

Sistemas Híbridos Nuclear-Renovables: Análisis tecnológico, aplicaciones y retos para su despliegue

Teresa Aldazábal Pando

12 de diciembre de 2025

Índice

1. Introducción	3
2. Marco teórico	4
2.1. Energía nuclear	4
2.1.1. Proceso de obtención de energía eléctrica	5
2.1.2. Tamaño de reactores	6
2.1.3. Einstein y la base teórica de la energía nuclear	6
2.2. Energías renovables variables	7
3. NR-HES: ¿Qué es?	7
3.1. Tipos de sistemas híbridos	8
3.1.1. Loosely coupled (acoplamiento laxo)	8
3.1.2. Tightly coupled con múltiples productos	8
3.1.3. Tightly coupled con múltiples inputs	9
3.1.4. Tightly coupled con múltiples outputs	10
4. Líneas de investigación y tendencias en NR-HES	10
4.1. Small Modular Reactor y Micro reactores: Modularidad para la hibridación	10
4.2. Electrólisis de alta temperatura (SOEC/HTSE): Eficiencia y sinergia térmica	11
4.3. Electroquímica, materiales y durabilidad	11
4.4. Ciclos y turbinas avanzadas: CO ₂ supercrítico y mejoras de conversión térmica	11
4.5. Plataformas flotantes y co-ubicación en mar abierto (SMR + Energía eólica offshore)	11
5. Conclusiones	12
6. Referencias internas y externas	12

Índice de cuadros

1. Generación de energía en cada tipo de reactor.	6
---	---

Índice de figuras

1. Fisión y fusión de átomos.	4
2. Elementos básicos de una planta nuclear.	5
3. Elementos básicos de una planta nuclear.	5
4. Sistema híbrido nuclear–renovable acoplado laxo.	8
5. Sistema híbrido nuclear–renovable, de acoplamiento estrecho, orientado a la producción múltiple.	9
6. Sistema híbrido nuclear–renovable, con múltiples entradas y acoplamiento estrecho.	9
7. Sistema híbrido nuclear–renovable con acoplamiento estrecho.	10

1. Introducción

En esta sección se introduce el concepto de sistemas híbridos nuclear-renovables. La transición energética global está impulsando la búsqueda de soluciones tecnológicas capaces de garantizar un suministro eléctrico seguro, descarbonizado y económicamente competitivo. El crecimiento acelerado de las energías renovables variables —en particular la energía eólica y la energía solar fotovoltaica— plantea desafíos de flexibilidad, estabilidad de red y almacenamiento, especialmente en sistemas eléctricos con altos niveles de penetración renovable. A pesar de su sostenibilidad, estas tecnologías presentan variabilidad intrínseca y limitaciones en su capacidad para proporcionar servicios de red y generación firme. Paralelamente, la energía nuclear sigue siendo una de las fuentes de electricidad de bajas emisiones más fiables y estables. Sin embargo, su operación tradicional se ha basado en la producción continua en base, lo que limita su flexibilidad en mercados con renovables abundantes y precios variables. Diferentes fuentes subrayan que los reactores nucleares modernos y los futuros reactores avanzados pueden desempeñar un papel fundamental en un sistema energético más dinámico, especialmente si se integran con renovables en configuraciones híbridas.

Más detalles pueden encontrarse en la Sección 2.

2. Marco teórico

A continuación se presenta contenido técnico, acompañado de ecuaciones, tablas y figuras.

2.1. Energía nuclear

La energía nuclear es la energía liberada por los procesos que afectan al núcleo de los átomos, principalmente fisión nuclear y, en menor medida, fusión nuclear. En el contexto actual, prácticamente toda la electricidad nuclear del mundo se obtiene mediante reactores de fisión, donde núcleos pesados como el uranio-235 (U-235) o el plutonio-239 (Pu-239) se dividen en fragmentos más pequeños, liberando grandes cantidades de energía en forma de calor. Tal y como se puede distinguir en la imagen 1, la fisión nuclear es la división de un núcleo pesado en núcleos más ligeros, liberando energía, mientras que la fusión nuclear es la unión de dos núcleos ligeros para formar uno más pesado (proceso que ocurre en el Sol).

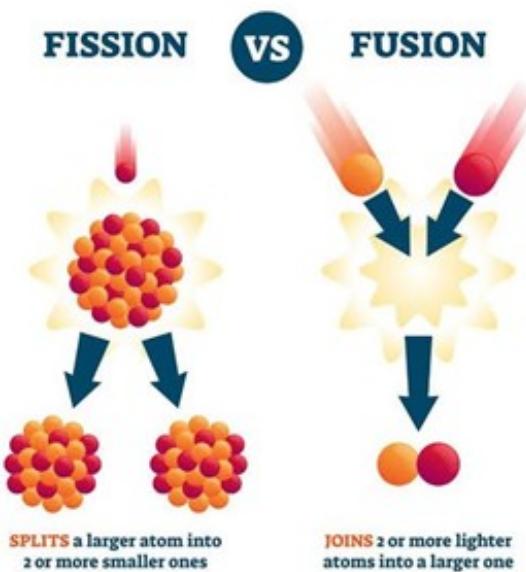


Figura 1: Fisión y fusión de átomos.

La característica fundamental de la energía nuclear es su elevada densidad energética: la fisión de 1 gramo de U-235 libera aproximadamente $2,4 \times 10^7$ kWh, millones de veces más que la combustión de combustibles fósiles. Esta propiedad permite que las centrales nucleares generen grandes cantidades de electricidad de manera continua, con factores de capacidad superiores al 85–90 %, y con emisiones muy bajas de CO₂ en todo el ciclo de vida. Los reactores nucleares modernos se diseñan para operar de manera segura y estable. Además, las tecnologías emergentes, como los reactores modulares pequeños (SMR) y los reactores avanzados de IV generación, amplían el rango de aplicaciones más allá de la generación eléctrica tradicional, permitiendo proveer calor industrial, producción de hidrógeno, desalación y servicios de flexibilidad en sistemas energéticos con renovables variables. En la figura 2 se puede apreciar los elementos fundamentales presentes en una central nuclear, el edificio de contención, en el cual se va a llevar a cabo la reacción nuclear, la turbina, que es la que generará la energía eléctrica a partir de energía mecánica con

ayuda de un generador y por último, la emblemática torre de refrigeración, la cual se va a encargar de expulsar el calor sobrante y mantener el agua de refrigeración a una temperatura adecuada para su labor dentro del condensador, que se basa en convertir el vapor saliente de la turbina en fase líquida.



Figura 2: Elementos básicos de una planta nuclear.

2.1.1. Proceso de obtención de energía eléctrica

A continuación, se va a realizar una explicación sobre la obtención de energía nuclear en centrales con reactores de agua a presión, los cuales son los más abundantes a nivel mundial, en la Ilustración 3 se puede apreciar la distribución de dicha planta.

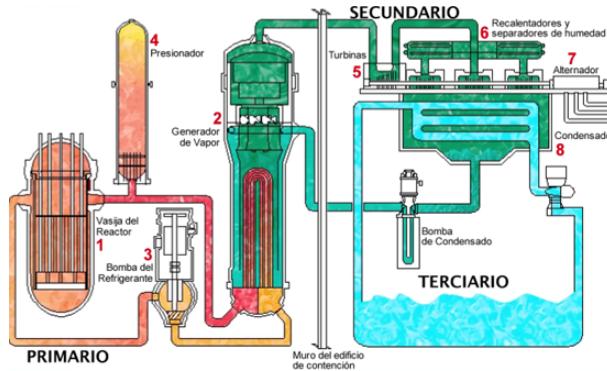


Figura 3: Elementos básicos de una planta nuclear.

El uranio se encuentra en elementos combustibles dentro de la vasija del reactor, este elemento es como una enorme olla a presión, donde el agua circula con el fin de actuar de moderador y refrigerante, que extraerá el calor generado por las fisiones, esto es lo que se llama el circuito primario. Lo habitual es que una central nuclear tenga hasta cuatro circuitos que extraen el calor que se produce dentro del núcleo, cada circuito tiene un generador de vapor, este dispositivo es un intercambiador de calor que tiene tubos y por el interior de dichos tubos pasa el agua que proviene del reactor, es decir, del circuito primario, y deja parte de su energía al enfriarse antes de volver nuevamente al reactor impulsado por una bomba de refrigerante, el circuito primario se mantiene a una presión de 157 atm, y el encargado de mantener la presión constante, se llama presionador, la parte inferior del presionador es líquida y tiene una resistencias eléctricas que permiten

aumentar la presión, la parte superior es vapor y tiene unas duchas para disminuir su presión. Volviendo al generador de vapor, el agua del circuito primario, al pasar por el generador de vapor, se enfriá porque en el exterior de los tubos también hay agua, pero a menor temperatura, que proviene del circuito secundario. Al entrar el agua proveniente del circuito secundario en el generador de vapor, entra en contacto con los tubos que se encuentran a alta temperatura. Este vapor se traslada hacia unas turbinas que se mueven a una velocidad de 1500 rpm, las turbinas están conectadas a un generador eléctrico (alternador), que al girar generan una gran cantidad de energía eléctrica, esta energía se traslada a unos transformadores que sirven para aumentar la tensión hasta llegar a la adecuada para ser transportada hasta los puntos de consumo a través de las líneas de alta tensión. Por otro lado, el vapor que mueve la turbina pierde energía, pasa por un condensador y vuelve a estado líquido, el agua fría empleada para llevarse a cabo la condensación del vapor proviene del circuito terciario. El circuito terciario puede contener habitualmente agua de ríos, lagos o directamente, agua de mar, una vez se tiene agua de nuevo en el circuito secundario, se precalienta y se bombea hacia el generador de vapor para completar otro ciclo del circuito secundario.

2.1.2. Tamaño de reactores

Tipo de reactor	Potencia	Unidad
Reactor convencional	1000	MW
Small Modular Reactor (SMR)	10-300	MW
Micro-reactor	0-10	MW

Cuadro 1: Generación de energía en cada tipo de reactor.

Véase en la Tabla 1 la capacidad de generación de energía que tiene cada tipo de reactor nuclear.

2.1.3. Einstein y la base teórica de la energía nuclear

Ejemplo de ecuación numerada:

$$E = mc^2 \quad (1)$$

La ecuación 1, propuesta por Einstein en el año 1905, establece que la masa (m) y la energía (E) son equivalentes; es decir, la masa puede considerarse una forma altamente concentrada de energía. El factor c^2 —la velocidad de la luz al cuadrado— es extremadamente grande, por lo que incluso una cantidad muy pequeña de masa puede convertirse en una enorme cantidad de energía. En los procesos nucleares (fisión, fusión, desintegración radiactiva), el punto clave es que la masa total de los productos es ligeramente menor que la masa total de los reactivos. Esta diferencia se denomina defecto de masa:

$$\Delta m = m_i m_f \quad (2)$$

Según la ecuación de Einstein, ese defecto de masa se convierte en energía:

$$E = \Delta mc^2 \quad (3)$$

2.2. Energías renovables variables

Las energías renovables variables son aquellas fuentes de generación eléctrica cuya disponibilidad depende de condiciones ambientales fluctuantes, lo que implica que su producción no puede controlarse de forma totalmente programada. Entre ellas destacan la energía eólica —tanto onshore como offshore— y la energía solar fotovoltaica, que en la actualidad constituyen el núcleo del crecimiento renovable a nivel mundial debido a su bajo coste marginal, su rápida escalabilidad y su reducido impacto ambiental durante la fase de operación. La energía eólica presenta variabilidad asociada a la intensidad del viento, que depende de factores meteorológicos, estacionales y geográficos. En particular, la eólica offshore se caracteriza por un mayor factor de capacidad, vientos más estables y menor turbulencia, lo que se traduce en una producción más constante y elevada respecto a la eólica terrestre. No obstante, sigue sujeta a variaciones significativas que requieren respaldo o almacenamiento para asegurar la continuidad del suministro eléctrico. La energía solar fotovoltaica, por su parte, depende directamente de la irradiación solar disponible, la cual varía en función del ciclo día-noche, la estacionalidad, la nubosidad y la latitud. Su perfil de generación tiene una forma característica en “curva de campana”, con producción elevada durante las horas centrales del día y nula durante la noche. Este comportamiento puede generar desequilibrios entre la oferta y la demanda eléctrica en sistemas con alta penetración fotovoltaica, especialmente si no existen mecanismos de gestión adecuados. La integración masiva de energías renovables variables supone varios desafíos técnicos para los sistemas eléctricos. Entre ellos destacan:

- Necesidad de flexibilidad: para compensar los cambios rápidos de generación renovable y mantener la estabilidad de frecuencia y tensión.
- Requerimiento de almacenamiento energético: mediante baterías, hidrógeno, bombeo hidroeléctrico u otras tecnologías que permitan desplazar energía en el tiempo.
- Gestión de congestiones en la red: debido a la concentración geográfica de los recursos renovables y su producción no gestionable.
- Reducción del valor marginal de la electricidad renovable: cuando la producción supera la demanda en ciertos momentos, provocando precios muy bajos o incluso vertidos energéticos.

A pesar de estas limitaciones, las energías renovables variables son fundamentales para avanzar hacia sistemas energéticos sostenibles y descarbonizados. Su complementariedad con tecnologías capaces de aportar estabilidad, almacenamiento o generación firme —como la energía nuclear, el almacenamiento a gran escala o la gestión de la demanda— resulta clave para lograr un sistema energético equilibrado y resiliente.

3. NR-HES: ¿Qué es?

La IAEA (International Atomic Energy Agency) considera los NR-HES (Nuclear-Renewable Hybrid Energy Systems) como sistemas en los que múltiples fuentes energéticas se integran con instalaciones industriales y redes eléctricas para producir simultáneamente electricidad y otros productos energéticos. Estos sistemas optimizan el uso de energía renovable intermitente al permitir que la energía nuclear opere de forma flexible o suministre calor directo cuando la electricidad no tiene alta demanda.

3.1. Tipos de sistemas híbridos

La Agencia Internacional de Energía Atómica determina que existen cuatro escenarios de acoplamiento nuclear-renovables.

3.1.1. Loosely coupled (acoplamiento laxo)

En este modelo, plasmado en la ilustración 4, las instalaciones nucleares y renovables operan de forma mayoritariamente independiente. No existe una interacción directa entre flujos térmicos o eléctricos de cada tecnología, sino que la red eléctrica actúa como elemento de acoplamiento.

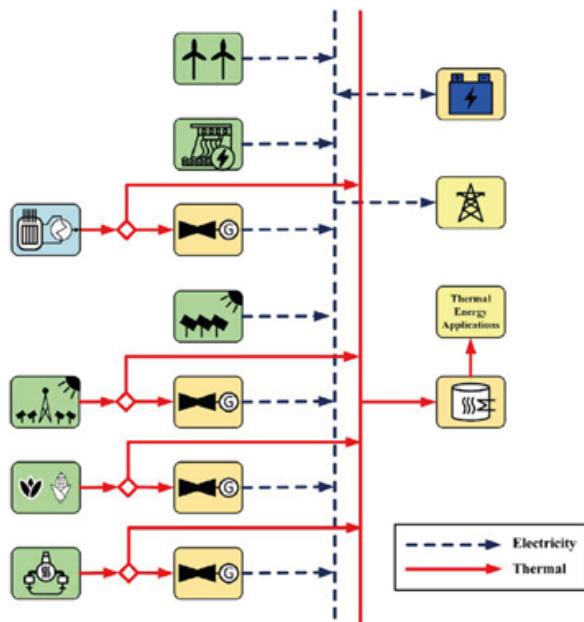


Figura 4: Sistema híbrido nuclear–renovable acoplado laxo.

3.1.2. Tightly coupled con múltiples productos

En esta distribución (Ilustración 5), la energía nuclear y renovable están integradas para producir simultáneamente varios tipos de productos: electricidad, calor, hidrógeno, desalación, combustibles sintéticos, etc. El sistema está diseñado para compartir flujos térmicos y eléctricos entre fuentes y procesos industriales.

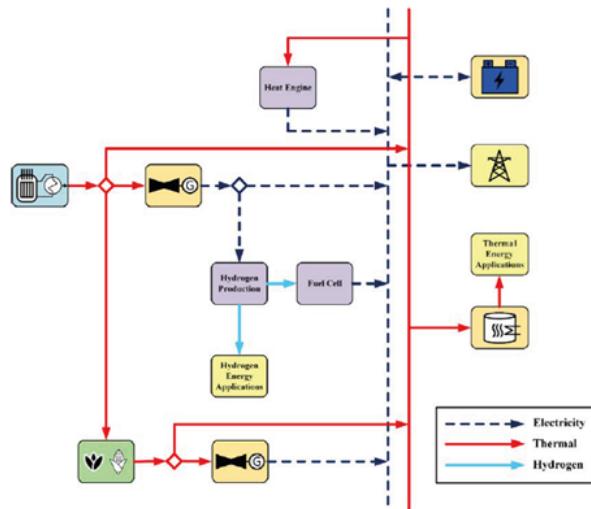


Figura 5: Sistema híbrido nuclear–renovable, de acoplamiento estrecho, orientado a la producción múltiple.

3.1.3. Tightly coupled con múltiples inputs

En este tipo de sistema (Ilustración 6), diversas fuentes energéticas (energía térmica nuclear, electricidad renovable, calor de otros procesos) se combinan para alimentar un proceso común cuya salida principal es electricidad.

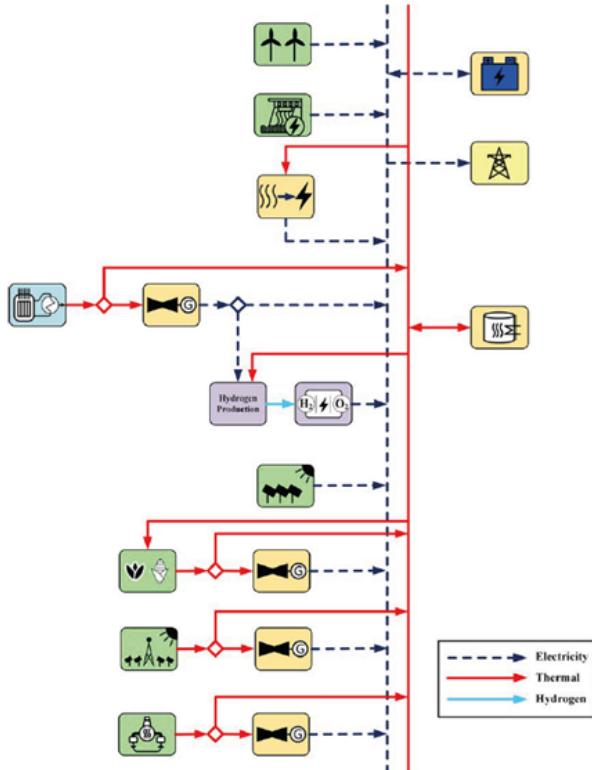


Figura 6: Sistema híbrido nuclear–renovable, con múltiples entradas y acoplamiento estrecho.

3.1.4. Tightly coupled con múltiples outputs

En esta configuración, mostrada en la ilustración 7, el sistema está diseñado para diversificar las salidas energéticas y ofrecer varios productos simultáneamente: electricidad, calor, hidrógeno, desalación, calor de proceso, etc. La diferencia con el segundo tipo (múltiples productos) es que aquí la orientación es más multivectorial y dinámica, con una fuerte integración en el control del sistema.

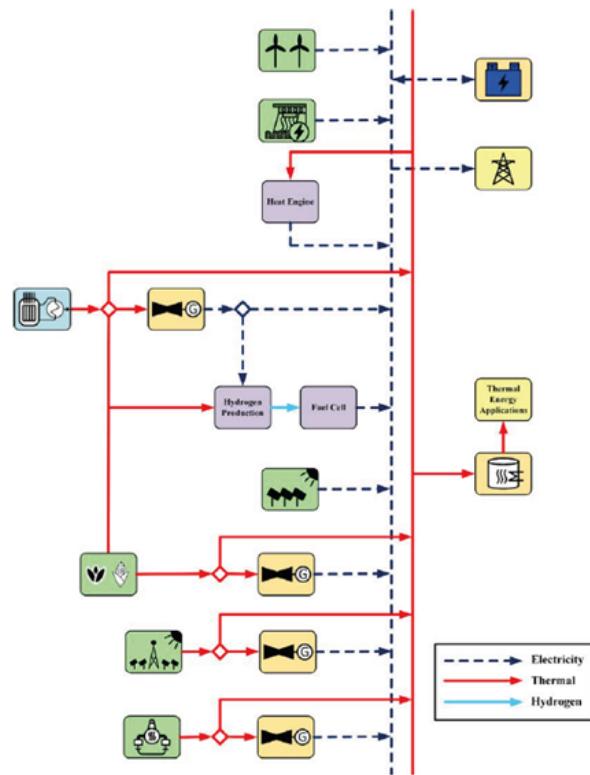


Figura 7: Sistema híbrido nuclear–renovable con acoplamiento estrecho.

4. Líneas de investigación y tendencias en NR-HES

Existen múltiples avances tecnológicos sobre esta nueva forma híbrida de obtener energía, los más innovadores y recientes son que se encuentran a continuación.

4.1. Small Modular Reactor y Micro reactores: Modularidad para la hibridación

Los SMR y los micro-reactores están en el centro del interés tecnológico para NR-HES por su modularidad, menores requisitos de emplazamiento y potencial de manufactura en fábrica, lo que reduce plazos y riesgos de construcción frente a las plantas grandes tradicionales. Estos diseños facilitan la co-ubicación con cargas industriales (electrólisis, desalación) y con fuentes renovables locales porque pueden escalar la capacidad en función de la demanda. También hay un empuje político-industrial fuerte para desarrollar cadenas de suministro nacionales y proyectos piloto.

Implicación para NR-HES: los SMR permiten diseños tightly coupled en zonas con de-

manda térmica o con parques eólicos/solar cercanos, reduciendo la necesidad de largas interconexiones eléctricas y mejorando la economía de procesos multiproducto.

4.2. Electrólisis de alta temperatura (SOEC/HTSE): Eficiencia y sinergia térmica

La electrólisis de óxido sólido (SOEC) y otras tecnologías de electrólisis de alta temperatura representan una de las rutas tecnológicas más prometedoras para producir hidrógeno aprovechando calor nuclear de alta calidad. Al suministrar parte de la energía en forma de calor (en lugar de toda en electricidad), las eficiencias sistemáticas pueden mejorar notablemente frente a PEM o electrólisis alcalina convencionales; sin embargo, la durabilidad y degradación de materiales a alta temperatura siguen siendo retos claves de investigación.

4.3. Electroquímica, materiales y durabilidad

Además de SOEC, la investigación se centra en electrodos, interconectores, Protección contra degradación por oxidación/reducción y sellado hermético a altas temperaturas. Mejorar la vida útil de stacks y reducir la degradación durante ciclos térmicos es crítico para la viabilidad económica. Los avances materiales y de manufactura son tan importantes como la integración de sistemas.

4.4. Ciclos y turbinas avanzadas: CO₂ supercrítico y mejoras de conversión térmica

El uso de ciclos de potencia basados en CO₂ supercrítico (sCO₂) es una tendencia tecnológica con dos beneficios clave: mayor eficiencia térmica frente a Rankine tradicional y compacidad del equipo (heat exchangers, turbinas). sCO₂ facilita además la operación flexible y acoplamiento térmico para aplicaciones multiproducto (electricidad + procesos). El campo ha avanzado en diseño de intercambiadores de calor compactos y estrategias de operación en condiciones fuera de diseño.

Implicación para NR-HES: sCO₂ es especialmente atractivo para reactores de alta temperatura y SMR porque mejora las eficiencias globales y reduce la huella del balance de planta, lo que es útil cuando parte de la salida térmica se redirige hacia procesos.

4.5. Plataformas flotantes y co-ubicación en mar abierto (SMR + Energía eólica offshore)

Investigadores y la industria están evaluando soluciones flotantes que combinen SMR (o suministro desde costa) con parques eólicos offshore y electrolizadores marinos para producir hidrógeno o agua desalada. Estas configuraciones pueden minimizar costes de interconexión y usar emplazamientos con excelente recurso eólico; además existen estudios de diseño térmico y de estabilidad para plataformas integradas. Los desarrollos normativos y de certificación para instalaciones marinas nucleares son un área en crecimiento.

Implicación para NR-HES: plataformas híbridas offshore abren nuevos mercados (H₂ “blue/low-carbon” para vías marítimas, abastecimiento insular) pero introducen retos de seguridad marítima, logística y regulación.

5. Conclusiones

Los NR-HES representan una solución innovadora y estratégica para integrar energía nuclear con una variedad de energías renovables y satisfacer simultáneamente necesidades eléctricas e industriales. Su capacidad para diversificar productos energéticos, aprovechar excedentes renovables y mejorar la estabilidad del sistema eléctrico los convierte en un elemento clave para los escenarios de descarbonización profunda. Si bien los desafíos tecnológicos, regulatorios y económicos siguen siendo significativos, las oportunidades de investigación son numerosas y abarcan áreas como: control avanzado, integración térmica, modelado de sistemas, economía del hidrógeno y nuevos modelos de gestión energética. Los NR-HES constituyen un campo en expansión, con alto potencial científico e industrial, y que pueden desempeñar un papel esencial en la transición energética hacia sistemas sostenibles y resilientes.

6. Referencias internas y externas

Se puede acceder a la introducción mediante este enlace.
Además, puede revisarse información externa en: <https://www.iaea.org>.

Referencias

- [1] Foro Nuclear. (s.f.). Descubre la energía nuclear: ¿Qué es la energía nuclear? Foro Nuclear. Disponible en: <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/que-es-la-energia-nuclear/>
- [2] International Atomic Energy Agency. (2022). Nuclear-renewable hybrid energy systems (IAEA Nuclear Energy Series No. NR-T-1.24). International Atomic Energy Agency.
- [3] Stacey, W. M. (2007). Nuclear reactor physics (2nd ed.). Wiley-VCH.
- [4] International Energy Agency. (2020). Renewables 2020: Analysis and forecast to 2025. IEA.
- [5] International Renewable Energy Agency. (2019). Renewable energy and electricity storage. IRENA.
- [6] Liou, J. (2023). What are Small Modular Reactors (SMRs)? International Atomic Energy Agency.
- [7] Flis, G. (2023). Solid Oxide Electrolysis: A Technology Status Assessment. CATF.
- [8] Chen, W. (2025). Recent advances in high temperature solid oxide electrolytic cells. Energy Materials.
- [9] Ahmed, R. H. (2025). Supercritical CO₂ power cycle control strategies: A review. Applied Thermal Engineering.
- [10] Einstein, A. "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", 1905.
- [11] IAEA. "Nuclear Hybrid Energy Systems", 2022.