

Brumfiel, G. Organic Cat Litter Chief Suspect In Nuclear Waste Accident. National Public Radio. Houston Public Media News. Mayo, 2014. <https://www.npr.org/sections/thetwo-way/2014/05/23/315279895/organic-kitty-litter-chief-suspect-in-nuclear-waste-accident>
Benke, E. Finland's plan to bury spent nuclear fuel for 100,000 years. BBC. Junio, 2023. <https://www.bbc.com/future/article/20230613-onkalo-has-finland-found-the-answer-to-spent-nuclear-fuel-waste-by-burying-it>
Associated Press. A 1.9 billion-year-old bedrock will soon house the world's first permanent nuclear waste site. Abril, 2026. <https://www.columbian.com/news/2026/apr/11/a-1-9-billion-year-old-bedrock-will-soon-house-the-worlds-first-permanent-nuclear-waste-site/>



Natalia Silva (MSc): Geóloga de la Universidad Industrial de Santander, Postgrado en Petroleum Geoscience de la Heriot-Watt University y Máster en Energías Renovables y Sostenibilidad Energética de la Universitat de Barcelona. Su carrera empieza en la minería de esmeraldas en el Cinturón Esmeraldífero Oriental de Colombia y en proyectos mineros de Níquel colombianos. Tiene más de 10 años de experiencia en el sector de hidrocarburos en desarrollo de

yacimientos y geomodelado en cuencas petrolíferas de los Estados Unidos, Colombia, Ecuador y Brasil. Más recientemente, su carrera está enfocada en el aprovechamiento de energías renovables, principalmente de energía solar, ha elaborado proyectos de generación eléctrica a partir de instalaciones fotovoltaicas en Europa y los Estados Unidos.

ensilvacruz@gmail.com

La odisea del hidrógeno: de curiosidad química a combustible del futuro

Luis Ángel Valencia Flores
Editor de la Revista

Introducción

El hidrógeno (H_2) es el elemento más abundante y ligero del universo, presentándose en la Tierra como un gas incoloro, inodoro, altamente inflamable y no tóxico. Aunque durante décadas ha sido visto principalmente como una materia prima para la industria química y la producción de fertilizantes, hoy se encuentra en el epicentro de la transición energética global. Con una densidad energética por masa superior a la de los hidrocarburos convencionales, el hidrógeno promete revolucionar sectores difíciles de electrificar, como el transporte pesado y la siderurgia, emitiendo únicamente agua al combustión.

El despertar de un gigante: De la alquimia a la ciencia

Aunque la humanidad ha convivido con emanaciones naturales de hidrógeno durante milenios, su identificación científica es relativamente reciente. Las llamas "eternas"

de **Chimaera en Turquía**, conocidas desde hace más de 2500 años y consideradas el origen de la primera llama olímpica, son en realidad filtraciones de gas ricas en hidrógeno (7.5%–11.3%) generadas por procesos geológicos. Fenómenos similares se documentaron en Filipinas con "Los Fuegos Eternos", donde las concentraciones de H_2 alcanzan hasta el 44.5%.

El reconocimiento formal del hidrógeno como una sustancia distinta ocurrió en **1776 gracias a Henry Cavendish**, y fue **Antoine Lavoisier en 1783** quien acuñó el nombre que conocemos hoy, derivado del griego para "generador de agua".

La era del "gas de ciudad" y la Revolución Industrial

A principios del siglo XIX, antes de la llegada masiva de la electricidad, el hidrógeno encontró su primer gran uso comercial a través del "**gas de ciudad**" (**town gas**). Inventado por Philippe Lebon en Francia (1801) y perfeccionado por científicos como Murdoch y Winsor, este gas se producía inicialmente quemando madera y luego carbón. El gas de ciudad contenía aproximadamente un **50% de hidrógeno**, un 35% de metano y un 10% de monóxido de carbono, iluminando las calles de las grandes metrópolis europeas.



Figura 1. Representación histórica de los experimentos de Henry Cavendish y Antoine Lavoisier que condujeron a la identificación y denominación del hidrógeno como elemento químico en el siglo XVIII.

A mediados del siglo XX, el descubrimiento de enormes yacimientos de gas natural (metano) desplazó al gas de ciudad debido a su mayor facilidad de manejo y menor toxicidad. El hidrógeno pasó entonces a un papel secundario, siendo fundamental para la síntesis de **amoniaco** (esencial para fertilizantes) y en los procesos de refinación de petróleo.

El espectro cromático del hidrógeno moderno

Para entender el papel del hidrógeno en la actualidad, la industria ha desarrollado un código de colores basado en su origen y huella de carbono:

□ **Hidrógeno Gris:** Producido a partir de gas natural mediante reformado con vapor (SMR), liberando grandes cantidades de CO₂.

□ **Hidrógeno Marrón/Negro:** Derivado de la gasificación del carbón.

□ **Hidrógeno Azul:** Igual al gris o marrón, pero utilizando tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CCS).

□ **Hidrógeno Verde:** Producido por la electrólisis del agua utilizando energías renovables, siendo libre de emisiones

pero actualmente más costoso.

□ **Hidrógeno Blanco (Natural):** Es el hidrógeno generado espontáneamente en el subsuelo por reacciones agua-roca.

□ **Hidrógeno Naranja (Estimulado):** Se obtiene inyectando agua en formaciones reactivas ricas en hierro para acelerar la generación natural de gas.

A pesar de sus ventajas, el hidrógeno enfrenta desafíos importantes:

- Costos de producción aún elevados.
- Infraestructura limitada de transporte y almacenamiento.
- Necesidad de mejorar la eficiencia de conversión energética.
- Requerimientos de seguridad para su manejo.

Sin embargo, los avances tecnológicos y las políticas internacionales de descarbonización están acelerando su adopción. Diversos países han desarrollado estrategias nacionales para impulsar una economía basada en hidrógeno, especialmente en sectores difíciles de electrificar.



Figura 2. Evolución de las aplicaciones del hidrógeno durante el siglo XX, destacando su uso industrial y su papel como combustible de alto rendimiento en programas espaciales.

El "Oro Blanco": El descubrimiento accidental en Mali

El interés moderno por el hidrógeno como combustible primario dio un giro radical en **1987 en Bourakébougou, Mali**. Mientras se perforaba un pozo en busca de agua, los trabajadores hallaron un gas explosivo que resultó ser

hidrógeno con una pureza del 98%. Desde 2012, este pozo alimenta un generador que provee electricidad limpia y barata a toda la aldea, demostrando que el hidrógeno geológico no es solo una curiosidad, sino un recurso comercialmente viable.

Este hallazgo ha desencadenado una "fiebre del oro blanco", llevando a la exploración activa en países como:

1. Australia: El proyecto Ramsay ha detectado concentraciones de hasta el **86% de H₂** en pozos originalmente perforados para petróleo en 1931.

2. España: El pozo Monzón-1, perforado en 1963, está siendo reevaluado tras hallarse acumulaciones con un **25% de hidrógeno**.

3. Estados Unidos: El USGS ha publicado recientemente el primer mapa de potencial de hidrógeno geológico, identificando zonas críticas en Nebraska y Kansas.

Políticas públicas y marcos regulatorios implementados en diversos países para fomentar el uso y la exploración del hidrógeno con especial énfasis en el hidrógeno de bajas emisiones y el hidrógeno natural.

1. Panorama general de las políticas globales

El panorama de las políticas públicas para el hidrógeno varía significativamente entre jurisdicciones, reflejando prioridades domésticas y limitaciones económicas. El objetivo central de estas intervenciones es cerrar la brecha de costos entre el hidrógeno de bajas emisiones y el hidrógeno producido a partir de combustibles fósiles sin mitigación. Actualmente, más de 65 países han publicado estrategias nacionales de hidrógeno, de los cuales 29 son economías emergentes.

2. Estrategias en economías avanzadas

Unión Europea: Posee uno de los enfoques más integrales, abordando toda la cadena de valor. Destacan el Banco Europeo de Hidrógeno, que realiza subastas para subsidiar la producción (con primas fijas de hasta 10 años), y los Proyectos Importantes de Interés Común Europeo (IPCEI). Además, la Directiva de Energías Renovables (RED) establece objetivos vinculantes, como cubrir el 42% de la demanda industrial de hidrógeno con combustibles renovables de origen no biológico (RFNBO) para 2030.

Estados Unidos: Su política se basa principalmente en incentivos fiscales a través de la Ley de Reducción de la Inflación (IRA). El crédito fiscal 45V ofrece hasta 3.2 USD/kg de H₂ para proyectos que cumplan con umbrales

estrictos de intensidad de carbono. También implementa garantías de préstamos y el desarrollo de hubs regionales de hidrógeno limpio.

Japón: Opera bajo la Ley de Promoción de la Sociedad del Hidrógeno, utilizando un esquema de Contratos por Diferencia (CfD) para proporcionar certidumbre de precios a largo plazo (15 años) a los productores.

Australia: Implementó el Incentivo Fiscal a la Producción de Hidrógeno en 2025, otorgando un apoyo de 2 AUD/kg (aprox. 1.3 USD/kg) por un máximo de 10 años. Es pionero en establecer estándares de arrendamiento específicos para la exploración de hidrógeno natural.

3. Liderazgo y expansión en Asia

China: Es el líder mundial en capacidad instalada de electrolizadores y el mayor mercado de consumo de hidrógeno. Su política se centra en el apoyo a través de empresas estatales para el uso industrial y un sistema de recompensas para ciudades piloto (como Beijing y Shanghái) que desplieguen vehículos de celda de combustible (FCEV). Recientemente, el hidrógeno fue incluido formalmente como vector energético en su Ley de Energía, lo que reduce la carga regulatoria al dejar de ser clasificado solo como sustancia peligrosa.

India: Ha lanzado el programa SIGHT (Strategic Interventions for Green Hydrogen Transition), que ofrece subsidios para la fabricación de electrolizadores y la producción de hidrógeno verde, además de abrir licitaciones para el sector de refinación.

4. Avances en el hidrógeno natural (blanco) y economías emergentes

Varios países han comenzado a adaptar sus marcos legales para permitir la exploración de hidrógeno geológico:

Francia: En 2022, enmendó su Código Minero para designar al hidrógeno natural como una sustancia minera, permitiendo así el otorgamiento de permisos de exploración.

Brasil: Aprobó la Ley No. 14.948/2024, que regula la exploración de hidrógeno natural y promueve la creación de hubs tecnológicos.

Filipinas: Lanzó en 2024 la primera subasta mundial dedicada exclusivamente a la exploración de hidrógeno natural.

Colombia y Uruguay: Han confirmado reservas en el subsuelo y planean rondas de licitación para la exploración de hidrógeno geológico entre 2025 y finales de la década.

5. Certificación y cooperación internacional

Para facilitar el comercio global, se están desarrollando esquemas de certificación y garantías de origen que rastrean las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a lo largo de la cadena de suministro. Organizaciones como la ISO esperan publicar una metodología estandarizada para 2025/2026. Asimismo, iniciativas como la Declaración del Hidrógeno de la COP 29 han sido respaldadas por 62 gobiernos para acelerar la descarbonización de los usos actuales de este gas

Conclusiones: El hidrógeno como combustible del mañana

La demanda mundial de hidrógeno podría quintuplicarse para el año 2050. Su versatilidad le permite actuar tanto como combustible para **pilas de combustible en camiones y barcos**, como fuente de calor industrial y vector de almacenamiento de energía para compensar la intermitencia de las renovables.

El gran desafío reside en la infraestructura de transporte y los costos de producción. Sin embargo, el hidrógeno

natural emerge como la opción más competitiva, con costos estimados de **1.5 a 1.0 USD/kg**, superando incluso al hidrógeno gris y posicionándose como la pieza faltante para una economía global descarbonizada.

Referencias

- Hanchate, N., Ramani, S., Mathpati, C. S., et al. (2021). Journal of Cleaner Production, 280, 123148..
- Hanson, J., & Hanson, H. (2024). Hydrogen's organic genesis. *Unconventional Resources*, 4, 100057..
- Maiga, O., Deville, E., Laval, J., Prinzhofer, A., & Diallo, A. B. (2023). Characterization of the spontaneously recharging natural hydrogen reservoirs of Bourakebougou in Mali. *Scientific Reports*, 13, 11876..
- Milkov, A. V. (2022). Molecular hydrogen in surface and subsurface natural gases: Abundance, origins and ideas for deliberate exploration. *Earth-Science Reviews*, 230, 104063..
- Moretti, I., Bouton, N., Ammouial, J., & Carrillo Ramirez, A. (2024). The H2 potential of the Colombian coals in natural conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 77, 1443-1456..
- PEMEX. (2025). *Evaluación potencial de hidrógeno geológico*. Gobierno de México..
- Royal Society of Chemistry. (2025). Environmental Science: Review..
- Zgonnik, V. (2020). The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth-Science Reviews*, 203, 103140.



Luis Ángel Valencia Flores (M.C.). Ingeniero Geólogo y Maestro en Ciencias en Geología, egresado de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura-Unidad Ticomán, Ciencias de la Tierra, del Instituto Politécnico Nacional. Cuenta con 25 años de experiencia. Ha trabajado en el Instituto Mexicano del Petróleo, Petróleos Mexicanos, Schlumberger, Paradigm Geophysical, Comisión Nacional de Hidrocarburos, Aspect Energy Holdings LLC, Facultad de Ingeniería de la

UNAM, actualmente es académico del Instituto Politécnico Nacional (posgrado y licenciatura) donde imparte asignaturas especializadas en la caracterización de yacimientos petroleros. Es estudiante del Doctorado en Energía en el IPN, especializándose en la exploración de Hidrógeno Natural y fuentes alternas de energías.

luis.valencia.11@outlook.com
lvalenciaf@ipn.mx

THE FUTURE OF NUCLEAR ENERGY

The future of nuclear energy is centered on a rapid pivot toward Small Modular Reactors (SMRs), private investments from the tech sector to power AI data centers, and an international push to triple global nuclear capacity by 2050 to meet net-zero emissions targets. The industry is undergoing a "second nuclear age," shifting away from massive, bespoke construction projects toward factory-mass-produced reactors that offer lower costs and faster deployment times. Key trends shaping this future include:

- 1. The Tech Sector Partnership**Surging energy demands from artificial intelligence and data centers have sparked massive interest in nuclear baseload power. Tech companies are bypassing traditional utility timelines by directly partnering with next-generation nuclear startups to secure round-the-clock, carbon-free energy.
- 2. Small Modular Reactors (SMRs) & Advanced Tech**Startups and energy developers are moving beyond traditional light-water reactors. SMRs use advanced coolants (like molten salts or liquid metals) and are assembled on assembly lines and shipped to sites, significantly reducing financial risk and construction times.
- 3. Government Backing & Global Adoption**The U.S. and over 30 other countries have set targets to triple global nuclear capacity by 2050 to fight climate change. Governments are backing this with heavy federal incentives and streamlined licensing approvals. Globally, China is leading the charge, operating and building over half of all new reactors worldwide.
- 4. Long-Term Potential: Nuclear Fusion**While nuclear fission dominates current plans, experimental fusion technology continues to emerge as a strategic research priority. If commercialized, fusion promises an abundant, virtually limitless source of clean energy.Despite this momentum, the industry still faces major hurdles, including high upfront capital costs, regulatory complexities, and public debate over radioactive waste. For detailed policy targets, see the U.S. Department of Energy or explore global deployment tracking on the International Atomic Energy Agency platform.

The World Nuclear Outlook Report reviews national

targets for nuclear capacity and assesses these against the global goal to triple nuclear capacity by 2050. It also reviews the current and future contribution of nuclear technology to energy provision and summarizes the range of different nuclear reactor technologies available.

<https://world-nuclear.org/our-association/publications/global-trends-reports/world-nuclear-outlook-report>

U.S. Sets Targets to Triple Nuclear Energy Capacity by 2050

U.S. targets map out 200 GW of new nuclear capacity by 2050.

Paul Terek used to be one of the top decathletes in the world.

He was an All-American at Michigan State University and competed for Team USA in Athens, Greece, during the 2004 Olympic Games. After injuries sidelined his career, Paul landed a good-paying union job in operations at the Diablo Canyon nuclear power plant in California.

In 2016, Paul and roughly 1,300 of his fellow employees were informed that the plant would close starting in 2024 — putting their future plans in jeopardy.

Unit 1 at the plant was supposed to shut down this month, on November 2. But thanks to local advocacy groups, state action, and federal nuclear credits, Paul is still helping to operate the plant today, and will be for the foreseeable future.

This is a success story that we might not have seen a few years back when nuclear power plants were closing due to the economics.

Now, plants like these are looking to extend operations, retired reactors are in the process of restarting, and new reactors are inching closer to deployment thanks to the historic investments and tax incentives provided by the Bipartisan Infrastructure Law and Inflation Reduction Act.

Both pieces of legislation are crucial climate and energy security components to the Administration's