

ESTRATEGIAS GLOBALES PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO A TRAVÉS DE ENERGÍA NUCLEAR: ANÁLISIS COMPARATIVO Y PERSPECTIVAS PARA EL SECTOR NUCLEAR ARGENTINO

Alejandra Lucía Pérez Lucero¹, Carlos Ramiro Rodríguez²

¹Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba - Reactor Nuclear RAO - Av. Vélez Sarsfield 299, Córdoba (5000), Provincia de Córdoba - www.fcefyn.unc.edu.ar, Tel. +54351-4288797 – Fax 0261-4287370, alejandraperezlucero@unc.edu.ar

²Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba – Departamento de Matemática - Av. Vélez Sarsfield 299, Córdoba (5000), Provincia de Córdoba - www.fcefyn.unc.edu.ar Tel. +54351 5353800, ramiro.rodriguez@unc.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se presenta un estudio que busca examinar las diversas iniciativas y programas de diferentes países y regiones en la producción del hidrógeno a través de la energía nuclear, presentando las principales estrategias y desarrollos de los países como Canadá, China, Francia, Alemania, India, Japón, República de Corea y Estados Unidos. Se analizan las posibilidades en Argentina, la colaboración internacional y el intercambio de conocimientos como claves para avanzar en la producción de hidrógeno mediante tecnologías nucleares. La investigación resalta la importancia de las políticas energéticas, la inversión en I+D y la integración de tecnologías avanzadas para el desarrollo sostenible y la descarbonización global.

Palabras clave: hidrógeno nuclear. métodos de producción. generación IV.

INTRODUCCIÓN

La selección de países para este estudio se basa en varios factores clave. En primer lugar, se eligieron naciones que cuentan con un desarrollo significativo en el uso de energía nuclear, así como en la implementación de políticas energéticas que promuevan la sostenibilidad y la descarbonización. Canadá, China, Francia, Alemania, India, Japón, la República de Corea y Estados Unidos han sido líderes en la producción de energía nuclear, representando más del 70% de la generación nuclear mundial (IAEA, 2013). Además, estos países están invirtiendo fuertemente en I+D para el desarrollo de tecnologías de hidrógeno nuclear, lo que los convierte en actores estratégicos en la transición hacia una economía de bajas emisiones de carbono.

El objetivo de la producción de hidrógeno utilizando energía nuclear es proporcionar una fuente de energía alternativa y sostenible para su uso en aplicaciones energéticas. El hidrógeno produce emisiones bajas o nulas de gases de efecto invernadero, lo que lo convierte en un posible candidato para la producción de energía limpia, teniendo en cuenta que su producción actual se basa mayoritariamente en combustibles fósiles que producen emisiones nocivas de gases contaminantes como así también el riesgo de agotamiento o limitación en la disponibilidad de recursos de combustibles fósiles a largo plazo.

El método más empleado es la producción mediante el reformado de gas metano con vapor de agua - Steam Methane Reforming (SMR), que libera 11 kg CO₂/kg de H₂ producido, (Ramón et al., 2020).

China es el país que más CO₂ emitió entre 1990 y 2008, con un incremento relativo del 178%, seguido por la República de Corea, con un 158%, la India, con 125%, Canadá, un 44%, Japón, un 18% y Estados Unidos, un 17%, en tanto que la Federación Rusa disminuyó un 29%, Alemania, un 17% e Inglaterra, un 7%, Tabla 1 (IAEA, 2013).

Es posible producir el H₂ a partir de energía nuclear por diferentes mecanismos (electrolíticos y térmicos), lo que evitaría los inconvenientes del uso de fuentes fósiles que se oponen a los objetivos y metas planteados en el acuerdo de París, (Seo, 2017; IAEA, 2013). La electricidad nuclear es una fuente

de energía constante y de alta capacidad (el término "**capacidad**" se refiere a la cantidad máxima de electricidad que una planta nuclear puede generar bajo condiciones óptimas), lo que puede permitir una producción de H₂ más continua y estable. Estados Unidos, Francia, Japón, Alemania, la Federación Rusa y la República de Corea, producen alrededor del 70% de la electricidad nuclear del mundo (IAEA, 2013).

Tabla 1: Los 10 mayores países emisores de CO₂ en 2008

Country	CO ₂ in 1990 (million t)	CO ₂ in 2008 (million t)	Relative change 1990–2008 (%)	Kyoto goal by 2012 (%)
China	2452	6809.7	+178	—
USA	5461	6369.8	+17	–7 ^a
Russian Federation	2369	1687.6	–29	0
India	626	1408.5	+125	—
Japan	1179	1391.5	+18	–6
Germany	1029	857.3	–17	–21
Republic of Korea	257	663.5	+158	—
Canada	485	658.3	+44	–6
United Kingdom	625	581.8	–7	–12.5

^a The USA participated in the Kyoto Summit in 1999 but did not ratify the Kyoto protocol.

Recordando que, si en el proceso de electrólisis, la electricidad proviene de la energía nuclear, el hidrógeno generado se clasifica como hidrógeno rosa (H₂R) y la principal ventaja de este método es que la electricidad nuclear es una fuente de energía constante, con las ventajas citadas acerca de su alta capacidad, lo cual puede permitir una producción de hidrógeno más continua y estable.

La eficiencia neta del proceso de producción de hidrógeno rosa es el resultado de multiplicar la eficiencia del reactor en la producción de electricidad por la eficiencia de la celda de electrólisis. Considerando que los reactores de agua liviana (LWR) tienen una eficiencia eléctrica del 32% y las celdas de alta presión requeridas tienen una eficiencia entre el 75% y el 80%, la eficiencia neta se sitúa alrededor del 24% al 26%. Si se utiliza un reactor avanzado de alta temperatura (AHTR) con una eficiencia eléctrica del 48%, la eficiencia neta podría ser aproximadamente del 36% al 38% (Schultz K et al., 2003). El AHTR permite suministrar calor a una temperatura casi constante, proporcionar una interfaz de baja presión con los procesos de producción de hidrógeno, aislar la planta nuclear de la planta química y evitar la contaminación por tritio del hidrógeno producido (Forsberg Charles, 2003).

Otro método para obtener hidrógeno es la termólisis nuclear o de alta temperatura, que utiliza el calor generado por una reacción nuclear para descomponer directamente el agua. En este método, el agua se calienta a temperaturas muy altas mediante el calor resultante de una reacción nuclear, y el calor resultante que provoca la separación del hidrógeno y el oxígeno en el proceso conocido como termólisis nuclear. Este método requiere altas temperaturas y condiciones específicas para lograr la separación eficiente del agua en sus componentes (IAEA, 2013).

Es crucial destacar que ambos métodos de producción de hidrógeno con energía nuclear presentan desafíos y consideraciones, especialmente en términos de seguridad, manejo de residuos nucleares y costos asociados. La producción de hidrógeno con energía nuclear se encuentra en etapas de investigación y desarrollo, y la viabilidad y aceptación de estos métodos dependerán de una serie de factores, incluyendo los avances tecnológicos, la disponibilidad de recursos nucleares, las políticas energéticas y las consideraciones ambientales y de seguridad que permitan la socialización de estos avances.

En la Figura 1 se muestra la evolución de los Reactores Nucleares a lo largo del tiempo (<https://www.prontubeam.com/Ingenieria-en-las-redes/Evolucion-reactores-nucleares>)

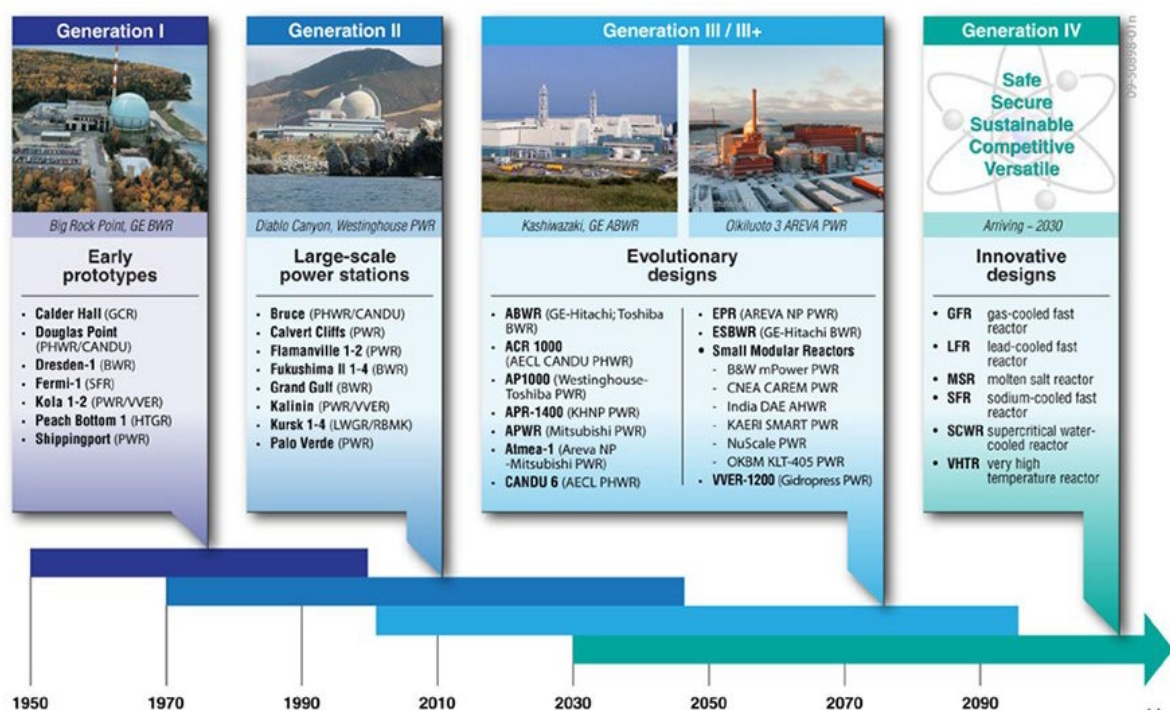


Figura 1: Evolución de los Reactores Nucleares. Fuente: Prontubeam

METODOLOGÍA

La metodología se basa en la búsqueda bibliográfica y se presenta un resumen de los puntos más destacados de la producción de hidrógeno utilizando energía nuclear por país (IAEA, 2013) y los objetivos de implementación hacia el año 2030 (IEA, 2021), teniendo en cuenta que el futuro del hidrógeno generado por la energía nuclear estará impulsado por los siguientes factores:

- Las tasas de producción de petróleo y gas natural.
- Decisiones sociales y gubernamentales relacionadas con el cambio climático global debido a las emisiones de gases de efecto invernadero.

DESARROLLO

La energía nuclear es la que menos emite CO₂ por kWh de generación, teniendo en cuenta el estudio de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (UNECE). Estas emisiones varían entre 5,1 y 6,4 g CO₂/kWh; 6,1 a 147, para la energía hidráulica; 7,8 a 23 para la energía eólica; 7,4 a 83 para la energía solar fotovoltaica; 14 a 122 para la energía solar de concentración; 92 a 513 para gas y 149 a 1095 g CO₂/kWh para carbón (UNECE, 2022).

Puntos destacados de la producción de hidrógeno utilizando energía nuclear por país

Canadá: es uno de los principales productores de energía del mundo, con una significativa infraestructura nuclear. La energía nuclear contribuye aproximadamente al 15% de la electricidad nacional a partir de 18 reactores en operación, con una capacidad combinada de 12.7 GW. Canadá produce anualmente alrededor de 3 millones de toneladas de hidrógeno, utilizado principalmente en las industrias químicas (35%), refinación de petróleo (24%), mejoramiento de petróleo pesado (23%) y subproductos químicos (18%). La investigación en Canadá se enfoca en la producción de hidrógeno utilizando reactores de alta temperatura y ciclos termoquímicos avanzados, además de explorar la electrólisis de alta temperatura.

Este país tomó la decisión de desarrollar en 1942 un diseño para un reactor nuclear basado en agua pesada, con el desarrollo del Reactor de Demostración de Energía Nuclear, una planta de 20 MW(e) que comenzó a operar en 1962 utilizando uranio natural como combustible y el agua pesada como moderador y refrigerante, bases para el desarrollo evolutivo de más de 60 años de los reactores de energía CANDU construidos y operados con éxito en Canadá y otros lugares, entre ellos, Argentina.

Como miembro fundador del Foro Internacional de la Generación IV, ha seleccionado y está desarrollando el reactor de agua supercrítica de Generación IV (SCWR) basado en CANDU con un enfoque a corto plazo del uso del Reactor Avanzado CANDU (ACR) para la producción de hidrógeno. De diseño modular, el ACR-700, con una potencia térmica de 1900 MW (th) genera vapor para la producción de crudo sintético y 200 MW(e) de electricidad para la electrólisis de hidrógeno. El flujo constante de vapor utilizando un sistema de cristizador de descarga cero de líquidos es un proceso que consume demasiada agua y podría reducir las emisiones de CO₂ en un 77%.

En cooperación con el Laboratorio Nacional de Argonne (ANL) y la Universidad de Ontario, AECL está investigando los ciclos termomecánicos de cobre-cloro, compatibles con el CANDU Mark 2 SCWR para ser utilizado en la producción de hidrógeno, aprovechando la alta temperatura del refrigerante (625°C) del SCWR adecuada para el ciclo Cu-Cl. De esta manera, se utilizaría la potencia térmica del reactor no solo para la generación de electricidad, sino también para la producción de vapor y otros procesos industriales. Dentro de su área de investigación, Canadá explora el uso de calentamiento resistivo directo de catalizadores para procesos de alta temperatura, complementando las capacidades del SCWR.

Los métodos de producción de hidrógeno con energía nuclear son:

- **Electrólisis Convencional a Baja Temperatura:** Utiliza electricidad fuera de pico de plantas nucleares existentes. Requiere un alto porcentaje de generación nuclear para ser viable.
- **Reformado de Vapor Nuclear:** Desarrollado y demostrado en plantas piloto en Alemania y Japón. Ahorra hasta un 35% del metano utilizado. Es un método competitivo, pero no sostenible a largo plazo debido a las emisiones de CO₂.
- **Gasificación de Carbón Nuclear:** Convierte carbón en gas natural sintético o hidrógeno. Depende del costo del carbón y su comparación con el gas natural y el petróleo

Canadá realiza importantes inversiones y avances en el sector del hidrógeno, guiados por su Estrategia del Hidrógeno lanzada en 2020. Actualmente, hay más de 80 proyectos de producción de hidrógeno bajo desarrollo, representando una oportunidad económica de más de 100 mil millones de dólares canadienses. Además, existen 13 instalaciones operativas de producción de hidrógeno bajo en carbono, capaces de producir más de 3,000 toneladas al año. El Canadian Nuclear Laboratories (CNL) también ha estado trabajando en la producción de hidrógeno utilizando energía nuclear como parte de sus iniciativas de energía limpia (Quinn, 2021).

China: ha emergido como un líder en la expansión de la capacidad de generación de energía, con un crecimiento notable en su sector nuclear. Los esfuerzos de investigación y desarrollo en la producción de hidrógeno nuclear en China se centran en la utilización de Reactores de Alta Temperatura (HTGR) y el desarrollo de procesos termoquímicos avanzados. Cuenta con 13 unidades de energía nuclear comercial en operación, con una capacidad total de 10.2 GW(e), lo que representa alrededor del 1% de la capacidad total de energía eléctrica del país. Además, hay 25 unidades adicionales en construcción con una capacidad de 27.6 GW. El país busca integrar estas tecnologías en su infraestructura energética para contribuir a sus objetivos de sostenibilidad y reducción de emisiones de CO₂.

Los Reactores de Alta Temperatura (HTGR-High Temperature Reactor-Pebble-bed Module) sirven para complementar los reactores de agua a presión (PWR) en la generación de electricidad y sirven para proporcionar vapor de proceso para la recuperación de petróleo pesado y la industria petroquímica, así como la gasificación y licuefacción del carbón y la producción de hidrógeno.

Francia: es conocida por su alta dependencia de la energía nuclear, que constituye una parte significativa de su mix energético. El país está investigando la viabilidad de producir hidrógeno a gran escala utilizando sus reactores nucleares de alta temperatura. Los esfuerzos se centran en desarrollar y demostrar ciclos termoquímicos avanzados que puedan integrarse en la infraestructura nuclear existente para maximizar la producción de hidrógeno con bajas emisiones de carbono. Opera 58 plantas nucleares con una capacidad total de 63,2 GW, lo que la convierte en el segundo mayor productor de energía nuclear del mundo después de los Estados Unidos.

Este país mantiene un enfoque en la expansión rápida de la tecnología de Reactores de Agua a Presión (PWR) y continúa trabajando en los reactores de alta temperatura (HTGR) dentro de los programas de la Unión Europea. Las actividades claves de I+D en la producción de hidrógeno nuclear son el desarrollo del Reactor ANTARES basado en el GT-MHR de General Atomics, un reactor de 600 MW (th) con bloques prismáticos de combustible, alcanzando temperaturas de hasta 850 °C en el núcleo en la versión

de reactor de muy alta temperatura (VHTR) y la investigación de materiales adecuados para el intercambiador de calor de placa mecanizada (PMHX) y el de aletas de placa (PFHX).

En general, se verifica:

- Estrategia de Investigación y Desarrollo (I+D): Enfocada en el desarrollo de reactores rápidos enfriados por sodio y estudios de reactores rápidos enfriados por helio. Participa en proyectos internacionales como el sistema VHTR (Very High Temperature Reactor) para la producción de hidrógeno y suministro de calor de proceso a muy alta temperatura.
- Electrólisis y Reactores de Alta Temperatura: Francia ha trabajado en la tecnología HTGR (High Temperature Gas-cooled Reactor), aunque ha reducido su énfasis en favor de los reactores rápidos enfriados por sodio.

Alemania: ha sido pionera en el desarrollo de reactores de alta temperatura, con experiencias previas como el reactor AVR. La investigación actual se orienta hacia el desarrollo de reactores modulares avanzados y tecnologías de producción de hidrógeno, tales como la reformación de vapor nuclear y la gasificación de carbón. Estos proyectos buscan aprovechar las capacidades nucleares de alta temperatura para producir hidrógeno de manera eficiente y sostenible. En Alemania, 17 plantas nucleares operan en 2011, generando alrededor del 25% de la electricidad total del país. Sin embargo, el gobierno alemán anunció ese año un plan para desmantelar gradualmente todas las centrales nucleares del país hacia 2022 como parte de su estrategia para pasar a fuentes de energía renovable.

Entre los métodos de producción de hidrógeno con energía nuclear, se destacan:

- Electrólisis a Alta Temperatura: Aumenta la eficiencia térmica en comparación con la electrólisis convencional. Se ha investigado el uso de reactores de alta temperatura como los HTGR.
- Reformado de Vapor con Energía Nuclear: Similar a Canadá, se ha demostrado en plantas piloto. Es competitivo mientras el gas natural tenga un costo razonable, aunque emite CO₂.

En 2024, el gobierno alemán anunció una inversión de €4.6 mil millones para 23 proyectos de hidrógeno verde bajo el programa IPCEI Hydrogen. Estos proyectos abarcan toda la cadena de valor del hidrógeno, incluyendo la producción, transporte y almacenamiento. Entre los proyectos destacados, se incluyen un electrolizador de 300 MW en Lingen y otro de 100 MW en Rostock. Además, se está construyendo una infraestructura de 2000 km para el transporte de hidrógeno (Matalucci, 2024).

India: se encuentra en las etapas iniciales de planificación y desarrollo de tecnologías nucleares avanzadas para la producción de hidrógeno. El país está investigando la integración de la energía nuclear en su infraestructura energética como parte de una estrategia más amplia para satisfacer la creciente demanda de energía y reducir las emisiones de CO₂. Los esfuerzos se centran en la investigación de ciclos termoquímicos y la electrólisis de alta temperatura, adaptados a las condiciones y necesidades locales. India cuenta con 19 plantas nucleares en operación en 2011, generando aproximadamente el 2,5% de la electricidad total del país. Además, había seis reactores nucleares más en construcción en ese momento.

Este país prioriza la utilización de torio en su programa nuclear y ha emprendido diversas iniciativas de investigación y desarrollo para innovar en la producción de hidrógeno nuclear. Entre los nuevos conceptos de reactores nucleares del Centro de Investigación Atómica Bhabha (BARC) están: el reactor avanzado de agua pesada (AHWR) enfocado en utilizar torio como combustible, el reactor KAMINI en IGCAR, diseñado para aprovechar el torio en un ciclo de combustible cerrado, y el reactor nuclear de alta temperatura capaz de suministrar calor de proceso en el rango de 600-1000 °C, fundamental para la producción de hidrógeno. En BARC se avanza en la investigación del proceso termoquímico S-I (Azufre-Iodo) para la producción de hidrógeno a través de la división de agua a través de varias reacciones químicas a altas temperaturas.

Japón: está desarrollando sistemas avanzados, como el reactor de muy alta temperatura (VHTR), para la producción de hidrógeno. La investigación en Japón se centra en ciclos termoquímicos avanzados, como el ciclo de S-I (azufre-iodo), y la electrólisis de vapor de alta temperatura. Japón busca integrar estas tecnologías en su infraestructura energética para contribuir a la economía del hidrógeno y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Japón, en 2011, contaba con un total de 55 reactores nucleares en operación, lo que lo convierte en el tercer mayor productor de energía nuclear en el mundo después de Estados Unidos y Francia. Sin embargo, después del desastre nuclear de Fukushima Daiichi

en 2011, se ordenó la suspensión de todas las operaciones nucleares del país, y solo se han reiniciado algunas luego de numerosas pruebas de seguridad y actualizaciones de instalaciones.

Es un país muy activo en investigación y desarrollo en tecnologías de hidrógeno con varios proyectos como Sunshine (1974) centrado en desarrollar nuevas tecnologías energéticas y reducir la contaminación ambiental, Moonlight (1978), enfocado en tecnologías de ahorro y conversión de energía, New Sunshine (1993) donde fusionó los proyectos anteriores para abordar nuevas fuentes de energía, conversión de energía y tecnología ambiental, el proyecto de demostración de hidrógeno y celdas de combustibles y pilas de combustible, entre otros.

Este país, en forma semejante a Alemania, trabaja en el desarrollo y demostración de plantas piloto para el reformado de vapor nuclear y la gasificación de carbón.

República de Corea: ha establecido una visión a largo plazo para la transición a una economía del hidrógeno, donde la energía nuclear jugará un papel crucial. Se están desarrollando tecnologías para la producción, almacenamiento y suministro de hidrógeno. Corea del Sur planea demostrar estas tecnologías para 2030 y comercializarlas en la década siguiente, utilizando sistemas nucleares de cuarta generación y reactores de alta temperatura. En 2011, la República de Corea contaba con un total de 21 reactores nucleares en operación, lo que convierte a Corea del Sur en uno de los mayores usuarios de energía nuclear per cápita en el mundo.

Un proyecto de desarrollo de tecnologías clave para el hidrógeno nuclear comenzó en 2006 como un programa nacional de 12 años para desarrollar y demostrar las tecnologías requeridas para el futuro sistema de hidrógeno nuclear. Las instituciones involucradas en el proyecto son KAERI para la parte nuclear, y el Instituto de Investigación de Energía de Corea (KIER) y el Instituto de Ciencia y Tecnología de Corea (KIST) para la parte de hidrógeno. Estas actividades nacionales se llevan a cabo en paralelo con la investigación y desarrollo del VHTR de Generación IV. La investigación y desarrollo se concentra en la tecnología HTGR. Se ha decidido un enfoque de dos pasos que prevé, en el primer paso, la implementación de un HTGR avanzado (AHTGR) con una temperatura moderada de salida del refrigerante de 850°C, que se conectará a un sistema de reformado de vapor-metano con el gas de síntesis utilizado en la reducción de mineral de hierro o la producción de metanol. El paso final será el VHTR más desafiante con una temperatura de salida del refrigerante de 950°C.

Sudáfrica: tiene solo pequeños depósitos de petróleo y gas natural, dependiendo principalmente de la producción de carbón para la mayor parte de sus necesidades energéticas. El suministro de energía primaria en 2007 fue de 128 Mtoe con una tasa de crecimiento del 4.4% anual.

Este país representa una fracción significativa de las emisiones de CO₂ de todo el continente. Debido a sus grandes depósitos de carbón, Sudáfrica es uno de los proveedores de electricidad más baratos del mundo. La capacidad de generación de energía basada en carbón representa el 79% (~40 GW(e)), seguida por petróleo crudo (10%), renovables (6%), nuclear (3%) y gas natural (2%).

Sudáfrica ha desarrollado una serie de actividades de investigación y desarrollo (I+D) centradas en el uso del calor de proceso nuclear, impulsadas por sus abundantes recursos de uranio, metales del grupo del platino y experiencia en tecnologías nucleares, incluyendo HTGR.

En 2007, se aprobó la Estrategia Nacional de Hidrógeno y Celdas de Combustible, enfocada en desarrollar soluciones competitivas para la producción de hidrógeno mediante gasificación de carbón nuclear con HTGRs.

El proyecto PBMR (Pebble Bed Modular Reactor), lanzado en 2004 como Proyecto Estratégico Nacional, avanzó significativamente antes de verse afectado por la crisis económica mundial en 2009. Logró varios hitos técnicos, incluyendo diseños de reactores y análisis de seguridad nuclear. El diseño más reciente incluye un reactor de lecho de guijarros de 400 MW (th) con un ciclo Brayton directo recuperativo.

PBMR también exploró el diseño de plantas de ciclo de vapor nuclear para mercados de electricidad y calor de proceso a pequeña escala. Esto incluye propuestas para plantas de demostración de 200-250 MW térmicos en el sitio nuclear de Koeberg.

Además, en colaboración con Westinghouse, PBMR desarrolló el diseño preconceptual de plantas NGNP (Next Generation Nuclear Plant) para la producción de hidrógeno, explorando métodos como la reforma de metano por vapor y ciclos termoquímicos.

Estados Unidos: ha iniciado varios programas de investigación y desarrollo (I+D) para la producción de hidrógeno utilizando energía nuclear, destacando la Iniciativa de Hidrógeno Nuclear (NHI). Los objetivos incluyen demostrar la producción comercial de hidrógeno para 2017 utilizando reactores modulares de helio (MHR) y desarrollar ciclos termoquímicos avanzados y la electrólisis de alta temperatura. Estados Unidos también está explorando la sinergia entre la energía nuclear y las energías renovables para crear un sistema energético más resiliente y sostenible. EE. UU., en 2009, tenía alrededor de 104 reactores nucleares en operación en 65 plantas nucleares ubicadas en todo el país, lo que lo convierte en el país con la mayor cantidad de reactores nucleares en operación en el mundo.

Como parte del programa nacional de investigación del hidrógeno, el DOE de EE.UU. creó la Iniciativa de Hidrógeno Nuclear (NHI) con el objetivo de avanzar en la energía nuclear para apoyar una futura economía del hidrógeno. El marco se amplió con el inicio de la Iniciativa Internacional de Investigación en Energía Nuclear (I-NERI) para la cooperación internacional bilateral o multilateral que apoya actividades de I+D para la Generación IV, la NHI y el ciclo avanzado de combustible R+D.

Los objetivos de I-NERI incluyen el desarrollo y la demostración de tecnologías que permitan la producción de hidrógeno impulsada por energía nuclear mediante procesos de producción de H₂ basados en el agua sin combustibles fósiles. El objetivo de coste del DOE para el hidrógeno (a partir de 2005) es de 2 a 3 dólares por gge (galones equivalentes de gasolina), independientemente de la vía de producción y entrega de H₂.

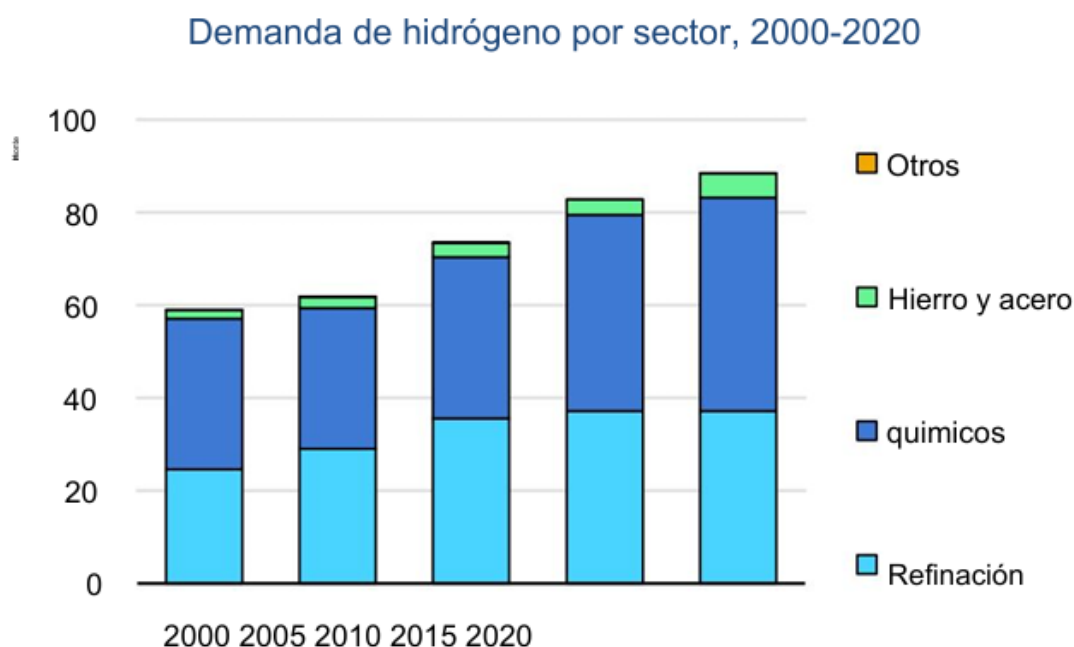


Figura 2: Demanda de Hidrógeno por sector. Fuente: (IAE, 2021).

Argentina: cuenta con tres reactores nucleares en operación comercial y ha desarrollado una amplia gama de aplicaciones en campos como medicina, agricultura e investigación científica. En la Central Nuclear Embalse, el reactor es de agua pesada y moderador de uranio natural (PHWR), potencia 600 MWe, operativo desde 1984; la Central Atucha I, con un reactor de agua pesada y moderador de uranio natural (PHWR), con 357 MWe de potencia, operativo desde 1974 y la Central Atucha II, con un reactor de agua presurizada (PWR) de 745 MWe, operativo desde 2014. Además, tiene en proyecto y desarrollo otros reactores nucleares como el CAREM (Central Argentina de Elementos Modulares) de diseño argentino de reactor modular pequeño de agua liviana y moderador de grafito, que está en etapa de construcción de un prototipo.

Junto con Japón, el objetivo de Argentina es fomentar la cooperación en proyectos e iniciativas para avanzar en el despliegue del hidrógeno mediante el intercambio de información y el establecimiento de cadenas de suministro y asociaciones (IAE, 2021).

En el mundo, la demanda de hidrógeno creció un 50% desde el cambio de milenio (IAE, 2021), donde proviene casi toda de la refinación y los usos industriales, Figura 2, donde el término “otros” hace

referencia a pequeños volúmenes de demanda en aplicaciones industriales, transporte, inyección a red y generación de electricidad.

RESULTADOS

En Canadá, la investigación del CANDU Mark 2 SCWR busca desarrollar una tecnología nuclear avanzada que pueda ofrecer soluciones sostenibles y eficientes para la producción de hidrógeno, la generación de electricidad y vapor, y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo así a los objetivos energéticos y ambientales de Canadá.

En China, el desarrollo del reactor modular de lecho de guijarros de alta temperatura HTGR y la producción de hidrógeno nuclear tienen como objetivo no solo la generación eléctrica flexible, sino también una solución viable para la producción de hidrógeno a gran escala, contribuyendo a los objetivos de energía limpia y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de China.

En Francia, las actividades de I+D están orientadas a fortalecer la capacidad de producción de hidrógeno nuclear, mejorar la tecnología de reactores de alta temperatura y desarrollar nuevos componentes y materiales necesarios para operar eficientemente a temperaturas elevadas.

En India, se busca posicionar al país como líder en la utilización de tecnologías nucleares avanzadas para la producción de hidrógeno, contribuyendo así a la diversificación de su matriz energética y a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Sigue una hoja de ruta para el desarrollo de reactores nucleares avanzados que utilicen torio con tecnologías capaces de suministrar el calor de proceso necesario a altas temperaturas, que generen hidrógeno nuclear a través del proceso termoquímico S-I.

Japón está dedicando esfuerzos significativos y recursos financieros al desarrollo de una economía basada en el hidrógeno, buscando mejorar la seguridad energética, reducir emisiones de gases de efecto invernadero y resolver problemas ambientales globales. Debido a los proyectos de I+D mejorados y activamente promovidos, financieramente apoyados por el gobierno, Japón se ha convertido en un fuerte jugador en el desarrollo de una economía del hidrógeno. Además de EE. UU., es el país líder en investigación de celdas de combustible, con grandes inversiones tanto del gobierno como de las industrias automotrices.

En la República de Corea, el Ministerio de Ciencia y Tecnología (MOST) inició una investigación sistemática sobre la producción, almacenamiento y utilización de hidrógeno, y lanzó un programa fundamental de desarrollo de tecnología de celdas de combustible para integrar la energía nuclear en la economía de hidrógeno del futuro, con el objetivo de reducir las emisiones de CO₂ y mejorar la eficiencia energética utilizando energía nuclear avanzada.

Sudáfrica inició actividades que reflejan su compromiso con el desarrollo de tecnologías avanzadas de energía nuclear para diversificar su mix energético y aprovechar sus recursos naturales de manera sostenible y competitiva a nivel global.

En EEUU, el programa de investigación y desarrollo se centra en varias áreas claves dentro del sector energético incluyendo, en energía nuclear, la investigación y el desarrollo de reactores nucleares rápidos refrigerados por sodio y reactores de alta temperatura. También, el reactor modular de helio (MHR) para la generación de energía limpia y la producción de hidrógeno; la economía de hidrógeno, utilizando ciclos termoquímicos avanzados o tecnologías de electrólisis de alta temperatura. Cuenta con financiamiento federal y colaboraciones con instituciones académicas, la industria y otras naciones a través de iniciativas internacionales de colaboración en investigación.

Tabla 2: Inversión comprometida para el desarrollo de la tecnología del hidrógeno.

País	Documento, año	Objetivos de implementación (2030)	Producción	Usos	Inversión pública comprometida
Australia	Hidrógeno Nacional Estrategia, 2019	No especificado	Carbón con CCUS Electrólisis (renovable) Gas natural con CCUS		1,2 mil millones de dólares australianos (~USD 0,9 mil millones)
Canadá	Estrategia de Hidrógeno para Canadá, 2020	Uso total: 4 Mt H2/año 6,2% TFEC	Biomasa Subproducto H2 Electrólisis Gas natural con CCUS Aceite con CCUS		25 millones de dólares canadienses hasta 2026(1) (~USD 19 millones)
Chile	Hidrógeno Verde Nacional Estrategia, 2020	Electrólisis de 25 GW(2)	Electrólisis (renovable)		50 millones de dólares para 2021
checo República	estrategia de hidrógeno, 2021	Demanda de bajas emisiones de carbono: 97 kt H2/año	Electrólisis		n / A
europo Unión	Estrategia de Hidrógeno de la UE, 2020	Electrólisis de 40 GW	Electrólisis (renovable) Papel transitorio del gas natural con CCUS		3,77 mil millones de euros hasta 2030 (~USD 4,3 mil millones)
Francia	Implementación de hidrógeno Plan, 2018 Estrategia Nacional para Hidrógeno descarbonizado Desarrollo, 2020	Electrólisis de 6,5 GW 20-40% H2 industrial descarbonizado (3) 20 000-50 000 vehículos ligeros FC (3) HDV de 800 a 2 000 FC (3) 400-1 000 HRS (3)	Electrólisis		7,2 mil millones de euros para 2030 (~USD 8,2 mil millones)
Alemania	Hidrógeno Nacional Estrategia, 2020	Electrólisis de 5 GW	Electrólisis (renovable)		9 mil millones de euros hasta 2030 (~USD 10,3 mil millones)
Hungría	Hidrógeno Nacional Estrategia, 2021	Producción: 20 kt/año de H2 bajo en carbono 16 kt/año de H2 libre de carbono Electrólisis de 240 MW Uso: 34 kt/año de H2 con bajas emisiones de carbono 4.800 FCEV 20 HRS	Electrólisis Combustibles fósiles con CCUS		n / A
Japón	Hoja de ruta estratégica para Hidrógeno y pilas de combustible, 2019 estrategia de crecimiento verde, 2020, 2021 (revisado)	Uso total: 3 Mt H2/año Suministro: 420 kt de H2 con bajas emisiones de carbono 800.000 FCEV 1.200 autobuses FC 10.000 carretillas elevadoras FC 900 HRS Demanda de combustible de 3 Mt de NH3 (4)	Electrólisis Combustibles fósiles con CCUS		699,6 mil millones de yenes para 2030 (~USD 6,5 mil millones)
Corea	Economía del hidrógeno Mapa vial, 2019	Uso total: 1,94 Mt H2/año 2,9 millones de automóviles FC (más 3,3 millones exportados)(5) 1.200 HRS(5) 80.000 taxis FC(5) 40.000 autobuses FC(5) 30.000 camiones FC(5) 8 GW de FC estacionarios (más 7 GW exportados)(5) 2,1 GW de FC de microgeneración (5)	Subproducto H2 Electrólisis Gas natural con CCUS		2,6 billones de wones en 2020 (~USD 2,2 mil millones)
Países Bajos	Clima Nacional Acuerdo, 2019 Estrategia de Gobierno sobre Hidrógeno, 2020	Electrólisis de 3-4 GW 300.000 coches FC 3.000 FC HDV (6)	Electrólisis (renovables) Gas natural con CCUS		70 millones de euros/año (~USD 80 millones/año)
Noruega	Hidrógeno del gobierno Estrategia, 2020 Hoja de ruta del hidrógeno, 2021	na(7)	Electrólisis (renovables) Gas natural con CCUS		NOK 200 millones para 2021 (~USD 21 millones)
Portugal	Hidrógeno Nacional Estrategia, 2020	2-2,5 GW electrólisis 1,5-2% TFEC 1-5% TFEC en transporte por carretera 2-5% TFEC en la industria 10-15 % vol% H2 en red de gas 3-5% TFEC en transporte marítimo 50-100 HORAS	Electrólisis (renovables)		900 millones de euros hasta 2030 (~USD 1,0 mil millones)
Rusia	Hoja de ruta del hidrógeno 2020	Exportaciones: 2 Mt H2	Electrólisis Gas natural con CCUS		n / A
España	Hidrógeno Nacional Mapa vial, 2020	Electrólisis de 4 GW 25% H2 industrial descarbonizado 5 000-7 500 FC vehículos LDV y HDV 150-200 autobuses FC 100-150 HRS	Electrólisis (renovables)		1,6 mil millones de euros (~USD 1,8 mil millones)
Unido Reino	Estrategia de hidrógeno del Reino Unido, 2021	5 GW de capacidad de producción baja en carbono	Gas natural con CCUS Electrólisis		1.000 millones de libras esterlinas (~USD 1,3 mil millones)

Fuente: (IAE, 2021)

Las referencias gráficas indicadas en la columna usos de la Tabla 2 son:



En general, los métodos para la producción de hidrógeno empleando la energía nuclear, son:

- Electrólisis Convencional a Baja Temperatura: método probado, pero con baja eficiencia, viable con electricidad nuclear barata y abundante.
- Reformado de Vapor Nuclear: competitivo en costo, pero no sostenible a largo plazo debido a emisiones de CO₂.
- Gasificación de Carbón Nuclear: viable en grandes plantas centralizadas, depende del costo y disponibilidad del carbón comparado con otros combustibles.
- Electrólisis a Alta Temperatura y Ciclos Termoquímicos: mejora la eficiencia y se investigan con reactores de alta temperatura como los HTGR.

Finalmente, se pueden ver en la Tabla 2, los objetivos de implementación al año 2030 frente a la inversión pública comprometida por los países (IAE, 2021): El hidrógeno es una parte importante del escenario para lograr emisiones netas cero en 2050.

DISCUSIÓN

Los métodos de producción de hidrógeno utilizando energía nuclear presentan desafíos y consideraciones significativas, particularmente en cuanto a seguridad, gestión de residuos nucleares y costos asociados. Actualmente, la producción de hidrógeno mediante energía nuclear está en fases de investigación y desarrollo, y su viabilidad y aceptación dependerán de múltiples factores, incluidos los avances tecnológicos, la disponibilidad de recursos nucleares, las políticas energéticas vigentes, y las consideraciones ambientales y de seguridad.

Es de recalcar que la producción de hidrógeno a partir de energía nuclear presenta un enorme potencial para descarbonizar la industria y el transporte, teniendo en cuenta:

Reducción de emisiones:

- Emisiones actuales: el 95% del hidrógeno actual se produce mediante métodos con alta huella de carbono, emitiendo alrededor de 70 megatoneladas de CO₂ al año.
- Impacto de la energía nuclear: si el 4% de la producción actual se generara con energía nuclear, se reducirían las emisiones en hasta 60 megatoneladas anuales.
- Potencial total: si toda la producción de hidrógeno se basara en energía nuclear, se eliminarían más de 500 megatoneladas de CO₂ al año (Fisher, 2020).

Beneficios adicionales:

- *Versatilidad:* el hidrógeno producido con energía nuclear puede utilizarse en diversos sectores, incluyendo:
- *Combustibles:* producción de e-fuels y combustibles sintéticos.
- *Petroquímica:* fabricación de productos petroquímicos.
- *Electrónica:* elaboración de semiconductores.
- *Transporte:* alimentación de vehículos eléctricos con pilas de combustible.
- *Seguridad energética:* la energía nuclear ofrece una fuente de energía estable y confiable para la producción de hidrógeno, no sujeta a las fluctuaciones de las energías renovables.
- *Almacenamiento de energía:* el hidrógeno puede almacenarse de manera eficiente, lo que permite utilizarlo como vector energético para transportar y almacenar energía renovable.

Desafíos:

- *Inversión inicial:* la construcción de nuevas plantas de energía nuclear requiere una inversión significativa.
- *Aceptación pública:* existen preocupaciones en torno a la seguridad y los desechos nucleares, lo que requiere un mayor esfuerzo en comunicación y educación.
- *Desarrollo tecnológico:* se necesita seguir avanzando en la eficiencia y el costo de las tecnologías de producción de hidrógeno a partir de energía nuclear.

Una iniciativa conjunta nacida en el Foro Internacional de la Generación IV (GIF) en 2000, con la participación inicial de nueve países: Argentina, Brasil, Canadá, Francia, Japón, la República de Corea, Sudáfrica, Reino Unido y Estados Unidos, a los que se unieron posteriormente, Suiza (2002), Euratom (2003), China y la Federación Rusa (ambos en 2006), plantea desarrollar la cuarta generación de

reactores nucleares entre 2030 y 2040. Los reactores de generación IV serán más seguros, fiables, económicamente viables y resistentes a la proliferación nuclear (diseminación de armas nucleares, materiales fisibles y de la información y la tecnología nuclear) esperando que penetren en mercados no eléctricos como la producción de hidrógeno en gran escala. Estos reactores están diseñados para temperaturas de refrigerante más altas que la mayoría de los reactores nucleares actuales. Esto permitirá que los futuros reactores generen electricidad con mayor eficiencia y también calor o vapor para diversos procesos.

El GIF decidió en 2002 continuar con el estudio de seis diseños de reactores nucleares, luego de evaluar aproximadamente 100 posibles diseños de la Generación IV. Los diseños seleccionados son: *Reactor rápido refrigerado por gas (GFR)*, *Reactor rápido refrigerado por plomo (LFR)*, *Reactor refrigerado por sales fundidas (MSR)*, *Reactor rápido refrigerado por sodio (SFR)*, *Reactor refrigerado por agua supercrítica (SCWR)* y *Reactor de muy alta temperatura (VHTR)*.

Argentina se propone a participar en el mercado internacional de hidrógeno potenciando el desarrollo productivo a lo largo de toda la cadena de valor. Teniendo en cuenta la Estrategia Nacional de Hidrógeno (ENH) surgen los siguientes resultados (SAE, 2023):

- Hacia 2050 tendrá una producción de 5 Mt/año de hidrógeno de bajas emisiones. El 20% estará destinado al mercado local, tanto para la descarbonización de los usos actuales del hidrógeno (industrias del acero, petroquímica y refino) como para atender los nuevos usos (principalmente combustibles sintéticos). El 80% restante, unas 4 Mt anuales, estará destinado a abastecer, a través de exportaciones, el mercado internacional de vectores energéticos de bajas emisiones.
- Para alcanzar estas metas de producción será necesario instalar al menos 30 GW de capacidad de electrólisis y 55 GW de generación eléctrica renovable, lo que implica multiplicar por 11 la generación renovable actual y más que duplicar la generación total de electricidad en la Argentina.
- La producción de hidrógeno girará en torno a polos productivos, ubicados en función de la calidad de los recursos y la cercanía a los mercados internos y puertos para la exportación.
- La vinculación de estos polos con la red de universidades y centros tecnológicos locales será clave para el desarrollo de nuevas tecnologías, así como para la adopción temprana y adaptación a las condiciones productivas locales.
- La realización de los objetivos establecidos requiere una fuerte transformación de la infraestructura, en corredores viales críticos y puertos.

De acuerdo con (IAE,2021), Europa lidera el despliegue de capacidad de electrolizadores, con el 40% de la capacidad instalada mundial, y seguirá siendo el mercado más grande en el corto plazo gracias a las ambiciosas estrategias de hidrógeno de la UE y UK. Los planes de Australia sugieren que podría alcanzar a UE en unos pocos años; se espera que Latam y Medio Oriente también desplieguen grandes cantidades de capacidad, particularmente para la exportación. China tuvo un comienzo lento, pero el número de anuncios de proyectos crece rápidamente, y EEUU está intensificando sus ambiciones con su recientemente anunciado Hydrogen Earthshot. Se destaca la importancia de una cooperación internacional más sólida como palanca clave para avanzar en la producción de hidrógeno mediante tecnologías nucleares. La Agencia Internacional de Energía (AIE) recomienda que los gobiernos aumenten sus ambiciones y apoyen la creación de demanda de hidrógeno. Además, subraya la necesidad de proporcionar un fuerte apoyo a la innovación para garantizar que las tecnologías críticas lleguen pronto a la comercialización y de aumentar los presupuestos de I+D para proyectos de demostración

CONCLUSIONES

Los países analizados en este estudio —Canadá, China, Francia, Alemania, India, Japón, la República de Corea y Estados Unidos— han demostrado ser actores clave en el desarrollo y la implementación de tecnologías nucleares avanzadas para la producción de hidrógeno. Estos países no solo invierten en investigación y desarrollo, sino que también promueven políticas energéticas alineadas con los objetivos de descarbonización establecidos en el Acuerdo de París. La producción de hidrógeno nuclear se presenta como una opción viable para reducir significativamente las emisiones de CO₂, ofreciendo una alternativa más limpia frente a los métodos tradicionales basados en combustibles fósiles, como el reformado de gas metano con vapor (SMR), que tiene una elevada huella de carbono.

Uno de los aspectos más destacados de esta investigación es la colaboración entre los sectores público y privado, organismos internacionales, y universidades, lo que resalta la importancia de un enfoque

multidisciplinario y colaborativo para alcanzar los objetivos globales de sostenibilidad. La integración de tecnologías avanzadas, como los reactores de alta temperatura (AHTR) y la electrólisis con electricidad nuclear, juega un papel esencial en la mejora de la eficiencia y estabilidad del proceso de producción de hidrógeno rosa.

A pesar de los avances logrados, la producción de hidrógeno con energía nuclear enfrenta importantes desafíos, incluyendo cuestiones de seguridad nuclear, la gestión de residuos, los altos costos iniciales de inversión, y la aceptación pública. Estos obstáculos deben ser abordados mediante el avance en la investigación tecnológica, el desarrollo de marcos regulatorios robustos y la promoción de políticas públicas que fomenten la adopción de esta tecnología. Además, la integración de la producción de hidrógeno nuclear en la matriz energética global requiere una infraestructura adecuada y la implementación de estrategias a largo plazo.

En conclusión, la producción de hidrógeno con energía nuclear tiene el potencial de transformar el panorama energético global, contribuyendo a la descarbonización y al desarrollo sostenible. Sin embargo, para que esta tecnología alcance su máximo potencial, es fundamental continuar invirtiendo en I+D, fomentar la colaboración internacional y superar las barreras tecnológicas y socioeconómicas existentes.

REFERENCIAS

Fisher Matt (2020). La energía nucleoelectrica y la transición a una energía limpia. Boletín del OIEA, setiembre de 2020.

Forsberg Charles (2003). Hydrogen, nuclear energy, and the advanced high-temperature reactor. International Journal of Hydrogen Energy 28 1073-1081. URL: <www.sciencedirect.com> [consulta el 01 de Julio de 2023].

IAEA (2013). Basic Principles Objectives IAEA Nuclear Energy Series Hydrogen Production Using Nuclear Energy. <http://www.iaea.org/Publications/index.html>

IEA (2021). Global Hydrogen Review. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>

Matalucci Sergio (2024). The Hydrogen Stream. Pv magazine. URL: <https://www.pv-magazine.com/2024/07/16/the-hydrogen-stream-germany-grants-e4-6-billion-to-23-green-h2-projects/>

Quinn Patrick (2021). CNL advances hydrogen technology in Canada. Corporate Communications. URL: <https://www.cnl.ca/cnl-advances-hydrogen-technology-in-canada/>

Ramón, J., Teresa, M., Gotzon, A., Guilera, G. J., Tarancón, A., & Torrell, M. (2020). Hidrógeno Vector energético de una economía descarbonizada. 2a edición, © 2020 Fundación Naturgy, ISBN: 978-84-09-22546-0. www.fundacionnaturgy.org

Secretaría Asuntos Estratégicos – SAE (2023). Estrategia Nacional para el Desarrollo de la Economía del Hidrógeno. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2023/07/estrategia_nacional_de_hidrogeno_sae_2023.pdf

Seo, S. N. (2017). Beyond the Paris Agreement: Climate change policy negotiations and future directions. Regional Science Policy & Practice, 9(2), 121-140.

Schultz K, Brown L, Besenbruch G, Hamilton C (2003). Large-Scale production of Hydrogen by Nuclear Energy for the Hydrogen economy. General Atomics Project. GA-A24265.

United Nations Economic Commission for Europe – UNECE (2022). Carbon Neutrality in the UNECE

Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources.

https://unece.org/sites/default/files/2022-04/LCA_3_FINAL%20March%202022.pdf

INTERNATIONAL PROJECTS FOCUSED ON THE TOPIC OF NUCLEAR HYCROGEN PRODUCTION AND THE POSSIBILITIES OF THE ARGENTINE NUCLEAR

ABSTRACT: This paper presents a study that aims to examine the various initiatives and programs of different countries and regions in hydrogen production through nuclear energy. It highlights the main strategies and developments of countries such as Canada, China, France, Germany, India, Japan, the Republic of Korea, and the United States. The study also analyzes the possibilities in Argentina, emphasizing international collaboration and knowledge exchange as key factors for advancing hydrogen production using advanced nuclear technologies. The research highlights the importance of energy policies, investment in R&D, and the integration of advanced technologies for sustainable development and global decarbonization

Keywords: Nuclear Hydrogen. Production Methods. Generation IV.