciona una instantánea del estado actual de la energía hidroeléctrica y presenta una visión de cómo maximizar y realizar su potencial. No pretende proporcionar una evaluación exhaustiva de las tecnologías hidroeléctricas.

LA ENERGÍA HIDROELÉCTRICA HOY

Según las últimas perspectivas de transiciones energéticas mundiales de IRENA, la energía hidroeléctrica tendrá que desempeñar un papel crucial para mantener el aumento de las temperaturas globales a 1,5 grados centígrados (° C), proporcionando energía, flexibilidad y soporte confiable para los sistemas de energía (IRENA, 2022a). Sin embargo, para lograr esto, el ritmo de despliegue de la energía hidroeléctrica deberá aumentar sustancialmente, especialmente teniendo en cuenta el aumento previsto de la demanda de electricidad limpia debido a la descarbonización de los sectores de uso final y al rápido envejecimiento de la flota hidroeléctrica.

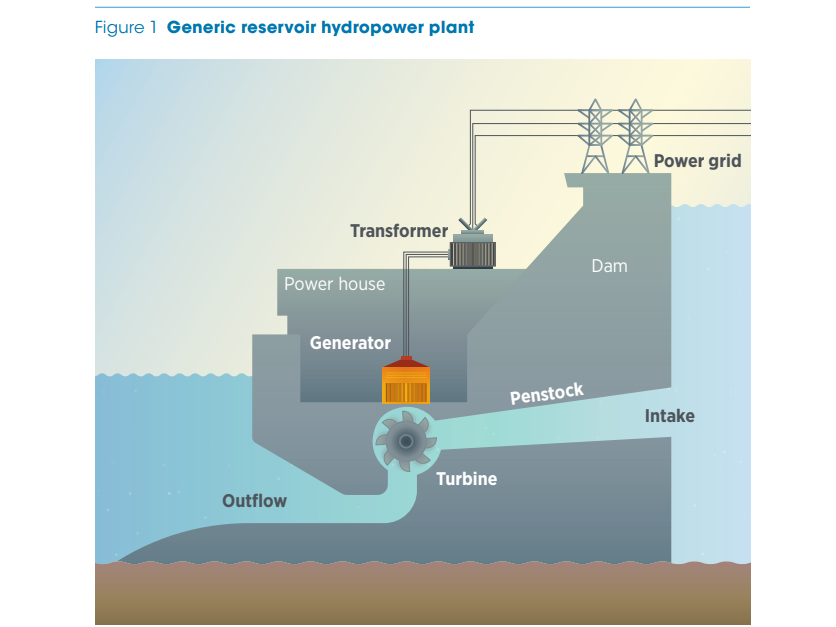
TECNOLOGÍAS HIDROELÉCTRICAS

La energía hidroeléctrica es una tecnología de energía renovable madura que se ha utilizado para producir electricidad baja en carbono durante más de cien años. Generalmente se clasifica en tres subtipos principales:

• Energía hidroeléctrica convencional

• Embalse o embalse: Este es el tipo más común de central hidroeléctrica, que utiliza una presa para almacenar agua en un embalse. El agua se puede almacenar para diversos propósitos, pero se alimenta principalmente a una turbina que hace funcionar un generador y produce electricidad.

• Run-of-river: Este tipo de planta canaliza el agua directamente de un río a una tubería para hacer girar la turbina. Por lo general, tiene muy poca o ninguna capacidad de almacenamiento.



• Energía hidroeléctrica de almacenamiento por bombeo (PSH): Esta planta almacena agua a diferentes elevaciones en un depósito inferior y superior. Durante los períodos de alta demanda, el agua se libera desde el depósito superior hacia el depósito inferior a través de una bomba-turbina reversible para generar electricidad. Este proceso se invierte durante los períodos de baja demanda, cuando el agua se bombea de nuevo al depósito superior. Las plantas PSH pueden ser sistemas de circuito abierto o cerrado. Los sistemas de circuito abierto utilizan una fuente de agua natural como depósito inferior, mientras que los sistemas de circuito cerrado no lo hacen. Si bien ambos embalses están "fuera del río" o fuera del canal, los sistemas de circuito cerrado generalmente tienen menos impactos ambientales. PSH puede desempeñar un papel crítico como fuente de almacenamiento de energía flexible en futuros sistemas de energía, permitiendo una mayor penetración de la generación variable de energía renovable, como la eólica y la solar.

Este informe considerará tanto la energía hidroeléctrica convencional como la de almacenamiento por bombeo.

SERVICIOS Y BENEFICIOS HIDROELÉCTRICOS

La energía hidroeléctrica es una fuente de electricidad renovable baja en carbono. Sin embargo, sus ventajas no se limitan a la generación de energía. De hecho, muchos de sus otros servicios son cada vez más importantes en el contexto de la transición energética y el cambio climático. Como se ve en la Tabla 1, las centrales hidroeléctricas ofrecen una amplia gama de servicios a la red que incluyen servicios auxiliares y de equilibrio, y disfrutan de un factor de alta capacidad en relación con otras fuentes de energía renovable. Además, la energía hidroeléctrica puede proporcionar servicios de agua como control de inundaciones, control de riego, distribución de agua y control de aguas residuales. Finalmente, las áreas de almacenamiento de agua pueden ofrecer valor recreativo a través de instalaciones como rampas para botes, playas, áreas de picnic y sistemas de senderos.

POTENCIAL

A pesar de ser la mayor fuente de energía renovable en términos de capacidad instalada y generación de energía, la energía hidroeléctrica aún no se ha explotado plenamente. Como se muestra en la Tabla 2, el potencial hidroeléctrico se ha estimado en una serie de estudios con resultados variables, aunque todos los resultados confirman que sigue habiendo un potencial considerable. Este hallazgo es particularmente importante cuando se considera que la energía hidroeléctrica es una de las formas más baratas de electricidad renovable y tiene valores nivelados del costo de la electricidad (LCOE) que se encuentran entre los más bajos de todas las tecnologías de generación de energía (véase la sección 2.5).

Gernaat et al. (2017) realizaron una evaluación de alta resolución del potencial hidroeléctrico global, concluyendo que el potencial hidroeléctrico global total es de alrededor de 50 petavatios hora por año (PWh / año). También estiman un potencial de 5,7 PWh/año por debajo de USD 0,1/kilovatio hora (kWh)1 y un potencial ecológico2 de 3,3 PWh/año por debajo de USD 0,1/kWh. Para poner esto en contexto, 3.3 PWh / año equivale a más de tres cuartas partes de la generación mundial de energía hidroeléctrica en 2018 (4.2 PWh / año). La mayor parte de este potencial se encuentra en Asia, América del Sur y África, regiones donde se espera un crecimiento continuo y un desarrollo económico.

La conservación de los glaciares debería ser, sin duda, una prioridad. El uso de estas áreas para el almacenamiento de agua podría mitigar algunos de los impactos del retroceso del hielo, como la disminución de los recursos hídricos y los cambios en la escorrentía. Un estudio de Farinotti et al. (2019) investiga el potencial hidroeléctrico que ofrecen las áreas que se espera que se liberen de hielo durante el transcurso de este siglo debido al cambio climático. En este estudio, estiman un potencial hidroeléctrico teórico de 0,8-1,8 PWh/año, de los cuales alrededor del 40% sería factible para la realización (0,3-0,7 PWh/año). Tres cuartas partes del volumen potencial de almacenamiento podrían estar libres de hielo ya en 2050. En este caso, se estima que el volumen de almacenamiento previsto sería suficiente para retener aproximadamente la mitad de la escorrentía anual que sale de estos sitios.

La energía hidroeléctrica también puede proporcionar servicios de almacenamiento de energía a largo plazo a través de configuraciones PSH. Como se ve en la Figura 2, la Universidad Nacional de Australia, en su Global Pumped Hydro Atlas, identificó 616 000 sitios PSH potencialmente factibles a nivel mundial con un potencial de almacenamiento de 23 teravatios hora (TWh) (RE100, 2019). Del mismo modo, Hunt et al. (2020) estiman que el potencial de PSH estacional por debajo de un costo de USD 0.05 / kWh es de 17.3 PWh / año, lo que justifica el gran potencial con un menor requerimiento de tierra de PSH estacional en comparación con las represas hidroeléctricas convencionales. Este potencial es sustancialmente mayor que el almacenamiento requerido por la transición, que es aproximadamente equivalente al 80% de la generación de electricidad del mundo y extremadamente importante para la industria hidroeléctrica, dado el creciente valor de su flexibilidad y capacidades de equilibrio.

Por último, la energía hidroeléctrica no necesariamente debe considerarse de forma aislada. Algunos sitios ofrecen la posibilidad de desarrollar proyectos híbridos (por ejemplo, eólica / hidroeléctrica o fotovoltaica flotante [PV] / hidroeléctrica), abriendo la posibilidad de desplegar aún más capacidad renovable. Según un estudio, el potencial técnico para instalar energía solar fotovoltaica flotante en los embalses existentes en todo el mundo alcanza los 4,2-10,6 PWh / año (Lee et al., 2020), equivalente a más de un tercio de la generación de electricidad del mundo.

IMPLEMENTACIÓN ACTUAL

La energía hidroeléctrica es la tecnología de energía renovable más madura, con sus primeros proyectos que datan de finales de 1800. La figura 3 muestra que se han logrado avances significativos, con la energía hidroeléctrica convencional creciendo en más del 75% en 2000-2021, alcanzando una capacidad instalada de más de 1 230 gigavatios (GW). La capacidad de PSH, por otro lado, creció más del 50% en el mismo período, alcanzando los 130 GW en 2021. Juntos, representan más del 50% de la capacidad instalada renovable mundial.

En términos de distribución geográfica, la Figura 4 muestra que la mayoría de la capacidad hidroeléctrica del mundo se encuentra en Asia (42%), seguida de Europa (17%), América del Norte (15%), América del Sur (13%), Eurasia (7%) y el resto del mundo (6%). Cabe destacar que para la mayoría de las regiones, PSH representa el 9-13% de la capacidad hidroeléctrica instalada total; sin embargo, está casi completamente ausente en América Latina, aparte de algunas plantas en América del Sur (<1 GW).

La energía hidroeléctrica es también la mayor fuente de electricidad renovable a nivel mundial. Como se muestra en la Figura 5, la energía hidroeléctrica generó aproximadamente 4,3 PWh de electricidad a nivel mundial en 2019, lo que equivale al 65% de toda la generación renovable o más del 16% de toda la generación de electricidad. Esto hace que la energía hidroeléctrica sea extremadamente importante no solo como fuente de generación renovable, sino también para los sistemas de energía en todo el mundo, particularmente porque la energía hidroeléctrica también puede ofrecer flexibilidad limpia y servicios de equilibrio a las redes eléctricas. China es el mayor productor de energía hidroeléctrica a nivel mundial (1,3 PWh/año), seguido de Brasil (0,4 PWh/año), Canadá (0,4 PWh/año) y Estados Unidos (0,3 PWh/año).

Como muestra la Figura 6, más allá de estos números, hay aproximadamente 650 GW de energía hidroeléctrica ya en la cartera de proyectos con planes para entrar en funcionamiento en los próximos 25 años, incluidos 136 GW de PSH3 (S&P Global, 2022). La gran mayoría de estos proyectos se desplegarán en Asia, que representa casi el 60% de la capacidad convencional y más del 50% de la capacidad total de PSH en la cartera de proyectos.

En términos de energía hidroeléctrica convencional, América del Sur y África siguen con el 14% y el 12% de la capacidad en la tubería, respectivamente. En términos de PSH, Europa y América del Norte siguen a Asia, con el 21% y el 17% de la tubería, respectivamente. Similar a lo que se observó anteriormente, prácticamente no hay proyectos de PSH en tramitación en América Latina, a excepción de los 300 megavatios (MW) en Chile.

COSTOS Y TENDENCIAS DE INVERSIÓN

Los costos hidroeléctricos son específicos del sitio y dependen del tamaño y la especificación de un proyecto, siendo el componente de costo más grande las obras civiles, que representan aproximadamente el 45% de los costos e incluyen la construcción de la presa, los túneles, el canal y la central eléctrica, así como cualquier otra infraestructura necesaria para acceder al sitio. Esto es seguido por los costos de adquisición del equipo electromecánico, que representan aproximadamente el 33% de los costos totales (IRENA, 2022d).

Los costos totales instalados para las centrales hidroeléctricas recién puestas en marcha han aumentado en la última década. El costo total promedio ponderado mundial de la nueva energía hidroeléctrica en 2021 fue de USD 2 135 / kW para proyectos grandes y USD 2 000 / kW para proyectos pequeños. El aumento en los costos totales instalados podría atribuirse en parte al hecho de que los mejores sitios hidroeléctricos ya se han desarrollado y los países ahora están tratando de desarrollar energía hidroeléctrica en sitios menos que ideales con costos instalados más altos que el promedio. Otro componente importante es la proporción de nuevos despliegues en cada región, ya que tienen diferentes costos (por ejemplo, los costos totales instalados para grandes centrales hidroeléctricas son más altos en Oceanía y América Central y el Caribe, mientras que los más bajos se encuentran en China e India) (IRENA, 2022d).

A pesar de ser altamente intensiva en capital, la energía hidroeléctrica es una de las fuentes más baratas de electricidad. Como se ve en la Figura 8, el LCOE promedio ponderado global de los proyectos hidroeléctricos a escala de servicios públicos fue de USD 0.048 / kWh en 2010-2021, más bajo que cualquier alternativa basada en combustibles fósiles y solo superado por el LCOE de la energía eólica terrestre. Los valores de LCOE pueden variar sustancialmente, primero debido a los costos de inversión, que dependen del sitio, pero también dependiendo de cómo está diseñada la planta para operar (para proporcionar carga base o pico, servicios auxiliares, etc.) y los factores de capacidad logrados (IRENA, 2022d).

Tendencias de inversión

El despliegue de energía renovable está creciendo a un ritmo considerable, atrayendo USD 1,8 billones en inversión entre 2013 y 2018 (IRENA y CPI, 2020). Sin embargo, a pesar de ser una de las fuentes más baratas de electricidad renovable, durante la última década, las inversiones en energía hidroeléctrica se han visto empequeñecidas por las inversiones en tecnologías solares fotovoltaicas y eólicas, como se muestra en la Figura 9. Durante ese mismo período, se invirtieron aproximadamente USD 72 mil millones en energía hidroeléctrica. Esta cantidad equivale a aproximadamente el 4% de todas las inversiones en energía renovable, una cantidad relativamente pequeña, especialmente si se considera que es una tecnología madura que genera alrededor del 65% de toda la electricidad renovable.

La figura 10 ofrece una visión general de los compromisos financieros en energía hidroeléctrica entre 2013 y 2018. Como puede verse, las inversiones en energía hidroeléctrica disminuyeron gradualmente de 2013 a 2016 antes de aumentar sustancialmente en 2017. En conjunto, las inversiones hidroeléctricas en 2017 y 2018 totalizaron USD 26 mil millones y USD 15 mil millones, respectivamente, y fueron mayores que las inversiones combinadas en los cuatro años anteriores. Finalmente, en términos de abastecimiento, el 75% de los USD 72 mil millones invertidos entre 2013 y 2018 correspondieron a inversión pública, dejando al sector privado con solo una cuarta parte de la inversión total durante ese período (IRENA y CPI, 2020).

DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES ACTUALES

A pesar de ser la tecnología renovable más madura, la energía hidroeléctrica no está exenta de desafíos. Estos incluyen los cambios en los flujos de agua debido al cambio climático, los impactos sociales y ambientales, el envejecimiento de la flota y los requisitos cambiantes del sistema de energía que requieren cada vez más que las centrales hidroeléctricas operen de maneras para las que no fueron diseñadas originalmente. Estos desafíos requieren inversiones adicionales en energía hidroeléctrica en forma de modernización, incluida la renovación, y nueva capacidad para hacer frente a los requisitos actuales y futuros del sistema eléctrico. Atraer financiamiento es un desafío debido a la naturaleza del desarrollo de la energía hidroeléctrica y sus plazos, un tema que se abordará en este capítulo. También es importante la necesidad de nuevos modelos de negocio y estructuras de mercado que recompensen adecuadamente los servicios, distintos de la generación de energía, que la energía hidroeléctrica puede proporcionar y que son cada vez más valiosos, como la flexibilidad y los servicios de equilibrio.

FLOTA ENVEJECIDA

La energía hidroeléctrica ha estado proporcionando electricidad renovable en todo el mundo durante más de un siglo. Inevitablemente, esto también significa que un gran número de centrales eléctricas son bastante antiguas, dada su vida útil extremadamente larga. Históricamente, la vida útil de las centrales hidroeléctricas ha variado sustancialmente de una planta a otra, desde menos de 10 hasta más de 100 años. Un análisis de la flota hidroeléctrica mundial muestra que la edad promedio de las centrales hidroeléctricas en operación es cercana a los 40 años, mientras que la vida útil promedio de las centrales hidroeléctricas ya retiradas fue de alrededor de 60 años (S&P Global, 2022).

La Figura 11 proporciona un desglose de la capacidad hidroeléctrica mundial por año de puesta en marcha. Los datos respaldan los puntos planteados anteriormente, mostrando que las centrales hidroeléctricas están realmente envejecidas. Sin embargo, también indican que más del 50% de la capacidad instalada de energía hidroeléctrica del mundo (aproximadamente 620 GW) tiene más de 30 años y aproximadamente el 25% (aproximadamente 275 GW) tiene más de 50 años. Estos valores son solo indicativos ya que algunas de estas plantas ya han sido renovadas. Una visión general detallada y precisa de la vida útil restante de la flota mundial de energía hidroeléctrica requeriría una evaluación planta por planta. Sin embargo, está claro que el envejecimiento de las flotas ya presenta un verdadero desafío en varios países y podría convertirse en un desafío para otros. Andritz (2019) estima que el 50% de los equipos primarios y secundarios instalados en todo el mundo tienen más de 40 años.

Como se muestra en la figura 12, este problema no afecta actualmente a todas las regiones por igual. Regiones como Europa, América del Norte y Oceanía tienen flotas considerablemente más antiguas que otras como África, Asia, Oriente Medio y América del Sur, donde la mayoría de los activos hidroeléctricos se encargaron en los últimos 30 años. A este respecto, parece haber una clara distinción entre las economías desarrolladas y las economías en desarrollo, ya que las economías desarrolladas comenzaron a explotar sus recursos hidroeléctricos antes y, por lo tanto, tienen necesidades de renovación más urgentes. Sin embargo, la cuestión del envejecimiento de la flota y las necesidades de renovación acabarán siendo relevantes para todas las regiones. Esto pone de relieve la necesidad de que los países con plantas más antiguas actúen con urgencia y modernicen sus flotas. Incluso los países con flotas relativamente nuevas ya pueden comenzar a planificar y tomar medidas para la eventual modernización de sus plantas, ya que puede llevar algún tiempo desplegar los recursos necesarios.

La flota mundial de energía hidroeléctrica está llegando a un punto de inflexión, donde una gran parte de la capacidad instalada pronto requerirá actualizaciones, reacondicionamiento o posiblemente retiro. Todas las opciones requerirán inversiones considerables en forma de adiciones de capacidad o costos de mantenimiento si se quiere mantener la capacidad en línea. Es importante destacar que los diferentes componentes tienen diferentes vidas, como se muestra en la Tabla 3.

El escenario de 1,5 °C de IRENA sugiere que, si el mundo quiere descarbonizar completamente y cumplir con los objetivos climáticos descritos en el Acuerdo de París para 2050, la capacidad instalada de energía hidroeléctrica debería alcanzar aproximadamente 3 000 GW, incluidos 420 GW de PSH (IRENA, 2022a). Como se muestra en la ilustración 13, al considerar la capacidad instalada actual (1 360 GW), la tubería actual (652 GW) y las posibles retiradas de la planta para 20504 (630 GW), se necesitarán adiciones de capacidad y/o renovaciones por valor de 1 545 GW.

Para poner este número en perspectiva, la capacidad promedio de los proyectos hidroeléctricos en tramitación es de 160 MW (S&P Global, 2022), lo que significa que en las próximas décadas miles de nuevas centrales hidroeléctricas tendrían que desplegarse globalmente a un ritmo de 53 GW / año hasta 2050. Dado el largo tiempo de planificación y construcción que requieren los proyectos hidroeléctricos, los países deben comenzar a realizar inversiones considerables y desarrollar capacidad hidroeléctrica adicional a corto plazo si se quieren cumplir los objetivos climáticos del Acuerdo de París. Dicho esto, no toda la capacidad tiene que provenir de proyectos totalmente nuevos; Por ejemplo, las instalaciones existentes pueden beneficiarse de los aumentos de capacidad, y las presas sin energía pueden adaptarse para generar electricidad. La investigación estima que se podrían agregar aproximadamente 78 GW a través de estas dos opciones (Garrett, McManamay y Wang, 2021).

La avanzada edad de una gran parte de la flota mundial de energía hidroeléctrica es, de hecho, un desafío apremiante. Sin embargo, también es la oportunidad perfecta para modernizarse utilizando los últimos avances tecnológicos, incluidos componentes de vanguardia que pueden aumentar la eficiencia, flexibilidad y sostenibilidad de las plantas. Además, la digitalización, la inteligencia artificial y el big data pueden mejorar las operaciones y facilitar la toma de decisiones. Esto permitirá que la energía hidroeléctrica se adapte a los requisitos cada vez más complejos de los sistemas de energía actuales y futuros con altas proporciones de energías renovables variables y continúe proporcionando valiosos servicios energéticos de manera confiable en el futuro.

CAMBIO DE SISTEMAS DE ENERGÍA

En las últimas décadas, las adiciones de capacidad renovable han aumentado sustancialmente. Como se ve en la Figura 14, para 2012, las adiciones de capacidad de generación renovable ya habían superado las de las no renovables, y en 2020 casi el 90% de las adiciones netas de capacidad fueron renovables, y las tecnologías solar fotovoltaica y eólica representaron casi el 90% de estas adiciones. Si bien esta tendencia significa, sin duda, un gran avance hacia la descarbonización del sector eléctrico, también implica la necesidad de cambios significativos en los sistemas eléctricos y en la forma en que se gestionan. A medida que aumenta la proporción de energías renovables variables en las redes eléctricas, requieren capacidades de recursos más flexibles para garantizar la confiabilidad de la red.

Dado que las fuentes variables de energía renovable (VRE) no son gestionables, su disponibilidad podría no coincidir necesariamente con los momentos en que más se necesita la energía; Por ejemplo, la producción de electricidad solar está en su punto máximo al mediodía, cuando la demanda de electricidad puede no estar en su punto más alto. Por esta razón, los operadores del sistema necesitan confiar cada vez más en fuentes de electricidad gestionables como la energía hidroeléctrica para el control de frecuencia, el almacenamiento de energía y el suministro de carga máxima.

A medida que se agregan más energías renovables variables a la red, aumentan los requisitos de rampa, al igual que el riesgo de exceso de oferta y posiblemente la reducción durante los períodos de baja demanda. Para ilustrar lo que se conoce como la "curva del pato", la Figura 15 muestra la evolución de la demanda neta (demanda total menos la demanda satisfecha por fuentes de VRE) en California, un estado con una alta proporción de renovables variables que en ocasiones han cubierto más del 75% de la demanda de electricidad. Un aumento en los requisitos de rampa es evidente aquí: el requisito de rampa de tres horas en 2013 fue cercano a 3 GW, en comparación con más de 13,5 GW en un día de primavera en 2020.

Consecuencias operacionales

La mayoría de las centrales hidroeléctricas fueron planificadas, diseñadas y construidas para operar en condiciones diferentes a las de hoy y, por lo tanto, no se ven afectadas por el sistema de energía cambiante. Históricamente, la energía hidroeléctrica ha sido una fuente de generación de carga base. Sin embargo, se utiliza cada vez más como capacidad máxima y como fuente de servicios auxiliares. Esto hace que las plantas tengan que operar a cargas parciales con mayor frecuencia, con un aumento sustancial en su número de ciclos de arranque y parada.

Este cambio en los modos de operación de la energía hidroeléctrica introduce un desgaste adicional, acortando la vida útil de componentes importantes de la planta como la turbina, aumentando el tiempo de inactividad y los costos de operación y mantenimiento. Para ejemplificar esto, Seidel et al. (2020) compararon una carga base y un escenario de estabilización de la red para una turbina Francis (ver Figura 16) y encontraron que este último escenario acortó la vida de fatiga de la turbina en aproximadamente un orden de magnitud.

Consecuencias financieras

Las otras consecuencias de este cambio en las operaciones son financieras. El diseño obsoleto de muchos proyectos hidroeléctricos puede afectar sus flujos de ingresos y su capacidad para ser rentables. El aumento del tiempo de inactividad, los mayores costos de operación y mantenimiento y la reducción de los volúmenes de generación de energía son factores en juego.

En el caso de PSH, la mayoría de las plantas se construyeron hace décadas en torno a modelos de negocio de arbitraje diurno y nocturno para competir con la capacidad máxima basada en petróleo y gas. Sin embargo, cuando los precios del combustible son bajos y mejoran las eficiencias de la combustión, el arbitraje día-noche puede ser insuficiente para justificar la inversión en una planta de PSH (ANL, 2014). PSH puede ofrecer beneficios a la red que las centrales eléctricas basadas en combustibles fósiles no pueden, como capacidades de almacenamiento y flexibilidad que permiten mayores acciones renovables variables.

Sin embargo, el valor de estos servicios es difícil de definir con precisión y, por lo tanto, difícil de recompensar adecuadamente. Este es un tema crucial que es el foco de una investigación sustancial y donde se necesitan intervenciones políticas. Sin embargo, una cosa es cierta, a medida que crecen las acciones renovables variables en los sistemas de energía, también aumenta el valor de los servicios de almacenamiento y auxiliares proporcionados por la energía hidroeléctrica, y también lo hace la importancia de recompensar adecuadamente la prestación de estos servicios y mantener la rentabilidad de los proyectos hidroeléctricos.

NECESIDADES DE INVERSIÓN

Se necesitarán adiciones sustanciales de capacidad hidroeléctrica para que se materialice la transición a la energía limpia. Sin embargo, esto no puede suceder sin inversiones sustanciales para financiar la construcción y renovación de todos estos proyectos hidroeléctricos. La perspectiva de transiciones energéticas mundiales de IRENA estimó que, si se quieren alcanzar los objetivos climáticos para 2050, las inversiones necesarias en energía hidroeléctrica convencional y PSH ascienden a USD 85 mil millones / año y USD 8,8 mil millones / año, respectivamente (IRENA, 2022a). Esto es más de tres veces la inversión en energía hidroeléctrica observada en 2017, y más de cinco veces la inversión en 2018. Esto pone de relieve la urgencia de que los gobiernos implementen políticas que impulsen la bancabilidad de los proyectos hidroeléctricos e incentiven la inversión en la tecnología, especialmente cuando se consideran sus largos plazos de desarrollo.

Alcanzar el nivel necesario de inversión no es una tarea fácil, especialmente porque invertir en energía hidroeléctrica puede ser más difícil que invertir en otras tecnologías de energía renovable por una serie de razones sociales, técnicas, regulatorias y relacionadas con el mercado, que incluyen:

• Intensidad de capital y especificidad del sitio: La energía hidroeléctrica, al igual que otras tecnologías renovables, es intensiva en capital. Sin embargo, también es muy específico del sitio. Esto resulta en la necesidad de tener múltiples componentes diseñados individualmente para un proyecto específico, a diferencia de los proyectos solares o eólicos que dependen de paneles o turbinas estandarizados, un hecho que afecta el tiempo y el costo. Además, debido a la dificultad de predecir con precisión las condiciones geotécnicas antes de que comience la construcción, pueden ocurrir costos y retrasos inesperados (Markkanen y Plummer Braeckman, 2019).

• Fuentes limitadas de financiamiento: El financiamiento de la energía hidroeléctrica requiere préstamos a largo plazo, lo que lo hace menos atractivo para los inversores privados que otros proyectos a corto plazo. Además, la energía hidroeléctrica generalmente tiene altos riesgos de construcción. Los proyectos de mayor riesgo son menos atractivos para el financiamiento privado y, por lo tanto, pueden necesitar financiamiento público, aunque pueden desarrollarse y financiarse como asociaciones público-privadas (IFC, 2015).

• Preocupaciones sociales y ambientales: A pesar de haber hecho grandes progresos en términos de sostenibilidad en las últimas décadas, la energía hidroeléctrica todavía tiene la reputación de ser menos sostenible que muchas otras tecnologías de energía renovable. Esto se debe principalmente al hecho de que cuando los proyectos hidroeléctricos no se planifican o gestionan adecuadamente, las consecuencias pueden ser catastróficas, algo que lamentablemente ha sucedido en el pasado y que pone de relieve la necesidad de una supervisión regulatoria significativa para garantizar la seguridad y el apoyo ambiental. Dicho esto, los proyectos hidroeléctricos adecuadamente planificados y gestionados pueden minimizar los impactos ambientales al tiempo que ofrecen beneficios socioeconómicos sustanciales, algunos de los cuales se mencionan en la sección 2.2. Para aclarar aún más este último punto, una evaluación llevada a cabo por el Grupo de Evaluación Independiente del Banco Mundial encontró que más del 90% de las inversiones en energía hidroeléctrica evaluadas del Banco cumplieron con las salvaguardias ambientales y sociales aplicables y las normas de desempeño (Banco Mundial, 2020).

• Incertidumbre regulatoria: El proceso de otorgamiento de una concesión para un proyecto hidroeléctrico es mucho más largo y complejo que el de otras tecnologías de energía renovable, como la energía solar y eólica. La energía hidroeléctrica hace uso de los recursos hidrológicos, por lo tanto, no es tan simple como poner a disposición una parcela de tierra. Esta complejidad puede causar retrasos e incertidumbre en el desarrollo de proyectos (Markkanen y Plummer Braeckman, 2019). Además, la complejidad ambiental, la información poco clara, la falta de experiencia y la capacidad humana limitada en las autoridades de concesión de licencias pueden causar retrasos (Levine, 2021).

• Valoración inadecuada: No todo el valor de una central hidroeléctrica puede cuantificarse en términos monetarios, lo que provoca una disparidad entre la viabilidad financiera y económica. Los proyectos hidroeléctricos tienden a ser valorados por su capacidad para generar electricidad, mientras que pasan por alto otros beneficios como una mayor flexibilidad y confiabilidad de la red, una mayor resistencia a las inundaciones y sequías, y muchos otros beneficios socioeconómicos que son difíciles de cuantificar (más sobre esto se puede leer en la sección 4.1). Además, los servicios auxiliares prestados por las centrales hidroeléctricas no siempre son recompensados adecuadamente por los operadores de la red, un problema que es especialmente difícil para las plantas de PSH.

• Falta de proyectos financiables: El número de proyectos plenamente estudiados disponibles es limitado y muchos de los más prometedores se encuentran en economías en desarrollo. Es posible que algunas de estas economías en desarrollo no tengan las calificaciones crediticias necesarias, lo que hace que los proyectos en estas economías sean más difíciles de financiar, incluso cuando hay capital disponible (Markkanen y Plummer Braeckman, 2019).

ENERGÍA HIDROELÉCTRICA PARA EL FUTURO

La energía hidroeléctrica será esencial para la descarbonización del sector energético. Sin embargo, para que la energía hidroeléctrica tenga un futuro brillante, debe mantenerse al día con los tiempos cambiantes, lo que significa que algunos aspectos deben mejorarse y se deben realizar algunos ajustes. Esto se aplica en todo el sector hidroeléctrico, los mercados relevantes y los reguladores y otras partes interesadas. En este capítulo se describirán los cambios necesarios.

SOSTENIBILIDAD

Los proyectos de energía renovable deben ser sostenibles y resilientes. La energía hidroeléctrica no es una excepción, ya que una planificación y gestión deficientes pueden tener impactos considerables y desafortunados en la sociedad y el medio ambiente. Algunos ejemplos son el reasentamiento forzoso, la alteración de los regímenes fluviales, la fragmentación de los ecosistemas y el cambio de hábitats. Para evitar esto, es necesario planificar e implementar nuevos proyectos hidroeléctricos, priorizando la minimización de los impactos sociales y ambientales negativos sin comprometer su capacidad para generar electricidad y proporcionar servicios auxiliares y de agua. Esto se puede lograr asegurando que las medidas adecuadas que protejan a las comunidades, los flujos de agua, la calidad del agua y las especies locales se integren en todo el desarrollo y operación de los proyectos hidroeléctricos.

Como cualquier otro proyecto de infraestructura, los impactos ambientales de los proyectos hidroeléctricos no pueden evitarse por completo. Sin embargo, los impactos pueden minimizarse o compensarse. Por ejemplo, cuando se trata de PSH, los esquemas de circuito cerrado generalmente tienen un menor impacto ambiental que los esquemas de circuito abierto, principalmente debido a su mayor flexibilidad de ubicación y al hecho de que están ubicados fuera de la corriente (PNNL, 2020). En este sentido, los países que estén considerando nuevos sistemas de PSH podrían querer priorizar el despliegue de sistemas de circuito cerrado. Los impactos pueden reducirse aún más si los proyectos hacen uso de infraestructura preexistente, como minas y canteras. Además, los impactos ambientales pueden ser compensados por los beneficios ofrecidos por los proyectos hidroeléctricos multipropósito. Por ejemplo, la investigación ha demostrado que la capacidad de almacenamiento de agua proporcionada por las presas puede suministrar agua adicional para riego, uso potable e industrial, así como para la regulación de inundaciones, lo que se traduce en beneficios económicos. Algunos de estos beneficios pueden canalizarse hacia esfuerzos como la forestación, que puede compensar algunos de los costos ambientales de las áreas sumergidas debido a la construcción de presas (Amjath-Babu et al., 2019).

La tecnología hidroeléctrica ha progresado considerablemente hacia la sostenibilidad en las últimas dos décadas. Por ejemplo, las turbinas amigables con los peces, ahora en funcionamiento, y la inclusión cada vez más común de escalas de peces en las presas para evitar la fragmentación de las rutas de migración. Otras innovaciones relevantes incluyen la energía hidroeléctrica modular estándar que está siendo investigada por el Departamento de Energía de los Estados Unidos, y la restauración hydro6 que está desarrollando la empresa estadounidense Natel Energy.

Otros esfuerzos notables para aumentar la sostenibilidad de los proyectos hidroeléctricos han sido realizados por la Asociación Internacional de Energía Hidroeléctrica (IHA), que, junto con un consejo de múltiples partes interesadas, ha desarrollado Herramientas de Sostenibilidad de la Energía Hidroeléctrica, que incluyen directrices para las buenas prácticas y un protocolo de evaluación de la sostenibilidad. Además, en septiembre de 2021, la IHA lanzó el Estándar de Sostenibilidad de la Energía Hidroeléctrica, bajo el cual los proyectos pueden ser calificados y certificados en función de su cumplimiento de sostenibilidad.

A pesar de los avances significativos, es necesario hacer más esfuerzos para minimizar el impacto de los proyectos hidroeléctricos. Se necesitan investigaciones adicionales y mejores prácticas para comprender y abordar ciertos fenómenos, como las emisiones de metano de la vegetación sumergida en áreas de embalse y la exposición a la contaminación del agua con metilmercurio. Abordar los impactos ambientales en la etapa de planificación es más fácil, más barato y más efectivo que hacerlo después de que se haya construido un proyecto.

Un apoyo clave para los futuros desarrollos hidroeléctricos es el concepto de planificación integrada, que permite (CE, 2018):

• la integración de los objetivos de la política del agua, la naturaleza y la energía;

• la participación de todas las partes interesadas, lo que puede reducir los impactos y conflictos posteriores;

• la priorización de las consideraciones relativas a la gestión de la energía, la naturaleza y el agua;

• una mayor transparencia y la racionalización de los procesos de autorización;

• la gestión de los riesgos de los efectos acumulativos de las centrales hidroeléctricas; y

• la integración de un enfoque de planificación estratégica a través de la gestión de cuencas hidrográficas.

El último punto es particularmente importante. La planificación de proyectos hidroeléctricos no debe hacerse exclusivamente a escala de planta. En cambio, los nuevos proyectos deben planificarse a escala de sistema que potencialmente pueden incluir otros activos interconectados, una cuenca fluvial completa o incluso una región. Un análisis realizado por el Banco Interamericano de Desarrollo indicó que un enfoque de planificación a escala de sistema puede identificar conflictos potenciales antes que los enfoques basados en proyectos, y para una producción de energía determinada, el primer enfoque tiene el potencial de reducir los impactos sociales y ambientales (BID, 2013). Finalmente, para que la energía hidroeléctrica sea verdaderamente sostenible, los gobiernos deben priorizar la transparencia incluyendo a la sociedad civil en el proceso de planificación.

Otro elemento crítico relacionado con la sostenibilidad de la energía hidroeléctrica es la gestión de sedimentos. Se necesita una atención temprana y consistente a los procesos de sedimentación de los yacimientos para garantizar la resiliencia a largo plazo de las instalaciones hidroeléctricas. La sedimentación del embalse reduce la capacidad de almacenamiento de los embalses y daña los equipos hidromecánicos, lo que representa una amenaza para la sostenibilidad de la energía hidroeléctrica, el suministro de agua y los servicios de riego (Annandale, Morris y Kakri, 2016).

La energía hidroeléctrica de los embalses puede aumentar la resiliencia contra los fenómenos relacionados con el clima, por ejemplo, acumulando agua antes de la estación seca para mitigar el impacto de las sequías y gestionando los flujos de agua y lodo durante las inundaciones. Sin embargo, también es vulnerable a los cambios en el clima. Se espera que los efectos del cambio climático en la generación de energía hidroeléctrica varíen según las diferentes plantas y países, y se espera que algunos reciban más lluvia, mientras que otros se vuelven más secos.8

Anticipar los cambios inducidos por el cambio climático en las precipitaciones, los flujos de agua y los fenómenos meteorológicos extremos es crucial para la planificación del desarrollo hidroeléctrico (AIE, 2021b), así como para la planificación adecuada del sistema eléctrico. Es particularmente importante que los gobiernos, los operadores y los tomadores de decisiones sean conscientes de los problemas que el cambio climático puede crear en las escorrentías anuales, su distribución temporal y sedimentación. La IHA elaboró una Guía de Resiliencia Climática9 para el sector hidroeléctrico, que ofrece una metodología para identificar, evaluar y gestionar los riesgos climáticos para mejorar la resiliencia de los proyectos hidroeléctricos.

INNOVACIÓN Y FLEXIBILIDAD

Como se mencionó en el capítulo 3, las centrales hidroeléctricas enfrentan desafíos, incluida una flota envejecida y un papel cambiante en los sistemas de energía que ha afectado su rentabilidad. A pesar de lo desafiante que es esta situación, también presenta una excelente oportunidad para modernizar las centrales hidroeléctricas, mejorar su flexibilidad general con aumentos de eficiencia y rango operativo, y hacerlas más viables económicamente.

Digitalización

Las centrales hidroeléctricas pueden obtener múltiples beneficios de la actualización de los activos con componentes diseñados para las operaciones modernas (es decir, bajo rangos de operación más amplios, requisitos de rampa más rápidos y múltiples ciclos de arranque y parada) y la adopción de esquemas innovadores de O&M. Como base de este proceso, la digitalización podría mejorar la disponibilidad de datos, facilitar una mejor toma de decisiones y mejorar la resolución y las capacidades de los controles de la planta. La digitalización de las operaciones puede permitir a las plantas mejorar el alcance y la eficiencia de sus operaciones, reducir los costos de operación y mantenimiento y extender su vida útil.

Con la introducción de estrategias de control digital inteligente y monitoreo, los operadores podrán recopilar más datos y comprender mejor el comportamiento de una planta y sus componentes en diferentes condiciones. Esto permitirá tomar decisiones mejor informadas y gestionar mejor las operaciones de la planta. La digitalización también proporcionará información para mejores diseños de componentes que permitirán operaciones más flexibles. También abrirá la puerta para implementar estrategias de mantenimiento predictivo, lo que podría reducir los costos de operación y mantenimiento y aumentar la disponibilidad de la planta.

El uso de gemelos digitales ejemplifica la innovación en este campo. Los gemelos digitales son réplicas matemáticas de una planta física que permiten la simulación de diferentes condiciones de operación y el monitoreo de varios parámetros y características del sistema. De esta manera, los gemelos digitales podrían utilizarse para predecir el comportamiento de una planta bajo ciertas condiciones que, a su vez, permiten la optimización de las operaciones y la mejora de los esquemas de mantenimiento. Kougias et al. (2019) estiman que la digitalización de la flota hidroeléctrica mundial podría aumentar la producción anual en 42 TWh, equivalente a aproximadamente el 1% de la producción anual. Si bien este número parece relativamente pequeño, este estudio cuantifica los ahorros operativos anuales en USD 5 mil millones. Otras herramientas relevantes son el modelado de información de construcción y el diseño y construcción virtual, que pueden ayudar a mejorar los proyectos hidroeléctricos a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto. Vale la pena destacar que podría no ser necesario digitalizar completamente un activo, y se podría agregar valor a través de la digitalización parcial.

Como se mencionó anteriormente, los proyectos hidroeléctricos son altamente específicos del sitio. La naturaleza única de cada central hidroeléctrica, no solo en términos de diseño sino también en términos de operación, es sin duda uno de los principales desafíos para la digitalización de la energía hidroeléctrica. Esto plantea la importancia de la normalización. Las normas pueden facilitar el proceso de digitalización y permitir la compatibilidad y el intercambio de información entre diferentes actores y a través de las fronteras. Además, muchos proyectos hidroeléctricos se consideran infraestructura crítica y, por lo tanto, se necesitarán mayores medidas de seguridad cibernética para evitar cualquier problema imprevisto relacionado con la seguridad.

Flexibilidad

Para que la energía hidroeléctrica tenga un papel relevante en los sistemas energéticos futuros, más allá de la generación de carga base, tendrá que contribuir a la red tanto con capacidad (flexibilidad a corto plazo) como con energía (flexibilidad a medio y largo plazo) (INESC TEC, 2020). Como se mencionó anteriormente, muchas centrales hidroeléctricas se desarrollaron hace décadas bajo diferentes circunstancias operativas. Esto hace que las plantas tengan que operar a cargas parciales con mayor frecuencia, y con un aumento sustancial en el número de ciclos de arranque y parada y cambios de carga. Los activos hidroeléctricos pueden beneficiarse enormemente de las mejoras destinadas a aumentar su propia flexibilidad y, en consecuencia, la flexibilidad general del sistema. Esto se puede hacer de diferentes maneras, por ejemplo (INESC TEC, 2020):

• Rediseño de la planta: Adición de instalaciones de almacenamiento mediante la instalación de bombas, turbinas de bomba reversibles o baterías. Esta opción requiere obras civiles, nuevos equipos y, en algunos casos, una conexión a red reforzada.

• Actualizaciones de equipos: Las instalaciones más antiguas pueden beneficiarse de equipos modernos que pueden aumentar su eficiencia, capacidad y rango de operación. Por ejemplo, DOE (2018) estima que, al modernizar los equipos, las plantas pueden lograr un aumento de la eficiencia del 1-3%. Esta opción requiere obras civiles, nuevos equipos y/o, en algunos casos, una conexión a red reforzada.

• Plantas "más inteligentes": La tecnología ha avanzado considerablemente en la última década, y las nuevas capacidades sensoriales y de prueba de los fabricantes de turbinas han dado como resultado un software que puede hacer que las operaciones sean más eficientes y controlables y ampliar el rango operativo de las centrales hidroeléctricas. Esta opción no requiere obras civiles ni cambios de equipo importante.

Estas mejoras no solo benefician a la red, sino que también pueden beneficiar a las propias plantas al aumentar sus ingresos, por ejemplo, operando a cargas más bajas o facilitando la participación en mercados de servicios auxiliares. Por ejemplo, en 2013, el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica estimó que ampliar el rango operativo de las plantas PSH existentes en los Estados Unidos podría aumentar sus ingresos en un 61% en promedio (EPRI, 2013).

Energía hidroeléctrica híbrida

Se pueden aprovechar sinergias adicionales mediante la hibridación de la energía hidroeléctrica con otras tecnologías de VRE. Agregar energía solar fotovoltaica o generación eólica a las centrales hidroeléctricas puede ofrecer múltiples ventajas. Por ejemplo, combinar la energía hidroeléctrica con la energía solar fotovoltaica flotante puede ofrecer (Lee et al., 2020):

• Mejor eficiencia en el uso de la tierra, evitando la necesidad de nuevas tierras y reduciendo los conflictos por el uso de la tierra.

• Conservación del agua mediante la reducción de la evaporación del agua.

• Mejora del funcionamiento del sistema a diferentes escalas de tiempo (estacional, diaria, horaria y subhoraria) aprovechando la complementariedad de estas dos tecnologías.

• Compensación de potencia de salida durante períodos secos.

• Oportunidades adicionales de almacenamiento de energía cuando se combina con PSH y se utiliza el exceso de generación solar para bombear agua.

• Mejora de la utilización de la transmisión al proporcionar una mayor generación de energía y ofrecer factores de capacidad más altos que los sistemas independientes.

• Reducción de la reducción, con el sistema fotovoltaico suministrando electricidad durante las horas pico de producción y la energía hidroeléctrica aumentando y disminuyendo según sea necesario, o mediante el uso de generación fotovoltaica para bombear agua en plantas PSH.

• Reducción de los costos de interconexión del sistema de transmisión mediante el uso de la infraestructura de transmisión existente.

Como se mencionó en la sección 2.3, el potencial técnico de instalar energía solar fotovoltaica flotante en los embalses existentes en todo el mundo alcanza 4.2-10.6 PWh / año (Lee et al., 2020), esta última cantidad equivale a más de un tercio de la generación de electricidad mundial.

Otra alternativa interesante para la hibridación hidroeléctrica es el emparejamiento con sistemas de almacenamiento de energía de baterías. Al emparejar las baterías con un generador hidráulico, se pueden obtener varios beneficios, incluida la extensión de la vida útil al reducir las tensiones mecánicas, oportunidades adicionales para la participación en el mercado de energía y auxiliares, almacenamiento flexible y un aumento en el rango de operación (Andritz, 2022).

Energía hidroeléctrica de almacenamiento por bombeo

Como la mayor fuente de tecnología de almacenamiento de energía, PSH sin duda desempeñará un papel importante como proveedor de flexibilidad en los futuros sistemas de energía. Dicho esto, todavía hay margen de mejora cuando se trata de la flexibilidad de las plantas de PSH. La utilización de variadores de velocidad para las bombas podría ser una actualización importante para algunas plantas PSH existentes y una tecnología importante a considerar para proyectos futuros. Según EPRI (2013), agregar variadores de velocidad a las plantas de PSH en los Estados Unidos podría aumentar sus ingresos hasta en un 85%. La mayoría de las plantas de PSH solo son capaces de regular su producción de energía, mientras que las bombas solo pueden funcionar a plena capacidad. Con los variadores de velocidad, la potencia de bombeo también se puede regular, lo que permite una operación más flexible y la capacidad de integrar mejor el excedente de electricidad de la red, es decir, las bombas pueden funcionar a capacidad parcial, haciéndolas más flexibles (GE, 2016).

REGULACIÓN Y MERCADOS

Los gobiernos pueden ser fundamentales para garantizar el despliegue continuo de la energía hidroeléctrica y, de esa manera, allanar el camino para la descarbonización del sector eléctrico. Pueden ayudar a atraer la inversión necesaria en energía hidroeléctrica proporcionando incentivos y creando un entorno empresarial adecuado. Algunos de estos incentivos incluyen (Markkanen y Plummer Braeckman, 2019):

• Exención de impuestos y aranceles.

• Donaciones o préstamos en condiciones favorables.

• Depreciación acelerada de activos.

• Subsidios basados en el desempeño ambiental.

• Subsidios para servicios prestados más allá de la generación de energía (por ejemplo, gestión del agua).

• Contribuciones de costos de capital (por ejemplo, cuando un proyecto ofrece beneficios que son difíciles de monetizar, como el control de inundaciones).

• Estructuras de apoyo para el despliegue y prueba de nuevas tecnologías.

Los gobiernos también pueden facilitar un mayor despliegue de la energía hidroeléctrica mediante la racionalización de los procesos de concesión y concesión de licencias, lo que reduciría parte de la incertidumbre regulatoria que rodea a los proyectos hidroeléctricos y los convertiría en inversiones más atractivas. Dicho esto, ni los incentivos ni la racionalización regulatoria por sí solos podrían ser suficientes para desarrollar la capacidad hidroeléctrica necesaria. Una combinación de incentivos estrechamente coordinados y racionalización regulatoria podría acelerar el despliegue de la energía hidroeléctrica (Cox, 2016). Además, la energía hidroeléctrica sostenible también podría beneficiarse de su inclusión en las taxonomías de bonos verdes para canalizar mayores niveles de inversión, lo que no siempre es el caso, dependiendo de las percepciones del mercado y el comportamiento de aversión al riesgo de los emisores de bonos.

Los pequeños proyectos hidroeléctricos podrían beneficiarse particularmente de estos esfuerzos, ya que se ven afectados de manera desproporcionada por los costos de capital asociados con los estudios previos al desarrollo y los permisos. "Los proyectos más grandes pueden absorber los costos de licencia a través de economías de escala de una manera que no es posible para proyectos más pequeños" (Levine et al., 2021).

Los mercados de electricidad también tendrán que cambiar para remunerar adecuadamente el gran conjunto de servicios proporcionados por la energía hidroeléctrica más allá de la generación de electricidad. A medida que aumentan las proporciones de energías renovables variables en los sistemas de energía en todo el mundo, la capacidad de la energía hidroeléctrica para proporcionar servicios auxiliares se vuelve cada vez más valiosa. Sin embargo, la mayoría de los mercados actualmente no reconocen ni remuneran este valor añadido en su totalidad.

En algunos mercados, la energía hidroeléctrica se beneficiaría de que se le permitiera aumentar su participación en los mercados de energía, incluidos los mercados subhorarios, lo que permitiría al sistema eléctrico beneficiarse de su plena flexibilidad. El desarrollo de mercados a plazo también podría beneficiar a los recursos hidroeléctricos que deben programar su producción. Además, el desarrollo de un sistema a través del cual se pueda llevar la respuesta de la demanda al mercado ayudaría a reducir el poder de mercado tanto en los mercados de energía como en los de reservas, permitiendo que la energía hidroeléctrica (y otros generadores) reciban precios competitivos de energía y servicios auxiliares. En pocas palabras, los mercados deberían aprovechar la flexibilidad que ofrece la energía hidroeléctrica, al tiempo que recompensan sus capacidades de almacenamiento y servicios de regulación, como el soporte dinámico de energía reactiva, la respuesta de frecuencia primaria y los servicios de despliegue subhorario (EPRI, 2013).

Históricamente, los servicios auxiliares se han prestado principalmente a precios fijos a través de contratos a largo plazo en lugar de a través de mercados al contado. La creación de estructuras y mecanismos de mercado innovadores que remuneren adecuadamente el creciente valor de estos servicios es fundamental para garantizar la viabilidad económica de los proyectos hidroeléctricos, en particular los proyectos PSH. Sólo unos pocos países tienen actualmente mercados que remuneran adecuadamente estos servicios. Un buen ejemplo es Irlanda, donde el Programa DS3 de EirGrid, el gestor del sistema de transporte, pretende abordar el reto de integrar cuotas muy elevadas de generación renovable variable en su red. Este programa reconoce y proporciona pagos por 14 servicios de red diferentes que garantizan que el sistema funcione de manera segura y eficiente (EirGrid, 2020). La investigación ha demostrado que el valor de las centrales hidroeléctricas puede ser sustancialmente mayor si participan en los mercados de energía y servicios auxiliares que si operan solo en el mercado de la energía. "Este aumento es el más significativo para las unidades con baja disponibilidad de agua, ya que pueden obtener ganancias al proporcionar servicios auxiliares sin utilizar sus escasos recursos hídricos" (Perekhodtsev y Lave, 2018).

COOPERACIÓN

Finalmente, el papel de la cooperación internacional y de múltiples partes interesadas en el éxito futuro de la energía hidroeléctrica es considerable. La industria, los gobiernos y los reguladores deben trabajar juntos, compartir las lecciones aprendidas y cooperar en el desarrollo de soluciones innovadoras que aborden los desafíos actuales de la energía hidroeléctrica. La gestión de las cuencas hidrográficas es claramente un ámbito en el que la cooperación es fundamental, ya que es una disciplina que requiere la coordinación y cooperación de un grupo diverso de partes interesadas que pueden extenderse a través de las fronteras. La cooperación internacional, a través del intercambio de experiencias y mejores prácticas, puede acelerar la creación de políticas y regulaciones favorables relevantes para la energía hidroeléctrica.

Hay varios esfuerzos en curso para fomentar la cooperación en diferentes niveles. En 2020, IRENA lanzó un Marco de Colaboración sobre Energía Hidroeléctrica10, una plataforma destinada a reunir a los países para identificar áreas prioritarias, desarrollar acciones concertadas y fomentar la colaboración internacional para comprender mejor el papel de la energía hidroeléctrica en la transición energética, crear conciencia sobre sus problemas más apremiantes y garantizar su despliegue generalizado en el futuro. El marco tiene como objetivo avanzar en áreas relevantes para la energía hidroeléctrica, incluida la financiación, la flexibilidad, la resiliencia y la sostenibilidad. Además, el Marco de Colaboración está abierto a la participación del sector privado, sirviendo como un vehículo eficaz para el diálogo público-privado, la cooperación y la acción coordinada para garantizar el despliegue continuo de tecnologías hidroeléctricas.

Otra iniciativa es el Foro Internacional sobre Energía Hidroeléctrica de Almacenamiento por Bombeo11 (IFPSH). La IFPSH es una plataforma de múltiples partes interesadas dirigida por el gobierno lanzada por la IHA y presidida por el Departamento de Energía de los Estados Unidos. Este foro busca dar forma y mejorar el papel de PSH mediante el desarrollo de orientación y recomendaciones sobre cómo PSH sostenible puede apoyar mejor la transición energética.

