

ANEXO II: MARCO TEORICO GENERAL

HIBRIDACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA Y BATERÍAS EN UNA CENTRAL
HIDROELÉCTRICA REVERSIBLE EXISTENTE

Alumnos:

Carles Borrell Ruiz,

Yulia Kuzmina,

Rodrigo Mohedas Andrino,

Jennifer Sanchez Berrocal,

Didier Edinson Nández Macías

Tutora: Maitane Urrutia Aparicio

UNIVERSIDAD EUROPEA DE CANARIAS UEC

Máster Universitario en Energías Renovables

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1.	LA TRANSICION ENERGETICA Y EL PAPEL DE LAS RENOVABLES	1
1.1	Contexto	1
1.2	Respuesta y objetivos internacionales	1
1.3	Políticas en Europa y España para la transición energética	2
1.4	Papel de las energías renovables	2
2.	EL MERCADO ELECTRICO ESPAÑOL	2
2.1	Funcionamiento	3
2.2	Curva de demanda	3
3.	CENTRALES HIDROELECTRICAS REVERSIBLES	5
3.1.	Introducción	5
3.2	Principios de funcionamiento de las centrales hidroeléctricas reversibles	5
3.3.	Operación y componentes principales	6
3.4.	Ventajas y limitaciones de las centrales reversibles	8
3.4.1.	Ventajas	8
3.4.2.	Inconvenientes	9
3.5.	Rol de las hidroeléctricas reversibles en la red eléctrica moderna	9
4.	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	10
4.1.	Radiación solar	10
4.2	Fundamentos de la conversión fotovoltaica	11
4.3.	Tecnologías actuales de paneles solares	12
4.3.1.	Paneles de silicio monocristalino	12
4.3.2.	Paneles de silicio policristalino	12
4.3.3.	Paneles de silicio amorfo (película delgada)	13
4.3.4.	Paneles de perovskita	13

4.4. Elementos de una instalación fotovoltaica	13
4.5 Producción solar y variabilidad.	14
4.5.1. Variabilidad espacial.	14
4.5.2. Variabilidad temporal a largo plazo.	14
4.5.3. Variabilidad temporal a corto plazo.	15
4.6. Aplicación de la fotovoltaica en centrales hidroeléctricas reversibles.	15
4.6.1. Fotovoltaica para vertido a red y excedentes para bombeo.	15
4.6.2. Fotovoltaica para autoconsumo.	15
4.6.3. Fotovoltaica e hidráulicas integradas en red inteligente para la participación en mercados.	16
4.7. Sistemas fotovoltaicos flotantes.	16
4.7.1 Soluciones técnicas actuales para fotovoltaica flotante	17
4.7.2 Ventajas y desventajas de las plantas fotovoltaicas flotantes	20
5. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO CON BATERIAS	21
5.1. Introducción a los sistemas de almacenamiento energético.	21
5.2. BESS: Sistema de almacenamiento de baterías	22
5.3 Tipos de baterías aplicables	23
5.3.1. Baterías de iones de litio (Li-on).....	23
5.3.2. Baterías de iones de plomo-ácido.....	24
5.3.3. Baterías de flujo redox.	24
5.3.4. Baterías de sodio-azufre (NaS).....	24
5.4. Parámetros técnicos clave: eficiencia, DoD, ciclos de vida.....	24
5.4.1. Baterías de iones de litio (Li-on).....	24
5.4.2. Baterías de iones de plomo-ácido.....	25
5.4.3. Baterías de flujo redox.	25
5.4.4. Baterías de sodio-azufre (NaS).....	25

5.5 Rol de las baterías en el soporte a renovables y a sistemas de bombeo.	25
6. INTEGRACIÓN DE SISTEMAS HIBRIDOS.....	26
6.1. Concepto de hibridación energética.....	26
6.2. Esquemas de integración: conexión AC, DC o híbrida.	27
6.3 Beneficios técnicos y operativos del sistema híbrido	27
6.4. Desafíos de la integración: técnicos, económicos y regulatorios	27
7. IMPACTOS AMBIENTALES Y DE SOSTENIBILIDAD	28
7.1. Huella ecológica de cada componente	28
7.2. Análisis de ciclo de vida y reciclabilidad.....	28
7.3. Beneficios medioambientales de la hibridación	28
7.4. Alineación con los objetivos de sostenibilidad	28
8. CASOS REALES: PROYECTOS HIBRIDOS SIMILARES EN EL MUNDO	29
8.1 Proyecto Híbrido de la Central Hidroeléctrica de Bui (Ghana)	29
8.2 Estudio de Hibridación Simulada: Caso Noruega (IFE)	29
9. BIBLIOGRAFIA	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Curva de demanda. Fuente: Red Eléctrica de España, s.f.	4
Figura 2: Estructura de la generación por tecnología en España. Fuente: Red Eléctrica de España, s.f.	4
Figura 3: Principios de funcionamiento de las centrales hidroeléctricas reversibles. Fuente: Huggins, 2010.....	6
Figura 4: Tipo de centrales hidroeléctricas reversibles. Fuente: (Alarcón Mínguez, 2020)	6
Figura 5: Funcionamiento de una central hidroeléctrica reversible. Fuente: Redacción de El Periódico de la Energía, s.f.	7
Figura 6: Efecto fotoeléctrico	11
Figura 7: Tipos de paneles solares https://solarfam.com/tecnologias-y-tipologias-de-paneles-fotovoltaicos/	12
Figura 8: Esquema de un sistema fotovoltaico. Fuente: (World Bank Group, 2019).....	14
Figura 9: Esquema sistema flotante típico. Fuente: (World Bank Group, 2019)	16
Figura 10: Flotadores puros. Fuente: CleanSolar Solutions, s.f.	17
Figura 11: Sistema de marcos metálicos. Fuente: CleanSolar Solutions, s.f.	18
Figura 12: Membranas. Fuente: CleanSolar Solutions, s.f.	19
Figura 13: Anclajes en el fondo. Fuente: CleanSolar Solutions, s.f.	20
Figura 14: Anclajes en la costa. Fuente: CleanSolar Solutions, s.f.	20
Figura 15: Anclaje en pilotes. Fuente: CleanSolar Solutions, s.f.	20
Figura 16: Esquema de un sistema BESS 1/2. Fuente: Enel Green Power, s.f.	23
Figura 17: Esquema de un sistema BESS 2/2. Fuente: Enel Green Power, s.f.	23

1. LA TRANSICION ENERGETICA Y EL PAPEL DE LAS RENOVABLES

La transición energética es un proceso en el que globalmente, se ha respondido a la necesidad de transformar sistemas de generación, distribución y consumo de energía de forma más sostenible, segura y reduciendo el impacto negativo en el medioambiente. Dicha transición está íntimamente ligada a la evolución histórica del uso de la energía, junto con el avance de la ciencia y el desarrollo tecnológico, desencadenantes del aumento de la riqueza y la demografía a nivel internacional.

1.1 Contexto

Desde la Revolución Industrial, acontecida desde mediados del siglo XIX, el desarrollo de la ciencia, tecnología, y por ende, la economía y la demografía, ha producido un crecimiento experimental de las demandas energéticas a nivel mundial. En una primera etapa, la demanda energética se ha cubierto con la quema de combustibles fósiles tales como, carbón, petróleo y gas natural, provocando un incremento de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), y otros gases de efecto invernadero, trayendo consigo consecuencias como incrementos de la temperatura media global, deshielo en los polos y aumentos del nivel del mar, afección a la biodiversidad, disminución de la capa de ozono y lluvia ácida, entre muchos otros. (Alfredo & De Jesús, 2021).

1.2 Respuesta y objetivos internacionales

Ante estos hechos, durante los años 90 y 2000, la comunidad internacional empezó a tomar conciencia de las consecuencias catastróficas que podrían derivarse del cambio climático, y se promovieron objetivos y políticas sostenibles para reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Flores et al., 2025). Algunos puntos de inflexión fueron el Protocolo de Kioto adoptado en 1997 y entrado en vigor desde el 2005, el cual establecía compromisos vinculantes para que los países desarrollados o en vías de desarrollo, redujeran sus emisiones.

Posteriormente, se destaca la Conferencia de las Partes COP 21, celebrado en París en el año 2015, que fijó como principal objetivo mantener el aumento de la temperatura media anual por debajo de 2°C, respecto a los niveles preindustriales, y hacer esfuerzos para limitarlos a 1,5°C. Adicionalmente, también se promovió la descarbonización progresiva de las economías y la inversión en la implementación de las fuentes de energías renovables. (Energías Renovables, 2025; SolarFam, s.f.; Bui Power, s.f.; Wikipedia, s.f.).

1.3 Políticas en Europa y España para la transición energética

A nivel europeo, la Unión Europea ha liderado la transición energética mediante políticas, estrategias y marcos normativos. Se destaca el Pacto Verde Europeo (2019), en el que establece como objetivo principal emisiones neutras de GEI para el año 2050.

De igual forma, a nivel nacional, España se ha alineado con los objetivos europeos a través de planes como el Plan de Energías Renovables (2011-2020), sentando las bases para la integración de la energía renovable en el sistema energético. También se destaca el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC). Este último plan, exigido por los compromisos vinculantes con la Unión Europea, establece las políticas a implementar hasta el año 2030, para reducir emisiones, incrementar la eficiencia energética, y aumentar el uso de fuentes de energía renovable.

1.4 Papel de las energías renovables

En el contexto, objetivos y políticas aplicadas a nivel internaciones, las energías renovables se han convertido en el pilar fundamental de los nuevos modelos energéticos, siendo en muchos países la principal fuente de generación eléctrica en el mix energético, provocando una disminución progresiva del carbón y gas, y un incremento gradual y firme de la energía renovable tal como la solar y eólica en primer lugar, seguidas de la hidroeléctrica, biomasa, entre otras. Dicha progresión en la implementación ha sido posible gracias a la reducción de costes en la fabricación de componentes principales, mayor conocimiento de las diferentes tecnologías, mejora en la eficiencia de los sistemas, sistemas de autoconsumo, redes inteligentes, y un largo etcétera. (Alfredo & De Jesús, 2021; Flores et al., 2025).

2. EL MERCADO ELECTRICO ESPAÑOL

El mercado eléctrico de España funcionaba como un sistema regulado hasta 1997. En este sistema el gobierno fijaba el precio de la electricidad y cubría la totalidad de los costes de las compañías eléctricas privadas, principalmente para la generación, transporte y distribución de la electricidad. A excepción de Endesa, compañía pública que generaba un tercio de la electricidad en España.

En 1997 el mercado español eléctrico se liberaliza y pasa de un sistema oligopolio a un libre mercado de intercambio de energía eléctrica sujeto a la competitividad y a la elección libre de la comercializadora por parte de los consumidores.

2.1 Funcionamiento

En la actualidad no existen sistemas capaces de almacenar grandes cantidades de energía eléctrica, lo que implica que la electricidad consumida en cada instante debe generarse de manera simultánea, para garantizar la inercia requerida en la red. Por este motivo, resulta imprescindible contar con un organismo que garantice el equilibrio entre producción y consumo. En España, esta labor corresponde a Red Eléctrica de España (REE), entidad responsable del transporte de la electricidad y de la gestión técnica del sistema. REE determina qué tecnologías de generación, ya sean renovables o convencionales, vierten energía a la red en cada momento. Para ello se apoya en las curvas de demanda eléctrica, que muestran el consumo horario de la población española durante todos los días del año y permiten ajustar con precisión la producción a las necesidades reales. (Red Eléctrica de España, s.f.).

La gestión del mercado mayorista de electricidad recae en el Operador del Mercado Ibérico de Energía (OMIE), encargado de facilitar la compraventa de electricidad entre los diferentes agentes del sector. El precio de la energía se fija en el Mercado Diario, a través de un sistema de subasta marginalista que se celebra con 24 horas de antelación. En este proceso, la electricidad se incorpora a la red en función de los costes de producción: primero entran las tecnologías con menor coste marginal, como la nuclear y las renovables (hidráulica, eólica, solar...), y si no es suficiente para cubrir la demanda, se recurre a otras más costosas, como los ciclos combinados. Dado que el sistema es marginalista, el precio final para cada hora lo marca la última tecnología necesaria para satisfacer la demanda, es decir, la más cara en ese momento.

De forma complementaria, existe el Mercado Intradiario, cuyo objetivo es corregir las posibles desviaciones entre la oferta y la demanda a lo largo de la jornada. En este mercado pueden participar las instalaciones ya autorizadas en el Mercado Diario, siendo especialmente relevantes aquellas con capacidad de arranque rápido, como las centrales hidráulicas, por su flexibilidad para responder a variaciones en el consumo.

2.2 Curva de demanda

La curva de demanda es la representación de la demanda eléctrica de la red debida a los usuarios en cada instante del día. Como se muestra Figura 1 en el eje horizontal se representan las 24 horas del día y en el eje vertical la potencia demandada en MW para el día 2025/08/06. Esta curva cambia para cada día y hora, actualizándose cada cinco minutos.

A pesar de no existir dos curvas idénticas, estas siguen un cierto patrón predecible debido a las rutinas de las personas, presentando mínimos de consumo en torno a las 4:00 y máximos a las

21:00. Gracias a este patrón, puede predecir cual será el consumo de la red y de esta manera, se consigue proporcionar un suministro constante de electricidad. Para ello REE (Red Eléctrica de España, s.f.) cuenta con tres curvas (demanda real, prevista y programada):

- La demanda real-curva amarilla muestra el valor instantáneo de la demanda eléctrica.
- La demanda prevista-curva verde son los valores de consumo previstos
- La demanda programada-línea escalonada roja corresponde con la producción programada para las plantas de generación de potencia a las que se haya adjudicado el suministro de energía en los mercados diario e intradiario.

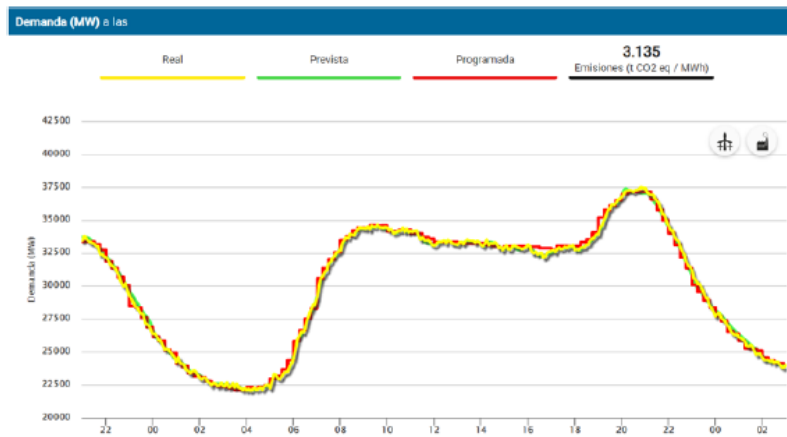


Figura 1: Curva de demanda. Fuente: Red Eléctrica de España, s.f.

Las principales tecnologías que permiten producir potencia en España son la nuclear, hidráulica, carbón, motores Diesel, turbina de gas, turbina de vapor, ciclo combinado, eólica, fotovoltaica, solar térmica, cogeneración y residuos renovables y no renovables. A continuación, se muestra en la Figura 2 la estructura de la generación por tecnología del 29/08/2025 al 04/09/2025.

Estructura de la generación por tecnologías (GWh) | Sistema eléctrico: Nacional

Del 29/08/2025 al 04/09/2025

[Copiar URL](#)

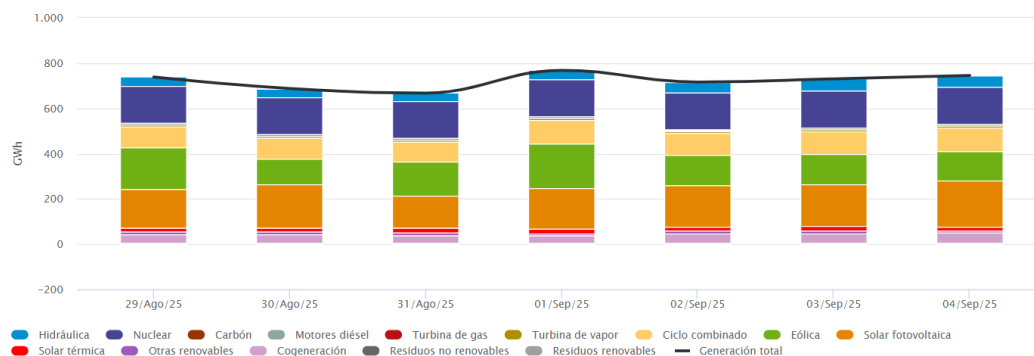


Figura 2: Estructura de la generación por tecnología en España. Fuente: Red Eléctrica de España, s.f.

3. CENTRALES HIDROELECTRICAS REVERSIBLES

3.1. Introducción

La energía hidroeléctrica se obtiene al convertir la energía potencial del agua en energía eléctrica. Esto se logra utilizando la fuerza del agua para mover una turbina hidráulica, la cual acciona un alternador que genera electricidad. Para que este proceso sea eficiente, es fundamental contar con un gran caudal de agua y una diferencia de altura significativa, conocida como “salto”, que permita al agua moverse desde “aguas arriba” hasta “aguas abajo” adquiriendo velocidad y, con ello, generando grandes cantidades de energía.

El rendimiento de las centrales hidroeléctricas es muy elevado, alrededor del 90-95 %, ya que casi toda la energía potencial del agua se aprovecha. Las principales pérdidas que reducen la eficiencia provienen de la fricción del grupo hidroeléctrico, las pérdidas de carga y las pérdidas en los equipos eléctricos.

Según el tipo de instalación, las centrales hidroeléctricas se clasifican en tres grandes categorías: centrales de pasada o fluyentes, centrales de embalse y centrales de almacenamiento o de bombeo. Este trabajo se enfoca en las últimas, es decir, en las centrales hidroeléctricas de bombeo.

3.2 Principios de funcionamiento de las centrales hidroeléctricas reversibles

Las centrales hidroeléctricas tienen como objeto la producción de energía eléctrica, empleando el aprovechamiento de la energía potencial que se puede extraer de un salto de agua mediante su almacenamiento, para posteriormente mediante su caudal transformarla en energía cinética y mecánica.

En cuanto a las centrales hidroeléctricas reversibles, se caracterizan por tener dos embalses o reservorios, superior e inferior, y un conjunto turbina-bomba. El agua se almacena en el embalse superior mediante el empleo de la bomba, para posteriormente ser turbinada hacia el embalse inferior. A modo esquemático, presentamos la Figura 3.

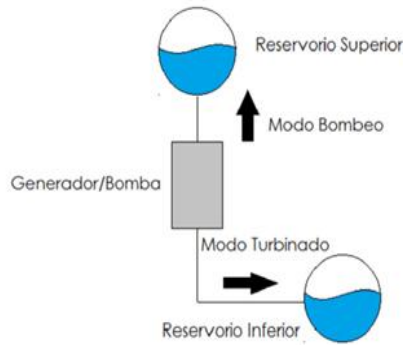


Figura 3: Principios de funcionamiento de las centrales hidroeléctricas reversibles. Fuente: Huggins, 2010

Las centrales hidroeléctricas reversibles se pueden dividir en dos grandes grupos, las de bombeo puro y mixto. La diferencia entre ellas es que en las de bombeo mixto hay un aporte natural de agua en el embalse superior, mientras que en las de bombeo puro, toda el agua que se encuentra en el embalse superior ha sido previamente bombeada, a excepción de las consecuencias climatológicas como condiciones de lluvia o nieve.

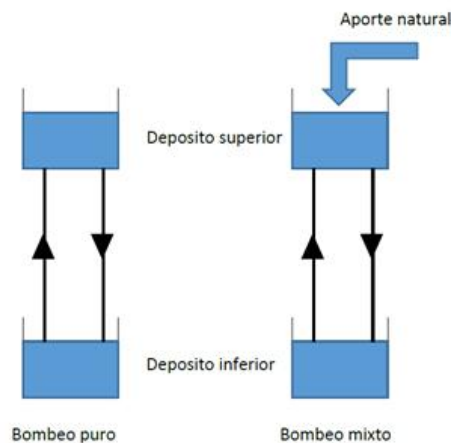


Figura 4: Tipo de centrales hidroeléctricas reversibles. Fuente: (Alarcón Mínguez, 2020)

3.3. Operación y componentes principales

Teniendo en cuenta las características del sistema energético y la relación entre la generación y el consumo de energía eléctrica, generalmente las centrales hidroeléctricas reversibles bombean agua al embalse superior en los momentos en que baja la demanda energética, y, por ende, el precio de la electricidad es más bajo. Por el contrario, en las horas punta donde el consumo eléctrico es más alto, y por tanto el precio de la electricidad sube considerablemente, el agua previamente almacenada en el reservorio superior se turbinada hacia el embalse inferior. De esta forma, se genera un balance económico positivo, vendiéndose la electricidad a un precio superior por el que se compra.

De acuerdo con el desarrollo anterior, el bombeo de agua genera un consumo de energía donde la fuente puede ser la propia red eléctrica, o como se verá en apartados siguientes, alimentarse a partir de un sistema de autoconsumo de fuentes de energía renovable como eólica o fotovoltaica, lo que permite depender en menor medida de la red eléctrica y ampliar la gestión de las horas de bombeo, traduciéndose en mayores beneficios económicos.

Las estrategias de ciclos de bombeo y turbinado son diversos según: las características y estrategias del mercado eléctrico en el que se encuentre la instalación, las tendencias horarias de consumo eléctrico, la época del año, etc. Se realiza la siguiente clasificación:

- Diario: opera en función de las horas pico y valle diarias.
- Semanal: opera según las tendencias de consumo eléctrico en función de actividad industrial. Se suele bombear agua en fin de semana y turbinar los días laborables.
- Estacional: opera en función de las tendencias de consumo eléctrico según la estacionalidad.

Además, las centrales hidroeléctricas reversibles también operan según su integración con el sistema eléctrico. Se divide la clasificación en tres grandes grupos:

- Central de respaldo: empleadas para demanda de energía puntual.
- Central de carga base: empleadas en la regulación del sistema eléctrico.
- Central de almacenamiento estratégico: empleadas para almacenar energía a largo plazo.

Para el correcto funcionamiento de una central hidroeléctrica reversible, la instalación requiere de los elementos principales que se muestran en la Figura 5 y se listan a continuación:



Figura 5: Funcionamiento de una central hidroeléctrica reversible. Fuente: Redacción de El Periódico de la Energía, s.f.

- Embalse superior: almacenamiento de agua bombeada.
- Embalse inferior: almacenamiento de agua turbinada.
- Presa: obra civil que permite el almacenamiento de agua, y por consiguiente la creación de embalses mediante el empleo de una estructura.
- Sistema de captación de agua: tomas situadas en los embalses superior e inferior, en las que permite la entrada del agua hacia la galería de conducción y tubería forzada.
- Tubería forzada: conducto por el que discurre el agua hacia la turbina/bomba. Diseñada con el fin de soportar grandes esfuerzos debido a la presión generada, y reducir pérdidas de energía durante el trayecto.
- Chimenea de equilibrio: permite absorber los esfuerzos debido a las variaciones de presión provocados por el golpe de ariete.
- Bomba: encargada de elevar el agua desde el embalse inferior al superior.
- Turbina: transformación de energía cinética en energía mecánica mediante el empleo de álabes o paletas. Las 3 turbinas más empleadas son la Pelton, Kaplan y Francis, siendo esta última la más empleada en las centrales reversibles ya que puede actuar como bomba o como turbina, ya que permite cambiar la dirección del flujo de agua en función de si se le aporta energía o no.
- Generador: transformación de energía mecánica en energía eléctrica.
- Transformadores: elevan la tensión eléctrica para el vertido y la distribución de la energía a la red eléctrica. También pueden disminuir la tensión con el fin de alimentar equipos específicos y servicios auxiliares.
- Vías de acceso a la instalación
- Sistemas de control y equipos auxiliares: tales como paneles de control, PLC's, ordenadores industriales, sensores, sistemas de comunicación, etc.

3.4. Ventajas y limitaciones de las centrales reversibles

3.4.1. Ventajas

- Almacenamiento de energía: el sistema se comporta como una gran batería renovable, en la que se puede generar electricidad según demanda o conveniencia.
- Aportan estabilidad en la red eléctrica: permiten equilibrar la generación y el consumo, aportando inercia al sistema.

- Respuesta de generación rápida: ante picos de demanda o fallas en el sistema eléctrico, al recibir la consigna de generación, esta es capaz de empezar a exportar energía eléctrica en escasos minutos.
- Renovable y limpia: gracias al ciclo del agua, esta forma de generación eléctrica se considera no contaminante para el medioambiente.
- Independencia eléctrica: aportada al territorio o país en el que se encuentra.
- Control de crecidas o sequías en ríos: reduciendo el riesgo de inundaciones o falta de agua en los mismos ya que, se puede retener agua en épocas de más lluvia, y soltar agua en épocas más secas.
- Espacios recreativos y turismo: los embalses pueden dar la oportunidad de aprovechamiento para espacios recreativos, atrayendo el turismo.
- Bajas emisiones de CO₂: emitiéndose únicamente durante la fase de construcción.

3.4.2. Inconvenientes

- Altos costes: en cuanto a los equipos y en la fase de construcción.
- Fase de construcción prolongada.
- Impacto ambiental y territorial: amplias extensiones terrestres y acuáticas se pueden ver afectadas en sus ecosistemas. Además, puede provocar una movilidad territorial o conflictos de carácter social.
- Complejidad en la elección del emplazamiento: este depende del recurso hídrico, espacio disponible, topografía, etc.
- Complejidad administrativa: trámites administrativos y burocráticos muy prolongados, exigentes y complejos.

3.5. Rol de las hidroeléctricas reversibles en la red eléctrica moderna

Tal como se explicó en apartados anteriores de este mismo anexo, la transición energética se ha visto impulsada por compromisos internacionales como el Acuerdo de París (2015), o los objetivos establecidos a nivel nacional según el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), en los que el sistema eléctrico ha incorporado una creciente proporción de energía renovable con el objetivo de alcanzar la descarbonización en el año 2050, pero a causa de ello, ha introducido una mayor variabilidad de la generación eléctrica debido a la intermitencia de la generación de fuentes de energía renovable como la solar o eólica.

Por este mismo hecho, para garantizar una estabilidad en el sistema eléctrico y asegurar generar la cantidad de energía necesaria para que esta se ajuste a la demanda, se busca la

implementación de soluciones eficaces de almacenamiento energético. Aunque las baterías convencionales a gran escala se encuentran aún en fase temprana en cuanto a desarrollo tecnológico e implementación se refiere, teniendo en cuenta las ventajas descritas en el apartado anterior, las centrales hidroeléctricas reversibles ya ofrecen una alternativa consolidada, probada y fiable. Este tipo de instalaciones funcionan como grandes sistemas de almacenamiento renovable que no solo permite gestionar el excedente energético, si no que contribuye al control de la inercia y frecuencia de red, y debido a su rápida respuesta, permiten mantener el equilibrio entre generación y consumo en picos de demanda o fallos del sistema, desempeñando así un papel clave en el sistema eléctrico moderno.

4. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

4.1. Radiación solar

La radiación solar es la energía que el sol genera mediante las reacciones nucleares de fusión en su núcleo y que se transmite en forma de radiación electromagnética. La mayor parte de esta energía se encuentra en el espectro visible (0,4 a 0,7 μm), razón por la cual los paneles solares no funcionan durante la noche [8].

Existen diferentes tipos de radiación solar: directa, difusa y reflejada (o de albedo).

- Radiación directa: compuesta por los rayos que llegan directamente del sol, siendo la de mayor energía.
- Radiación difusa: formada por los rayos solares dispersados en la atmósfera, procedentes de toda la bóveda celeste, como ocurre en días nublados.
- Radiación de albedo: corresponde a la radiación reflejada por la superficie terrestre hacia el receptor, por ejemplo, desde un lago o suelo claro.

La combinación de estas tres radiaciones se denomina radiación global, que representa la cantidad total de energía que recibe una superficie y que se busca medir y cuantificar.

Para cuantificar la radiación solar se emplean dos magnitudes relacionadas con la potencia y la energía incidentes sobre una unidad de superficie: irradiancia e irradiación.

- Irradiancia: es la potencia incidente por unidad de área y refleja la intensidad de la radiación solar. Se mide en $[\text{W}/\text{m}^2]$ y se representa comúnmente con la letra “G”.
- Irradiación: es la suma o integración de las irradiancias a lo largo de un periodo de tiempo determinado. Su unidad de medida es $[\text{J}/\text{m}^2]$.

4.2 Fundamentos de la conversión fotovoltaica.

La conversión fotovoltaica es el proceso mediante el cual la radiación solar se transforma en electricidad por el uso de células solares basadas en materiales semiconductores. La tecnología fotovoltaica convierte la luz solar en electricidad en una sola etapa gracias al efecto fotoeléctrico (Balenzategui Manzanares, 2008).

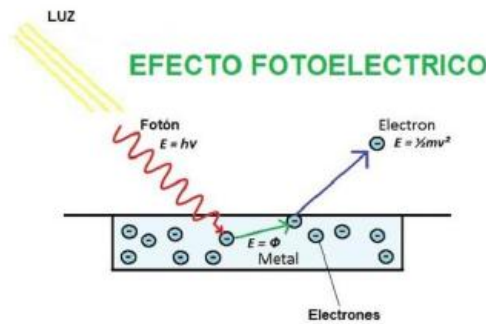


Figura 6: Efecto fotoeléctrico

Esto ocurre cuando los fotones de la luz solar inciden sobre el material semiconductor liberando electrones de valencia y creando huecos que tienen carga positiva. Gracias al campo eléctrico interno se recolectan las cargas y genera la unión p-n del semiconductor permitiendo la circulación de una corriente eléctrica continua (DC) por el circuito externo.

Los semiconductores más utilizados son de silicio, dopados con impurezas para crear regiones tipo n (exceso de electrones) y tipo p (exceso de huecos). Una célula solar tiene la siguiente estructura:

- Capa antirreflejante para reducir las pérdidas por reflexión.
- Malla metálica de contacto para capturar la mayor cantidad de luz posible.
- Capas activas del semiconductor (emisor y base) dónde se produce la generación de portadores.
- Para poder cerrar el circuito eléctrico hay un contacto metálico.

La eficiencia de conversión depende de factores como la absorción de la luz en el material semiconductor, la colecta eficiente de los portadores, las pérdidas por recombinación de portadores y las pérdidas resistivas y defectos de los materiales.

En cambio, el rendimiento de la célula se mide por parámetros como la corriente de cortocircuito (I_{sc}), tensión de circuito abierto (V_{oc}), Punto de máxima potencia (P_{mpp}), factor de forma (FF) y eficiencia de conversión energética (η).

4.3. Tecnologías actuales de paneles solares.

Actualmente, las tecnologías de paneles solares fotovoltaicos se han diversificado para adaptarse a distintas aplicaciones, entornos y presupuestos. Las principales tecnologías empleadas son silicio monocristalino, silicio policristalino, silicio amorfo y celdas de perovskita (Alfredo & De Jesús, 2021).

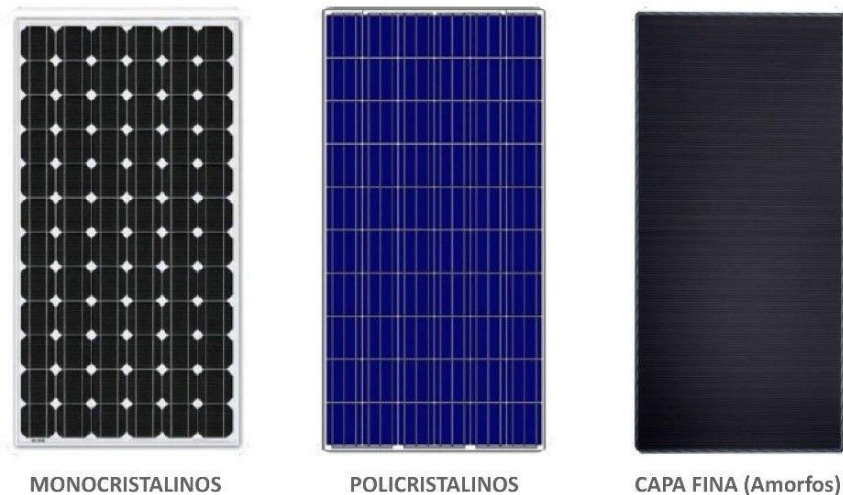


Figura 7: Tipos de paneles solares <https://solarfam.com/tecnologias-y-tipologias-de-paneles-fotovoltaicos/>

4.3.1. Paneles de silicio monocristalino.

Son los que ofrecen mayor eficiencia (20%-25%) y rendimiento. Son elaborados a partir de cristales de silicio de alta pureza creando una estructura uniforme que optimiza la captación y conversión de la radiación solar en electricidad.

Este tipo de paneles tiene una larga vida útil, mayor a 25 años y trabajan de manera eficiente en condiciones de baja radiación solar y altas temperaturas. Esto hace que sean ideales para los climas cálidos.

Por otro lado, el coste de fabricación es elevado. Es por lo que necesita una inversión inicial más alta, pero es compensado con la eficiencia y la vida útil de estos paneles.

4.3.2. Paneles de silicio policristalino.

Se conocen como multicristalinos, siendo una alternativa más económica respecto a los monocristalinos. Se fabrican a partir de múltiples fragmentos de silicio fundido dando lugar a una estructura de cristales desordenados. Esto reduce su eficiencia (18%-20%) y el coste de producción.

Por otra parte, también ofrecen una larga vida útil similar a los monocristalinos. Se usan en instalaciones de autoconsumo residencial y comercial por su relación de coste-beneficio.

4.3.3. Paneles de silicio amorfo (película delgada).

Este tipo de paneles pertenecen a la categoría de tecnología de película delgada por su fabricación a partir de capas muy finas de material semiconductor depositadas sobre la superficie como vidrio o plástico flexible.

En cuanto a su eficiencia, es inferior a los paneles de tecnología cristalina y oscila entre 6% y 10%. Es por este motivo que tiene un bajo coste de producción, facilidad de integración arquitectónica y se desempeña de manera correcta en condiciones de luz difusa o sombras parciales. Se pueden usar en diseños dónde el peso, la flexibilidad o el coste son factores muy importantes.

4.3.4. Paneles de perovskita.

Las celdas solares de perovskita son tecnologías más prometedoras y nuevas en el ámbito fotovoltaico. Son materiales con estructura cristalina perovskita que ofrecen una eficiencia superior a 22% en los ensayos de laboratorio. Los procesos de fabricación son más económicos y son menos complejos que los paneles solares de silicio.

La perovskita permite que la producción de paneles solares sea flexible, ligera y semitransparente y puede ser usada en superficies plásticas, vidrios o textiles. Por otra parte, su fabricación requiere temperaturas inferiores a 200°C, reduciendo el consumo energético en su producción. Sin embargo, hay desafíos para en cuánto su estabilidad y durabilidad a largo plazo, especialmente frente a la humedad y la degradación por exposición prolongada.

4.4. Elementos de una instalación fotovoltaica

Una instalación fotovoltaica típica incluye paneles solares que captan la radiación, la estructura de soporte de los paneles, un inversor que convierte la energía de corriente continua a alterna, y protecciones, sistemas de control y cableado de baja y media tensión que conectan y protegen los componentes. En la imagen se pueden identificar claramente estos elementos.

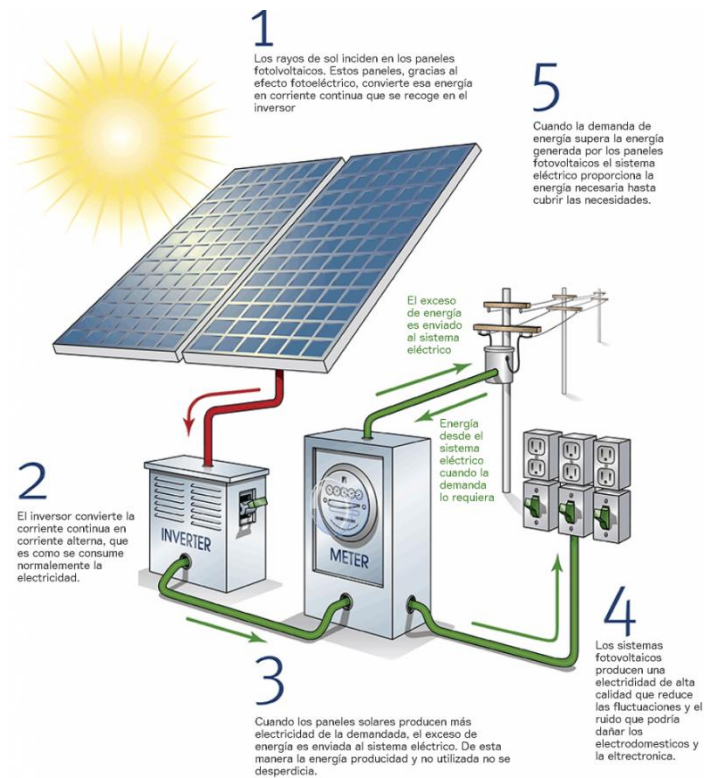


Figura 8: Esquema de un sistema fotovoltaico. Fuente: (World Bank Group, 2019)

4.5 Producción solar y variabilidad.

La producción de energía solar (Riquelme Martínez, 2023) se basa en la conversión de la radiación solar en energía utilizable en forma de electricidad para los sistemas fotovoltaicos o calor útil para las aplicaciones térmicas. Depende de la cantidad y calidad del recurso solar disponible, es decir, de la irradiancia solar que llega a la superficie terrestre.

La variabilidad solar (Riquelme Martínez, 2023) se refiere a los cambios en la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre. Hay varios tipos de variabilidad:

4.5.1. Variabilidad espacial.

Depende de la distribución geográfica de nubes y partículas atmosféricas. Es más homogénea en zonas planas y desérticas y más heterogénea en áreas montañosas o costeras.

4.5.2. Variabilidad temporal a largo plazo.

Está asociada a los ciclos estacionales y anuales que son influenciados por la producción solar durante distintos periodos del año.

4.5.3. Variabilidad temporal a corto plazo.

Es causada por el paso de nubes que generan fluctuaciones en la irradiancia en un tiempo muy corto, pueden ser minutos o segundos. Es la variabilidad más crítica ya que afecta a la estabilidad del sistema en las plantas solares.

La variabilidad (Riquelme Martínez, 2023) puede generar un efecto en cascada en la operación de la planta solar donde las fluctuaciones de la radiación pueden alterar la temperatura y caudal del fluido de trabajo, influye en la transferencia de calor en los intercambiadores y la eficiencia del ciclo termodinámico. Además, la potencia generada puede presentar errores entre 5% y 20% en función de la resolución temporal de los datos de radiación y la magnitud de las variaciones. Por otra parte, en días con alta variabilidad, la producción de energía puede descender significativamente y la turbina puede funcionar a carga potencial.

4.6. Aplicación de la fotovoltaica en centrales hidroeléctricas reversibles.

La aplicación de la energía fotovoltaica en plantas híbridas, como centrales hidroeléctricas reversibles, mejora la flexibilidad, eficiencia y sostenibilidad de la generación eléctrica. Dicha combinación permite aprovechar la energía solar como fuente renovable intermitente, y la hidroeléctrica de bombeo, como sistema de almacenamiento a gran escala (Beltrán, et al., 2018). En los siguientes puntos se describen las diferentes modalidades u objetivos principales del aprovechamiento fotovoltaico en centrales hidroeléctricas reversibles.

4.6.1. Fotovoltaica para vertido a red y excedentes para bombeo.

Las instalaciones fotovoltaicas que tienen como objetivo verter a red la energía, sobredimensionando su tamaño, en las horas de más irradiancia solar, generan excedentes de energía. Dichos excedentes pueden ser consumidos por los servicios auxiliares de la instalación hidráulica, o bien, bombeando agua al embalse superior, para almacenar energía en forma de potencial hidráulico.

4.6.2. Fotovoltaica para autoconsumo.

Bombear agua hacia el embalse superior genera un consumo de energía. Normalmente, las centrales eléctricas reversibles realizan este proceso cuando hay baja demanda energética y, por ende, el precio de la energía es inferior. La incorporación de generación fotovoltaica permite usar la energía solar para alimentar parcial o totalmente las bombas reduciendo la dependencia de la red eléctrica y optimizando los costes de producción, ampliando así las horas de bombeo. Dicha instalación fotovoltaica puede estar dimensionada con el fin principal de que la energía producida

sea consumida por la bomba, en las horas de generación solar. Este tipo de instalaciones pueden verter a red los excedentes no consumidos, realizar un vertido 0, o almacenarlos en un sistema de baterías. Además, instalando variadores de frecuencia, se puede realizar una gestión de la variabilidad solar, es decir, regular el caudal incrementando o reduciendo la potencia de la bomba según la disponibilidad de generación solar.

4.6.3. Fotovoltaica e hidráulicas integradas en red inteligente para la participación en mercados.

Empleando la combinación de las dos modalidades de fotovoltaica descritas en los apartados 4.4.1 y 4.4.2, y con el fin de maximizar los beneficios económicos, se puede establecer una red inteligente en la que según el estado del mercado energético y precios de energía, se decida si verter energía fotovoltaica a red combinado, o no, con la generación hidráulica, si emplear la fotovoltaica como autoconsumo bombeando agua o si bombear agua consumiendo energía de red en horas en las que la energía está barata.

4.7. Sistemas fotovoltaicos flotantes.

Las plantas fotovoltaicas flotantes consisten en módulos fotovoltaicos sustentados por dispositivos de flotación, pudiendo también emplearse estos para hacer flotar otros elementos presentes en una planta fotovoltaica convencional, como inversores o cajas de conexiones. Figura 9

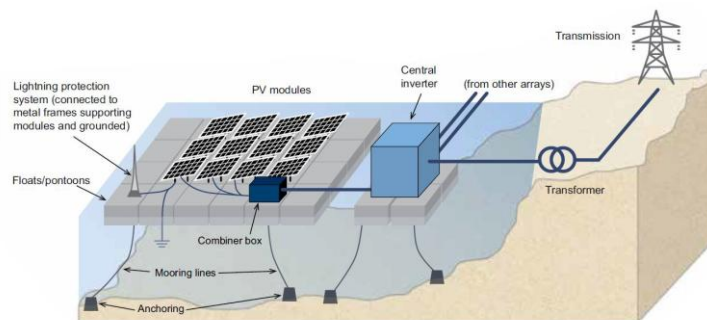


Figura 9: Esquema sistema flotante típico. Fuente: (World Bank Group, 2019)

En la anterior figura, se aprecia el sistema de flotación, los amarres y fondeos que permiten que la estructura flotante permanezca en el lugar, así como la aparamenta eléctrica básica compuesta por el cableado, la caja de conexiones, los inversores y los transformadores, pudiendo estos encontrarse en tierra o sobre una plataforma flotante, en función de las características específicas del emplazamiento y el proyecto

De esta forma, las plantas fotovoltaicas flotantes tienen cabida en gran variedad de masas de agua, tales como embalses de centrales hidroeléctricas, estanques agrícolas o industriales, e incluso el mar, emplazamientos que se estudiarán con detalle en el correspondiente apartado.

Aún se encuentra muy lejos de la fotovoltaica terrestre, pero está en pleno crecimiento. En España existen 11 MW instalados y 28 MW en desarrollo, mientras que a nivel mundial se alcanzaron los 21,2 GW en 2024 y con previsiones de superar los 77 GW en 2033.

4.7.1 Soluciones técnicas actuales para fotovoltaica flotante

En este apartado se analizan los principales elementos que componen una planta fotovoltaica flotante que difieren de las convencionales, siendo estos los flotadores y sistemas de anclajes y amarres.

4.7.1.1 Flotadores

En una planta fotovoltaica flotante, los flotadores constituyen la estructura principal que sostiene los distintos componentes sobre la superficie del agua, al mismo tiempo que facilita el acceso a los equipos de la instalación. Se pueden emplear flotadores para módulos fotovoltaicos, cajas de conexión, inversores, transformadores, conductores y pasarelas.

Flotadores puros o flotadores con módulos fotovoltaicos

En este tipo de sistema de flotación, los módulos fotovoltaicos se montan directamente sobre los flotadores, pudiendo existir la configuración de un módulo por flotador o varios módulos por flotador (balsa). Están compuesto por un flotador principal en el que se apoya el módulo y uno secundario para conectar todos los flotadores.

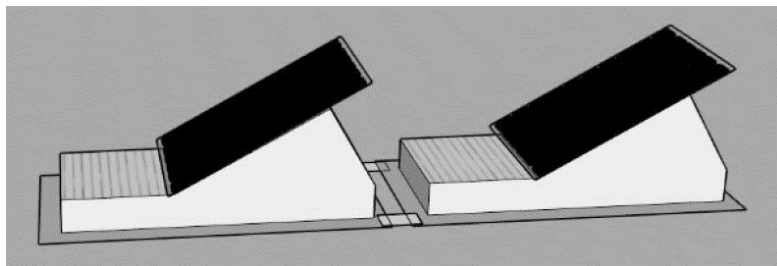


Figura 10: Flotadores puros. Fuente: CleanSolar Solutions, s.f.

En este tipo de tecnología, generalmente se utiliza polietileno de alta densidad (HDPE), material resistente a la radiación ultravioleta y a la corrosión, y además compatible con el agua potable. Entre sus ventajas destacan que son sistemas fáciles de montar e instalar, con posibilidad de ampliar la planta de manera sencilla si se requiere, y que al contener pocas partes metálicas se reduce el riesgo de corrosión. No obstante, también presentan algunas desventajas. Las

características de los flotadores pueden reducir la circulación de aire y el efecto de refrigeración que proporcionan las masas de agua a los módulos. Además, el movimiento constante causado por olas o corrientes puede generar fallos estructurales en juntas y conectores.

Sistema de marcos metálicos

En estos sistemas, se emplean como estructuras marcos metálicos sustentados por flotadores, soportando estos marcos varios módulos fotovoltaicos o dispositivos como inversores o cajas de conexión.

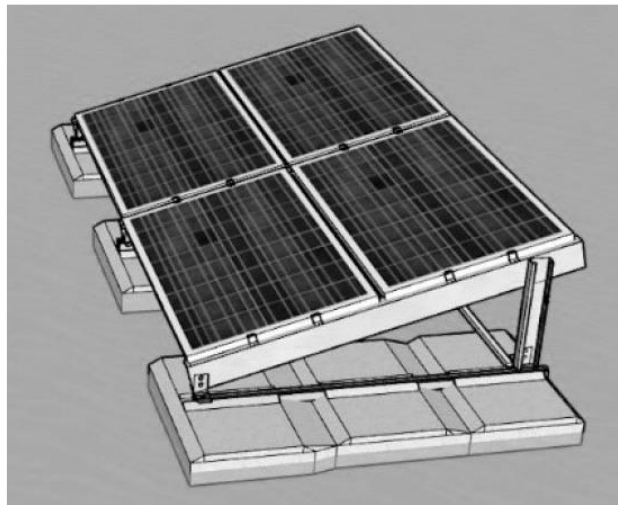


Figura 11: Sistema de marcos metálicos. Fuente: CleanSolar Solutions, s.f.

Entre sus ventajas, al agrupar varios módulos en una misma estructura metálica, se reducen las pérdidas por *mis match* causadas por el oleaje. Además, permiten una mejor circulación de aire en la parte posterior de los módulos en comparación con los flotadores simples analizados previamente. Como desventajas, estas estructuras pueden ser complicadas de montar, y el acceso para tareas de mantenimiento puede resultar difícil en determinados diseños.

Membranas

Mediante este sistema, los módulos se colocan en una membrana reforzada y sustentada a través de anillos, conectados a los sistemas de amarre y fondeo.

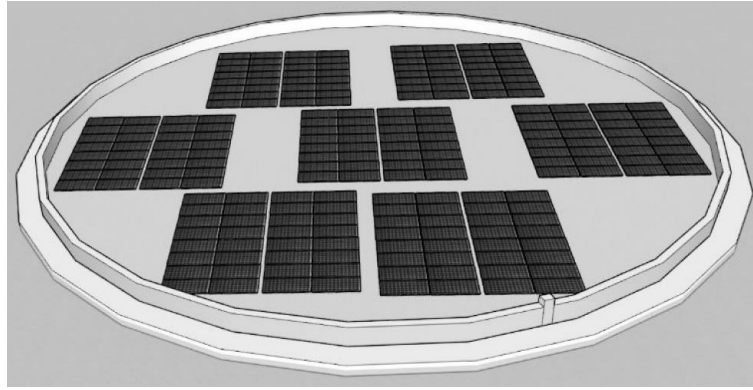


Figura 12: Membranas. Fuente: CleanSolar Solutions, s.f.

Entre sus ventajas, se ha observado un contacto más directo con el agua en comparación con otras tecnologías, lo que proporciona ciertos beneficios de refrigeración, aunque este efecto no sea muy marcado debido a la presencia de una película sólida entre los módulos y la superficie del agua. Por otro lado, el poco desarrollo comercial de esta tecnología refleja su baja aplicabilidad y utilidad en la actualidad.

4.7.1.2 Sistemas de anclajes y de amarres

Para mantener una planta flotante estable frente a viento, olas o corrientes, se requieren sistemas de anclaje y amarre adaptados al emplazamiento, considerando profundidad, nivel del agua, tipo de suelo, condiciones ambientales y crecimiento marino. En el cálculo estructural se deben evaluar acciones gravitatorias, viento, corrientes y oleaje, siguiendo normas como el CTE DB SE-AE y el Eurocódigo 1. Para mayor precisión, se suelen emplear estudios de elementos finitos.

Amarres

Los amarres son líneas que se fijan por un extremo al sistema de flotación y por el otro al sistema de anclaje, y su función principal es limitar los desplazamientos horizontales de la plataforma flotante dentro de los rangos definidos en el diseño. Para ello, los amarres generan fuerzas y momentos de restauración, devolviendo la estructura a su posición original frente a fuerzas externas. El número y disposición de amarres depende de las características del sistema de flotación y de las condiciones ambientales del emplazamiento. (CleanSolar Solutions, s.f.)

Existen diferentes tipos de amarres, entre los más comunes:

- Amarres verticales: se colocan en dirección vertical y soportan principalmente el peso de la plataforma.

- Amarres inclinados o catenarios: forman curvas que permiten absorber tensiones y movimientos horizontales.
- Amarres rígidos: tubos o barras que ofrecen gran resistencia y limitan casi por completo el desplazamiento.

Anclajes

Los anclajes son elementos estructurales a los que se conectan los amarres, con el objetivo de proporcionar estabilidad y fijación al sistema de flotación que sustenta la planta. Así, existen tres tipos de anclajes: en el fondo, en la costa o pilotes:

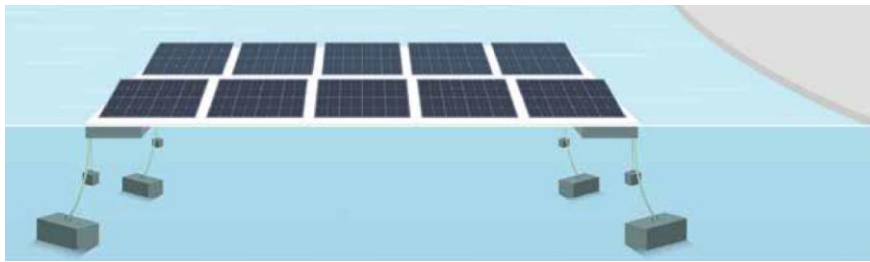


Figura 13: Anclajes en el fondo. Fuente: CleanSolar Solutions, s.f.

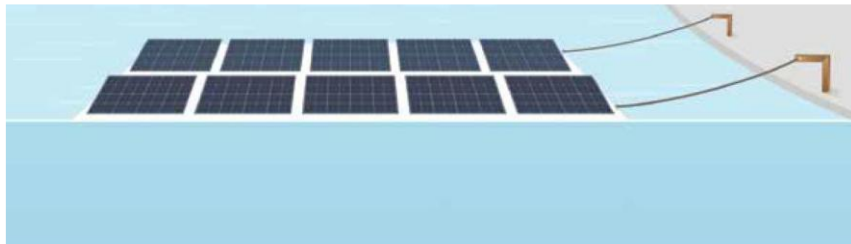


Figura 14: Anclajes en la costa. Fuente: CleanSolar Solutions, s.f.



Figura 15: Anclaje en pilotes. Fuente: CleanSolar Solutions, s.f.

4.7.2 Ventajas y desventajas de las plantas fotovoltaicas flotantes

Sus principales ventajas son:

- Mayor eficiencia: el agua que se encuentra alrededor actúa como refrigerante natural, mejorando el rendimiento de los paneles entre un 2-3% y hasta un 10-12% según diversos estudios.

- Optimización del espacio: se aprovechan superficies que no tenían uso productivo y se libera con ello suelo agrícola o protegido.
- Ahorro de agua: la sombra de los módulos reduce la evaporación y ayuda a controlar la proliferación de algas.
- Integración con infraestructuras: permite compartir conexiones y equipos propios de centrales hidroeléctricas, reduciendo costes y simplificando el sistema.

Sin embargo, al estar en etapa de crecimiento presenta una serie de desafíos y retos, entre los que podemos destacar:

- Coste inicial elevado por los flotadores, anclajes y materiales empleados, que deben ser resistentes a la humedad etc.
- Impacto ambiental local que se deberá estudiar y contemplar exhaustivamente en cada proyecto.
- Complejidad técnica en embalses con condiciones climáticas complicadas como oscilaciones grandes, oleajes o vientos fuertes.

Contextualizado en las centrales reversibles hidroeléctricas, la integración de paneles solares fotovoltaicos flotantes permite aprovechar excedentes solares para bombeo, conservar agua almacenada o mejorar la flexibilidad operativa de la planta, optimizando la hibridación y apoyando a la transición energética.

5. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO CON BATERIAS

5.1. Introducción a los sistemas de almacenamiento energético.

La actual integración de fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, resalta la necesidad de sistemas de almacenamiento energética. Debido a esto, el almacenamiento de energía se ha convertido en el elemento clave para garantizar la estabilidad y fiabilidad de los sistemas eléctricos actuales.

El almacenamiento con baterías (Tarrillo, 2012) permite equilibrar la oferta y la demanda, actuando como una reserva de electricidad que facilita la integración de energías renovables en la red, estabiliza las fluctuaciones de voltaje y frecuencia, optimizando el uso de las infraestructuras de generación y transmisión existente. Además, permite almacenar energía durante los periodos de baja demanda para utilizarla en horas punta, cuando el coste de la electricidad es mayor.

Las tecnologías de almacenamiento (Tarrillo, 2012) se clasifican según su funcionamiento y presentan las características específicas en cuanto a la capacidad, eficiencia, tiempos de respuesta y costes determinando su aplicabilidad y el tipo de demanda energética. Existen los siguientes tipos: almacenamiento químico (hidrógeno o biocombustibles), electroquímico (baterías), mecánico (aire comprimido), eléctrico (capacitores), térmico (almacenamiento de calor) y electromagnético.

Por lo tanto, los sistemas de almacenamiento tienen un papel fundamental en la descarbonización del sector energético reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles y mejorando la calidad del suministro eléctrico.

5.2. BESS: Sistema de almacenamiento de baterías

La tecnología BESS son sistemas en los que las baterías, bien individualmente o en conjunto, se usan para almacenar la electricidad producida por las centrales generadoras y ponerla a disposición cuando se necesite.

En la tecnología BESS, los componentes fundamentales son los bloques de baterías, pero también están presentes otros elementos: un inversor, comúnmente llamado en el sector PCS, que convierte la corriente continua de las baterías en corriente alterna de la red y viceversa, un transformador, para adaptar la tensión del sistema a la de la red; y por último, los sistemas auxiliares como de refrigeración.

La tecnología se basa en el uso de almacenamiento electroquímico, capaz de almacenar la energía producida por centrales, es decir es un banco de energía que puede devolver la energía almacenada, haciéndolo a demanda.



Figura 16: Esquema de un sistema BESS 1/2. Fuente: Enel Green Power, s.f.



Figura 17: Esquema de un sistema BESS 2/2. Fuente: Enel Green Power, s.f.

5.3 Tipos de baterías aplicables

5.3.1. Baterías de iones de litio (Li-on).

Las baterías de iones de litio (Quintero, 2021) es una de las tecnologías de almacenamiento energético más utilizada por su alta densidad energética, su eficiencia y larga vida útil. Los componentes de este tipo de baterías son los siguientes: ánodo, cátodo, separador y un electrolito.

Funciona gracias a reacciones electroquímicas reversibles que permiten múltiples ciclos de carga y descarga.

5.3.2. Baterías de iones de plomo-ácido.

Las baterías de plomo-ácido (Flores et al., 2025) son un sistema de almacenamiento energético utilizado frecuentemente debido a su bajo coste inicial, su facilidad de fabricación y madurez tecnológica. Hay varios tipos de baterías de plomo-ácido: de electrolito líquido, VRLA (Valve Regulated Lead Acid), AGM (Absorbed Glass Mat) y GEL.

La eficiencia de este tipo de baterías es inferior si las comparamos con las baterías de iones de litio, pero sigue siendo una opción viable para instalaciones de bajo presupuesto.

5.3.3. Baterías de flujo redox.

Las baterías de flujo redox (Ricardo et al., 2023) son un tipo de almacenamiento electroquímico donde la energía es almacenada en electrolitos líquidos que contienen pares redox (reducción-oxidación) disueltos en soluciones acuosas. Son almacenados en tanques externos y circulan a través de una celda electroquímica donde se realiza la conversión de energía química a eléctrica y al revés.

Las baterías más comunes son las baterías de flujo de vanadio (VRFB) donde ambos electrolitos contienen diferentes estados de ion vanadio, evitando la contaminación cruzada.

5.3.4. Baterías de sodio-azufre (NaS).

Las baterías de sodio-azufre (González-Madroño, 2007) son sistemas de almacenamiento de energía a alta temperatura donde el sodio metálico (Na) actúa como ánodo y azufre (S) como cátodo y, se encuentran separados por un electrolito cerámico permitiendo el paso de los iones de sodio.

En el proceso de la descarga los iones de sodio migran gracias al electrolito sólido, reaccionan con el azufre formando polisulfuros de sodio y, liberan electrones al circuito externo (González-Madroño, 2007). Normalmente la temperatura de operación se encuentra entre 300-350°C para mantener ambos elementos en estado líquido.

5.4. Parámetros técnicos clave: eficiencia, DoD, ciclos de vida.

5.4.1. Baterías de iones de litio (Li-on).

Los parámetros técnicos clave de estas baterías son los siguientes (Quintero, 2021):

- Eficiencia: 85-95%.
- Profundidad de descarga (DoD): 80-100%.
- Número de ciclos de vida: 2000

5.4.2. Baterías de iones de plomo-ácido.

Los parámetros técnicos clave de este de baterías son las siguientes (Flores et al., 2025):

- Eficiencia: 75-85%.
- Profundidad de descarga (DoD): 70-80%.
- Número de ciclos de vida: 500-800.

5.4.3. Baterías de flujo redox.

Los parámetros técnicos clave de este de baterías son las siguientes (Ricardo et al., 2023):

- Eficiencia: 70-80%.
- Profundidad de descarga (DoD): hasta el 100%.
- Número de ciclos de vida: >10000.

5.4.4. Baterías de sodio-azufre (NaS).

Los parámetros técnicos clave de este de baterías son las siguientes (González-Madroño, 2007):

- Eficiencia: 80-90%.
- Profundidad de descarga (DoD): 100%.
- Numero de ciclos por vida: 2500

5.5 Rol de las baterías en el soporte a renovables y a sistemas de bombeo.

El almacenamiento de energía a través de baterías (Ayabaca Landi, et al., 2024) tiene un papel importante en la integración eficiente de las energías renovables en los sistemas eléctricos. Esto es debido a que las fuentes de energía como la solar y eólica son de generación intermitente y variable que viene condicionada por factores climáticos. En estos casos, las baterías actúan como un elemento de soporte dando flexibilidad, estabilidad y capacidad de respuesta antes las fluctuaciones de la generación y la demanda.

Destacan las baterías de iones de litio (Ayabaca Landi, et al., 2024) por su alta densidad energética y su capacidad de respuesta en un tiempo corto. Esto permite almacenar los excedentes de energía renovable en los momentos de baja demanda y liberarlos cuando la generación disminuye.

Sin embargo, el uso de las baterías genera desafíos como la degradación de los materiales, disponibilidad limitada de litio (Ayabaca Landi, et al., 2024) y, los problemas ambientales asociados al reciclaje y sostenibilidad. A pesar de ello, los nuevos materiales más sostenibles y tecnologías de reciclaje avanzadas permiten prolongar la vida útil de estos sistemas reduciendo el impacto ambiental.

Por otro lado, la tendencia actual (Ayabaca Landi, et al., 2024) apunta hacia los sistemas de almacenamiento híbridos combinando las baterías con otras tecnologías como almacenamiento térmico. Esto permite mejorar la eficiencia global del sistema adaptándose a las necesidades de la demanda.

La integración de baterías en el soporte a renovables (Ayabaca Landi, et al., 2024) depende también de marcos regulatorios y económicos adecuados ya que son fundamentales para fomentar la adopción de estas tecnologías y acelerar la transición hacia un modelo energético más flexible y sostenible.

Por último, la integración de baterías en una instalación fotovoltaica integrada con una central hidroeléctrica reversible permite el almacenamiento para:

- Controlar la gestión de la energía fotovoltaica producida, decidiendo cuando consumirla.
- Aprovechamiento de excedentes en la generación fotovoltaica.
- Sistema de alimentación para el bombeo y servicios auxiliares de la instalación fotovoltaica e hidroeléctrica.
- Controlar la variabilidad de energía fotovoltaica producida debido a factores climatológicos, con almacenamientos parciales para evitar que dichos picos de generación afecten al sistema de bombeo de la instalación hidráulica.

6. INTEGRACIÓN DE SISTEMAS HÍBRIDOS

6.1. Concepto de hibridación energética

La hibridación energética consiste en la combinación de múltiples fuentes de energía renovable junto con sistemas de almacenamiento, con el objetivo de aprovechar sus sinergias y compensar sus debilidades individuales. En dicho contexto se centra en combinar energía solar fotovoltaica y centrales hidroeléctricas reversibles junto con sistemas de baterías. Esta combinación permite una generación más flexible, estable y eficiente para responder a la demanda eléctrica y garantizar un suministro continuo y fiable.

6.2. Esquemas de integración: conexión AC, DC o híbrida.

- Conexión AC: es el modelo más utilizado por su facilidad de integración en el que cada fuente opera con su propio inversor conectado a la red de corriente alterna.
- Conexión DC: es el tipo de esquema en el que todos los componentes se conectan en una red DC común antes de pasar por un inversor común. De esta manera se obtiene una mayor eficiencia al evitar conversiones innecesarias, aunque es más compleja en cuanto a diseño, operación y mantenimiento.
- Híbrido: combina ambos modelos y permite optimizar los flujos de trabajo según el caso de uso. Este modelo es interesante y avanzado para modelos avanzados que necesitan un mayor control y gestión energética precisa.

6.3 Beneficios técnicos y operativos del sistema híbrido

La integración de sistemas PV + baterías + hidroeléctrica reversible ofrece numerosas ventajas:

- Mayor estabilidad de la red: esto se debe a un mayor respaldo inmediato de las baterías y la capacidad reguladora que presenta la energía hidroeléctrica.
- Optimización del recurso solar: almacenamiento estratégico de la producción fotovoltaica y sus excedentes.
- Disminución del LCOE: se debe a compartir infraestructura y reducir las necesidades de capacidad instalada de reserva.
- Aumento de la fiabilidad: debido a la disposición de 3 fuentes de energía complementarias.
- Aumento de la rentabilidad económica de la instalación: debido a la capacidad de vertido a red, de la gestión inteligente de la energía producida según estado del mercado eléctrico, o por la reducción del consumo de energía de red para el bombeo o servicios auxiliares.

6.4. Desafíos de la integración: técnicos, económicos y regulatorios

A nivel técnico es mucho más complejo que el resto de las instalaciones que solo requieren de una fuente de energía renovable. Por ello se necesitan estrategias de control y gestión del flujo energético más trabajadas.

Si se mira el apartado económico, la inversión inicial va a ser superior, principalmente por los grandes costes de baterías y la necesidad de sistemas de gestión inteligentes.

Y a nivel regulatorio, existen numerosos países que no apoyan y facilitan dichas hibridaciones o que simplemente no reconocen sus beneficios energéticos.

7. IMPACTOS AMBIENTALES Y DE SOSTENIBILIDAD

7.1. Huella ecológica de cada componente

En hibridaciones de este tipo, cada tecnología tiene una huella ambiental claramente diferenciada. La fotovoltaica presenta un impacto bajo durante su operación, aunque su fabricación lleva un consumo energético alto además de usar materiales críticos como el silicio o la plata. En cuanto a las baterías, por ejemplo, las de ion-litio implican de procesos mineros intensivos, teniendo un efecto negativo sobre el medio ambiente (agua, biodiversidad...).

Y por su parte, las centrales hidroeléctricas reversibles tienen un impacto alto inicial en la construcción por su gran obra civil, aunque en la parte operativa presenta un impacto muy bajo, y más si se utiliza una infraestructura existente.

7.2. Análisis de ciclo de vida y reciclabilidad

La fotovoltaica por norma general amortiza su energía incorporada en pocos años y ya existen distintos procesos de reciclaje para los módulos fotovoltaicos entre otros al final de su vida útil. Las baterías son la parte más complicada, ya que aún presenta desafíos en reciclaje eficiente y en mejorar su vida útil, aunque se están desarrollando soluciones industriales para recuperar los materiales críticos. Las infraestructuras hidroeléctricas presentan una vida útil muy extensa y mejoran su sostenibilidad si se emplean infraestructuras ya desarrolladas.

7.3. Beneficios medioambientales de la hibridación

La principal ventaja y en gran parte por lo que se llevan a cabo hibridaciones tan grandes es que la combinación de estas tecnologías permite reducir las emisiones de CO₂ en gran cantidad. Además, permite mejorar la gestión del agua y la energía generada para estabilizar la red.

7.4. Alineación con los objetivos de sostenibilidad

Este tipo de proyectos también se llevan a cabo con una visión sostenible que contribuya de manera directa a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente al ODS 7 (energía limpia y asequible), ODS 9 (infraestructura resiliente) y la ODS 13 (acción por el clima). Esto se debe a que está impulsando una transición energética basada en tecnologías limpias, eficientes y complementarias.

8. CASOS REALES: PROYECTOS HÍBRIDOS SIMILARES EN EL MUNDO

En esta sección se van a revisar casos reales y/o estudios representativos de la integración de energía solar fotovoltaica y sistemas de almacenamiento por baterías en centrales hidroeléctricas reversibles.

8.1 Proyecto Híbrido de la Central Hidroeléctrica de Bui (Ghana)

Situada en el oeste de Ghana, concretamente en el río Black Volta, en la frontera entre las regiones de Savannah y Bono, es el único caso actualmente en operación que integra de una planta hidroeléctrica con generación solar fotovoltaica y almacenamiento en baterías.

La planta entró en operación el 19 de diciembre de 2013, con una capacidad instalada de 404 MW, distribuidas en tres turbinas Francis de 133,33 MW y una auxiliar de 4 MW para el caudal ecológico. La infraestructura se ejecutó bajo un contrato EPC o llave en mano por Sinhydro Corporation, con una inversión final de 790 millones de USD.

Posteriormente, la Bui Power Authority ha desarrollado una estrategia de diversificación energética incorporando:

- Una planta fotovoltaica terrestre de 50 MWp.
- Una planta solar flotante de 5 MWp sobre el propio embalse.
- Un sistema de almacenamiento de energía en baterías (BESS) con 30 MWh de capacidad.

Este sistema híbrido está centrado en priorizar la energía solar durante el día mientras que el recurso hidráulico y las baterías cubren los picos de demanda y las horas nocturnas, mejorando así la estabilidad de la red.

Entre sus principales beneficios destacan la reducción de más de 47.000 t de CO₂ anuales, la optimización del uso hidráulico en épocas secas, una mayor fiabilidad de la red eléctrica y la disminución del coste de energía gracias a la sinergia entre tecnologías. Además, incorpora una estrategia de operación y mantenimiento avanzado que le convierte en un referente en el ámbito de las hibridaciones renovables.

8.2 Estudio de Hibridación Simulada: Caso Noruega (IFE)

Ante la escasez de hibridaciones reales de hidroeléctrica, fotovoltaica y baterías, se han llevado a cabo numerosas simulaciones y estudios que han explorado la viabilidad técnica y económico de este tipo de integraciones. Uno de los más importantes y relevantes ha sido el desarrollado por el Instituto de Tecnología Energética (IFE) de Noruega.

El estudio tiene la premisa de instalar paneles solares flotantes en embalses de centrales hidroeléctricas reversibles existentes., combinados con sistemas de almacenamiento en baterías de ion-litio. Los objetivos de esta simulación son optimizar la producción renovable, reducir la dependencia de los combustibles fósiles y maximizar la eficiencia.

Este estudio los llevó a realizar un modelo que resultó de la siguiente manera:

- La inclusión de baterías mejora el rendimiento global del sistema y disminuye los esfuerzos por arranque y parada de las turbinas.
- De esta forma se reducía el coste de la energía (LCOE) hasta en un 2% gracias a una operación más predecible y estable.
- La generación híbrida permite generar energía de manera más continua reduciendo la necesidad de capacidad instalada de reserva.

Por tanto, se demostró que este tipo de proyectos son viables técnicamente en zonas similares climáticamente a Noruega, reforzando aún más la posibilidad de llevar a cabo estas hibridaciones en Europa.

Ambos enfoques, tanto el práctico como el analítico resultan complementarios y aportan una visión integral sobre la viabilidad de las hibridaciones hidro-solar-baterías. Por un lado, el caso de Ghana demuestra que la implementación real y operativa es posible, rentable y replicable. Por otro lado, el estudio noruego valida, desde un enfoque técnico y de simulación, que este tipo de integraciones puede optimizar la gestión energética y reducir costes en entornos europeos. En conjunto, estos referentes refuerzan la viabilidad técnico-económica del modelo híbrido.

9. BIBLIOGRAFIA

Alarcón Cáceres, F. A. (2022). Diseño conceptual de centrales hidroeléctricas a bombeo usando agua desalinizada. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil.

Alarcón Mínguez, J. M. (2020). Estudio de viabilidad para una central hidroeléctrica reversible en el embalse del Molinar. Universitat Politècnica de València.

Alfredo, A. P., & De Jesús, R. L. A. (2021, 19 agosto). Evaluación de las tecnologías en paneles fotovoltaicos para usarse en Colombia. <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/719>

Ayabaca Landi, D., Arequipa Quishpe, E., Espinoza González, J., & Naranjo Cruz, J. (2024). Almacenamiento de energía en sistemas renovables: Baterías versus alternativas emergentes. *Revista Social Fronteriza*, 4(5), e467. [https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4\(5\)467](https://doi.org/10.59814/resofro.2024.4(5)467)

Balenzategui Manzanares, J. L.º. (2008). *Fundamentos de la conversión fotovoltaica: la célula solar* [Máster en Energías Renovables y Mercado Energético 2007/2008]. Escuela de Organización Industrial.

Beltrán, A., Gracia-León, H., Rodríguez-Urrego, D., & Rodríguez-Urrego, L. (2018). Diseño y cálculo de una central híbrida solar-hidráulica en Gran Canaria. *Dyna*, 85(206), 250–257.

Bui Power. (s.f.). Bui Hydro Project. <https://buipower.com/bui-hydro-project/>

CleanSolar Solutions. (s.f.). The effects of bird droppings on solar panels – The harsh reality. <https://cleansolar.solutions/effect-of-bird-droppings-on-solar-panels/>

Comité Europeo de Normalización (CEN). (2005). Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones del viento. Bruselas, Bélgica: CEN.

Enel Green Power. (s.f.). BESS: Sistema de almacenamiento de energía en batería. <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/almacenamiento/bess>

Energías Renovables. (2025, 24 julio). Fotovoltaica flotante: esa tecnología que no.... <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/fotovoltaica-flotante-esa-tecnolog-a-que-no-20250724>

Flores, H. J. J., Valdiviezo, A. C., Muñoz, A. G., Arreortúa, N. P., Castillejos, R. D., & Domínguez, C. M. L. (2025, 16 abril). Evaluación del rendimiento de baterías de ion-litio y plomo-ácido en sistemas de almacenamiento de energía. Jarquin Flores | Pistas Educativas. <https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/view/3799/2694>

González-Madroño, E. G. (2007). Tecnologías de acumulación de energía para el uso en la compañía eléctrica: Baterías de sodio-azufre. Universidad Carlos III.

IFÉ Brage. (s.f.). [Documento en repositorio institucional]. <https://ife.brage.unit.no/ife-xmlui/handle/11250/3107870>

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2019). *Código Técnico de la Edificación: Documento Básico SE-AE. Acciones en la edificación – Acciones externas al edificio*. Madrid, España: Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. <https://www.codigotecnico.org/>

Quintero, V. (2021). Baterías de ion litio: características y aplicaciones. *I+D Tecnológico*, 17(1), 14–22. <https://doi.org/10.33412/idt.v17.1.2907>

Ramos-Fuertes, A., Palau, A., & Dolz, J. (2017). Influencia de la implementación de una central hidroeléctrica reversible en la hidrodinámica y el comportamiento térmico del embalse de Matalavilla (Alto Sil, León, España).

Red Eléctrica de España. (s.f.). Red Eléctrica: Negocio Eléctrico en España. <https://www.ree.es/es>

Redacción de El Periódico de la Energía. (s.f.). El Periódico de la Energía. <https://www.elperiodicodelaenergia.com>

Ricardo, S. R., Clara, B. R., & De los Materiales e Ingeniería Metalúrgica Departamento de, C. (2023, 7 febrero). Mejora de la actividad electrocatalítica de electrodos de carbono para baterías de flujo redox. Universidad de Oviedo. <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/70373>

Riquelme Martínez, T. (2023). Efectos de variabilidad solar en una planta de concentración solar para generación eléctrica. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/194607>

Rosa-Clot, M., & Tina, G. M. (2020). Floating PV plants – Chapter 1: Introduction (pp. 1–7). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817061-8.00001-3>

SolarFam. (s.f.). Tecnologías y tipologías de paneles fotovoltaicos. <https://solarfam.com/tecnologias-y-tipologias-de-paneles-fotovoltaicos/>

Tarrillo, J. M. (2012). *Sistemas de almacenamiento de energía*. Facultad de Ciencias (FC), Centro de Tecnologías de la Información y Comunicaciones (CTIC), Universidad Nacional de Ingeniería.

Torrico Carmona, A. N., Sempértegui-Tapia, D. F., & Orellana Lafuente, R. (2022). Análisis y propuesta para la implementación y/o complementación de centrales hidroeléctricas reversibles en Bolivia. Centro de Investigaciones Ópticas y Energías (CIOE), Universidad Privada Boliviana.

Wikipedia. (s.f.). Bui Dam. https://en.wikipedia.org/wiki/Bui_Dam

World Bank Group, Energy Sector Management Assistance Program, & Solar Energy Research Institute of Singapore. (2019). Where sun meets water: Floating solar market report. World Bank.
<https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/>