

Capítulo tercero

Energía de fusión

Sehila M. González de Vicente

Resumen

La energía de fusión, proceso natural que alimenta al Sol y sostiene los sistemas climáticos y biológicos del planeta, se ha convertido en un reto científico de primer orden y en un activo estratégico clave en la competencia geoeconómica global. Replicar este mecanismo en la Tierra requiere unas condiciones muy exigentes desde el punto de vista de la ciencia y la tecnología. Esto se logró por primera vez en 2022 en la National Ignition Facility de Estados Unidos.

El interés renovado por la fusión responde a dos dinámicas estructurales: el progreso de tecnologías habilitadoras críticas — materiales avanzados, superconductividad, inteligencia artificial y computación de alto rendimiento— y la creciente demanda de energía firme, descarbonizada y escalable para sostener economías altamente electrificadas y digitalizadas.

En 2025, más de cincuenta empresas privadas se dedicaban al desarrollo de tecnologías de fusión, con una inversión acumulada cercana a los 10 000 millones de dólares desde 2021. La ventaja estratégica vendrá dada por el liderazgo industrial, la capacidad de fabricación avanzada y la integración coherente de políticas

públicas, regulación, financiación y capital humano. Los países que logren traducir el liderazgo científico en capacidad productiva consolidarán su posición en el nuevo orden energético global.

Palabras claves

Energía de fusión, Transición energética, Soberanía energética, Geopolítica de la energía, Competencia tecnológica.

Fusion power

Abstract

Fusion energy, the natural process that feeds the Sun and sustains the planet's climate and biological systems, has become a major scientific challenge and a key strategic asset in global geoeconomic competition. Replicating this mechanism on Earth requires very demanding science and technology conditions. This was first achieved in 2022 at the US National Ignition Facility.

Renewed interest in fusion responds to two structural dynamics: the progress of critical enabling technologies—advanced materials, superconductivity, artificial intelligence and high-performance computing—and the growing demand for firm and decarbonized energy, scalable to support highly electrified and digitized economies.

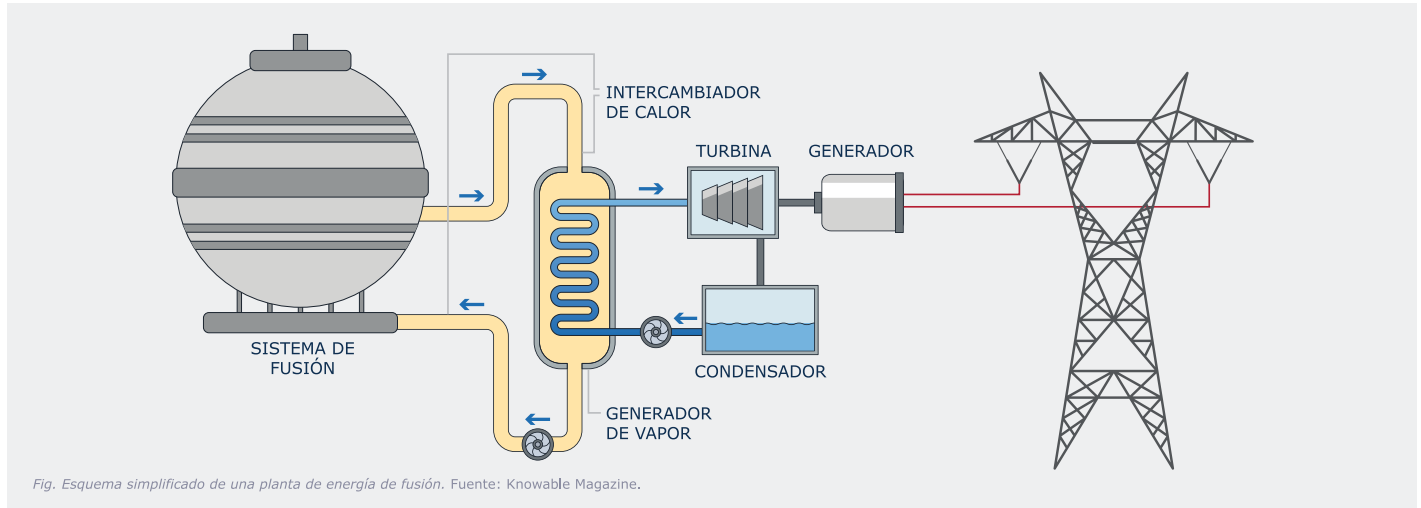
In 2025, more than 50 private companies were engaged in the development of fusion technologies, with a cumulative investment close to \$10 billion since 2021. The strategic advantage will be given by industrial leadership, advanced manufacturing capacity and coherent integration of public policy, regulation, financing and human capital. Countries that succeed in translating scientific leadership into productive capacity will consolidate their position in the new global energy order.

Keywords

Fusion energy, Energy transition, Energy sovereignty, Energy geopolitics, Technology competition.

ENERGÍA DE FUSIÓN

LA ENERGÍA DE FUSIÓN YA NO ES ÚNICAMENTE UNA CUESTIÓN DE FÍSICA AVANZADA SI NO UN VECTOR ESTRATÉGICO DE PODER ECONÓMICO, INDUSTRIAL Y TECNOLÓGICO, CUYA EVOLUCIÓN TENDRÁ IMPLICACIONES PROFUNDAS PARA LA GEOPOLÍTICA DE LA ENERGÍA EN LAS PRÓXIMAS DÉCADAS.



VENTAJAS DE LA ENERGÍA DE FUSIÓN



LIMPIA Y LIBRE DE EMISIONES: LAS REACCIONES DE FUSIÓN NO PRODUCEN CO₂ NI OTROS CONTAMINANTES ASOCIADOS A LA COMBUSTIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES.



ENERGÍA FIRME Y FIABLE: PROPORCIONA SUMINISTRO ENERGÉTICO CONTINUO Y ESTABLE, LAS 24 HORAS DEL DÍA, COMPLEMENTANDO A LAS ENERGÍAS RENOVABLES INTERMITENTES COMO LA SOLAR Y LA EÓLICA.



SEGURIDAD INTRÍNSECA: NO EXISTE RIESGO DE FUSIÓN DEL NÚCLEO, LO QUE GARANTIZA UN ALTO NIVEL DE SEGURIDAD OPERATIVA.



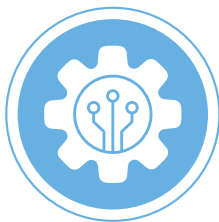
RESIDUOS DE BAJA ACTIVIDAD: GENERA RESIDUOS RADIATIVOS DE BAJA ACTIVIDAD Y VIDA CORTA, LO QUE SIMPLIFICA SU GESTIÓN.



ABUNDANCIA DE COMBUSTIBLE: EL DEUTERIO, EXTRAÍDO DEL AGUA, Y EL TRITIO OFRECEN EL POTENCIAL DE DISPONER DE RECURSOS PRÁCTICAMENTE ILIMITADOS.

DOS FACTORES ESTRUCTURALES CONVERGEN PARA SITUAR A LA FUSIÓN EN EL CENTRO DEL DEBATE ENERGÉTICO CONTEMPORÁNEO:

1



AVANCE DE TECNOLOGÍAS HABILITADORAS

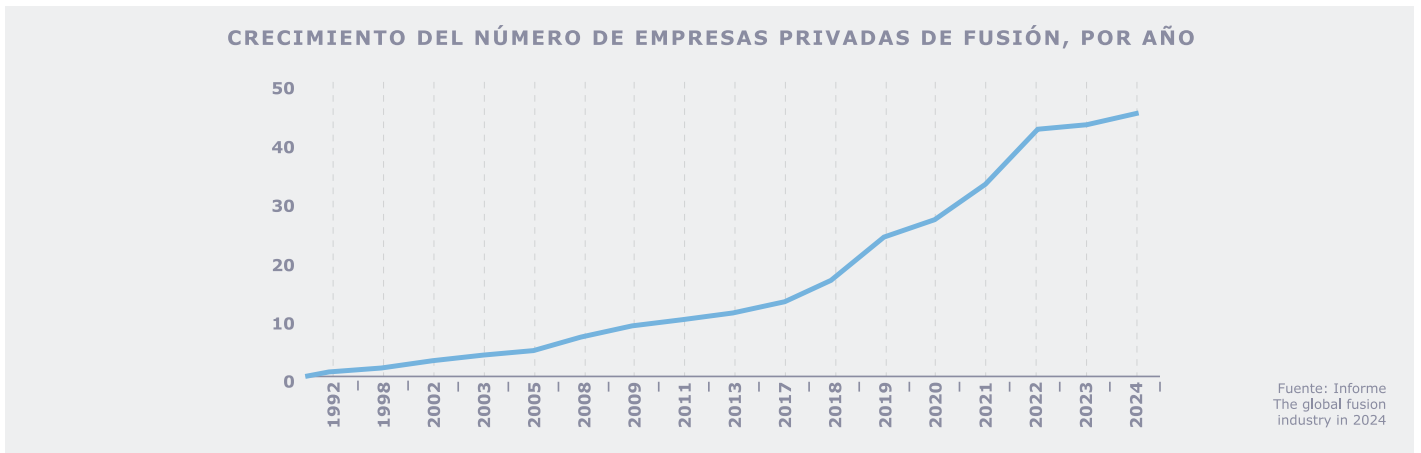
-DESDE NUEVOS MATERIALES HASTA CAPACIDADES COMPUTACIONALES AVANZADAS-

2

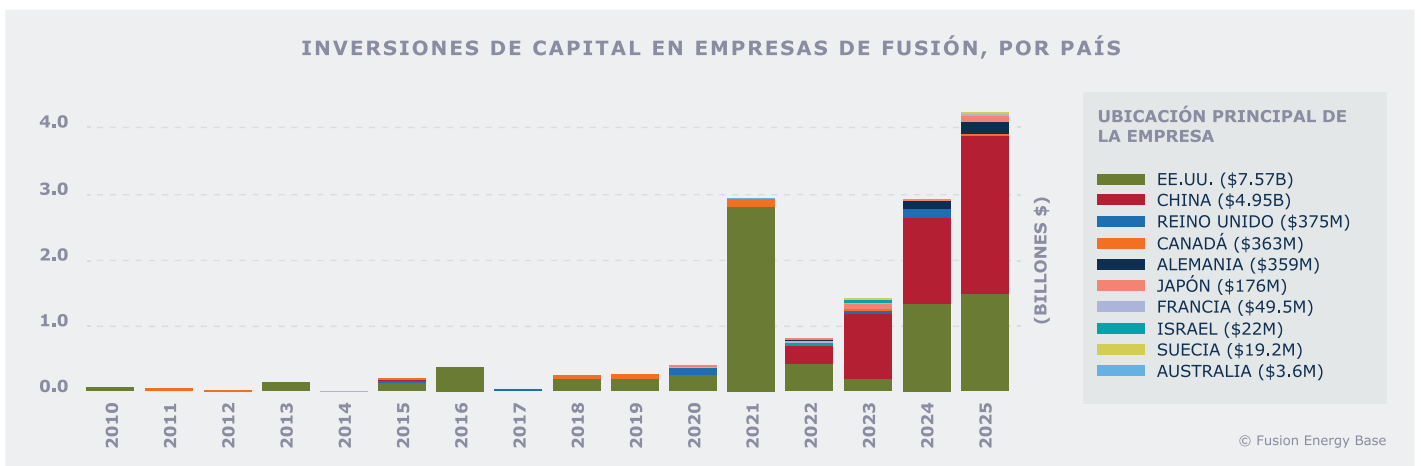


LA NECESIDAD CRECIENTE DE FUENTES DE ENERGÍA FIRMES, DESCARBONIZADAS Y ESCALABLES

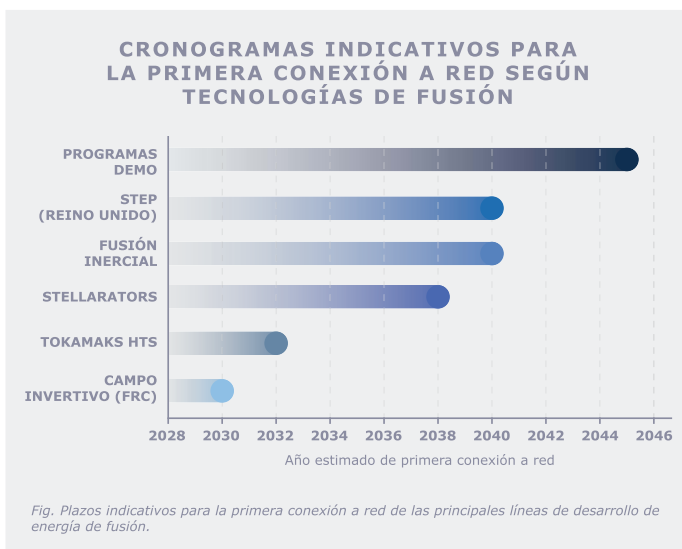
EXISTEN MÁS DE 50 COMPAÑÍAS PRIVADAS EN TODO EL MUNDO QUE DESARROLLAN DIVERSOS CONCEPTOS DE FUSIÓN.



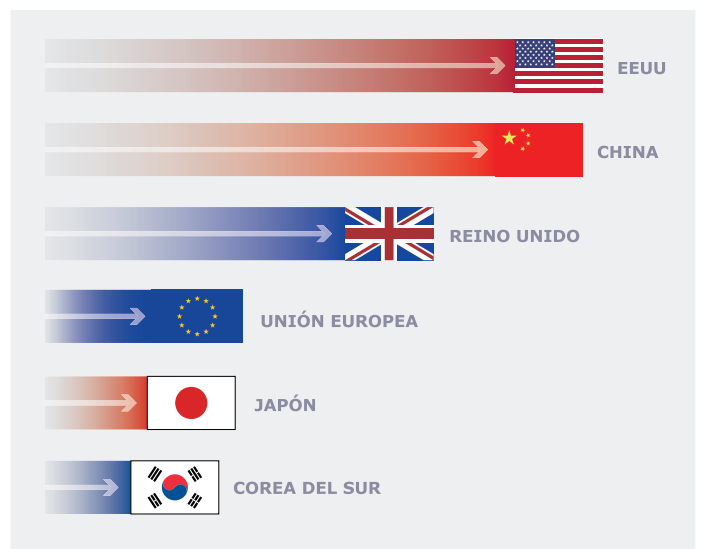
FINANCIACIÓN DE INICIATIVAS PRIVADAS: CON UN CRECIMIENTO ANUAL DEL 178% RESPECTO AL AÑO ANTERIOR Y UNA INVERSIÓN TOTAL CERCANA A LOS 10.000 MILLONES DE DÓLARES AMERICANOS DESDE 2021.



PLAZOS PARA LA CONEXIÓN A RED



LA CARRERA GLOBAL HACIA EL LIDERAZGO EN ENERGÍA DE FUSIÓN



1 Introducción

La energía de fusión no es una promesa abstracta ni una construcción teórica: es un fenómeno físico que ocurre de manera constante en la naturaleza y que constituye la base misma de la vida en la Tierra. La radiación solar que sostiene los sistemas climáticos, biológicos y económicos del planeta es el resultado directo de reacciones de fusión en el núcleo del Sol. Reproducir ese proceso de forma controlada en la Tierra representa, por tanto, uno de los mayores desafíos tecnológicos de la historia moderna, pero también una de las mayores oportunidades estratégicas para los sistemas energéticos del futuro.

El desarrollo de la energía de fusión exige un nivel de sofisticación tecnológica excepcional. Para que una reacción de fusión produzca energía neta es necesario alcanzar la denominada *ignición del plasma*: un estado en el que el propio proceso de fusión se autosostiene. Lograrlo implica calentar un plasma hasta temperaturas de cientos de millones de grados centígrados, confinarlo mediante campos magnéticos extremadamente intensos y mantener estas condiciones durante el tiempo suficiente para que la energía producida supere a la energía invertida. Este hito se alcanzó por primera vez en diciembre de 2022 en un experimento del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, en Estados Unidos, marcando un punto de inflexión histórico en la credibilidad científica de la fusión como fuente energética.

Sin embargo, el renovado interés global por la fusión no se explica únicamente por este logro experimental. Dos factores estructurales convergen para situar la fusión en el centro del debate energético contemporáneo. El primero es el avance de tecnologías habilitadoras —desde nuevos materiales hasta capacidades computacionales avanzadas— que reducen de forma significativa las barreras técnicas y económicas que han existido históricamente. El segundo es la necesidad creciente de fuentes de energía firmes, descarbonizadas y escalables, capaces de complementar a las energías renovables intermitentes y de sostener economías altamente electrificadas sin dependencia de combustibles fósiles.

Un ejemplo paradigmático de esta transformación tecnológica es el desarrollo de imanes superconductores de alta temperatura y alto campo magnético. Estos imanes permiten aumentar de forma sustancial la intensidad del campo magnético, lo que a su vez reduce drásticamente el tamaño de los dispositivos de fusión necesarios para confinar el plasma. Esta reducción de escala

tiene implicaciones directas en costes, tiempos de construcción y viabilidad industrial. Mientras que ITER —el mayor experimento de fusión del mundo— emplea bobinas superconductoras «tradicionales» que generan campos de alrededor de 5 teslas en una máquina con un radio mayor a 6,2 metros, nuevos dispositivos como SPARC, desarrollado por Commonwealth Fusion Systems, utilizan superconductores de alta temperatura y alto campo capaces de alcanzar 12 teslas (y probados hasta 20 teslas) en una máquina con un radio aproximado de 1,85 metros. Esta diferencia no es meramente técnica: refleja un cambio de paradigma que acerca la fusión del ámbito de la gran ciencia internacional al de la ingeniería industrial y la competencia geo-económica.

En este contexto, la energía de fusión deja de ser únicamente una cuestión de física avanzada para convertirse en un vector estratégico de poder económico, industrial y tecnológico, cuya evolución tendrá implicaciones profundas para la geopolítica de la energía en las próximas décadas.

Este capítulo analiza la energía de fusión no solo como una promesa tecnológica, sino como un factor emergente de transformación del sistema energético global y de las relaciones de poder económico entre Estados. A diferencia de otros capítulos centrados en tecnologías maduras, este aborda una tecnología aún en fase preindustrial, pero cuya trayectoria de desarrollo ya está influyendo en decisiones regulatorias, industriales y estratégicas a escala global.

El capítulo se estructura en cinco grandes bloques que conectan tecnología, regulación, capacidades computacionales avanzadas y competencia geopolítica, con el objetivo de mostrar cómo la fusión puede convertirse en un elemento central de la geo-economía de la energía en las próximas décadas y cómo la carrera por el control de esta tecnología ha comenzado ya.

2 Energía de fusión: innovación, soberanía energética y competitividad global

La energía siempre ha sido un pilar central de la geopolítica. El control sobre los recursos energéticos, las tecnologías y las cadenas de suministro ha configurado las relaciones internacionales, el desarrollo económico y la seguridad nacional durante más de un siglo. Desde el carbón y el petróleo hasta el gas natural y la fisión nuclear, cada gran transición energética ha reconfigurado los equilibrios de poder globales, generando nuevas dependencias

y redefinido la influencia estratégica. En el contexto del siglo XXI —marcado por el cambio climático, la fragmentación geopolítica y la aceleración tecnológica—, la fusión se percibe cada vez más no solo como una ambición científica, sino como un activo estratégico potencial con profundas implicaciones geopolíticas.

La energía de fusión ocupa una posición única en el panorama energético mundial. A diferencia de los combustibles fósiles, promete emisiones operativas de carbono prácticamente nulas; a diferencia de las fuentes renovables, ofrece la perspectiva de una generación continua y gestionable, independiente del clima o la geografía, y, a diferencia de la fisión nuclear, presenta características de seguridad intrínsecamente distintas y perfiles de residuos a largo plazo muy diferentes. Estas particularidades sitúan la fusión en la intersección de la política climática, la seguridad energética, la estrategia industrial y la soberanía tecnológica. Como resultado, la fusión está emergiendo como un tema de interés estratégico para los Gobiernos incluso antes de su despliegue comercial.

En 2025, la fusión ha alcanzado un punto de inflexión crítico. Décadas de investigación financiada con fondos públicos —en grandes programas internacionales como ITER— han sido complementadas por un sector privado en rápida expansión. Logros científicos, como la operación sostenida de plasmas de alto rendimiento; resultados relevantes para la ignición del plasma en fusión inercial, y avances en superconductores de alta temperatura han hecho que la energía de fusión pase de ser considerada una promesa lejana a una tecnología preindustrial con una consideración estratégica (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2021). Esta transición altera fundamentalmente la forma en que debe entenderse la fusión en el contexto energético: ya no únicamente como un esfuerzo de investigación a largo plazo, sino como un componente emergente de los sistemas energéticos y de la competencia industrial.

Desde una perspectiva geoestratégica, el atributo más distintivo de la fusión es su potencial para desvincular la producción de energía de la geopolítica tradicional de los recursos. Los combustibles de fusión —principalmente isótopos de hidrógeno— están ampliamente disponibles: el deuterio es extraíble del agua de mar y el tritio se autogenerará dentro de los propios sistemas de fusión. Si bien la disponibilidad de tritio representa una limitación estratégica a corto y medio plazo, la visión a largo plazo de ciclos de combustible autosostenibles contrasta radicalmente con las reservas geográficamente concentradas de petróleo, gas

y minerales críticos que dominan la geopolítica energética actual. Cuando se materialice a gran escala, la fusión podría reducir significativamente la exposición a la volatilidad de los precios de los combustibles y las interrupciones del suministro (AIE, 2023).

Al mismo tiempo, la fusión introduce nuevas dependencias estratégicas distintas a las anteriores. Más que el acceso al combustible, la ventaja geopolítica vendrá determinada por el liderazgo en la fabricación avanzada, la ciencia de materiales, las tecnologías superconductoras, los sistemas de control digital y la computación de alto rendimiento. En este sentido, la fusión se alinea claramente con otros factores clave en la competencia estratégica en tecnología como son la energía, la digitalización, la inteligencia artificial y los materiales avanzados. Los países que logren dominar estas tecnologías habilitadoras —y traducir el liderazgo científico en capacidad industrial— obtendrán no solo seguridad energética, sino también influencia económica y tecnológica. El liderazgo en fusión dependerá no solo de avances técnicos, sino de la capacidad para integrar políticas, regulación, financiación, desarrollo de capital humano e industria en estrategias nacionales y regionales coherentes.

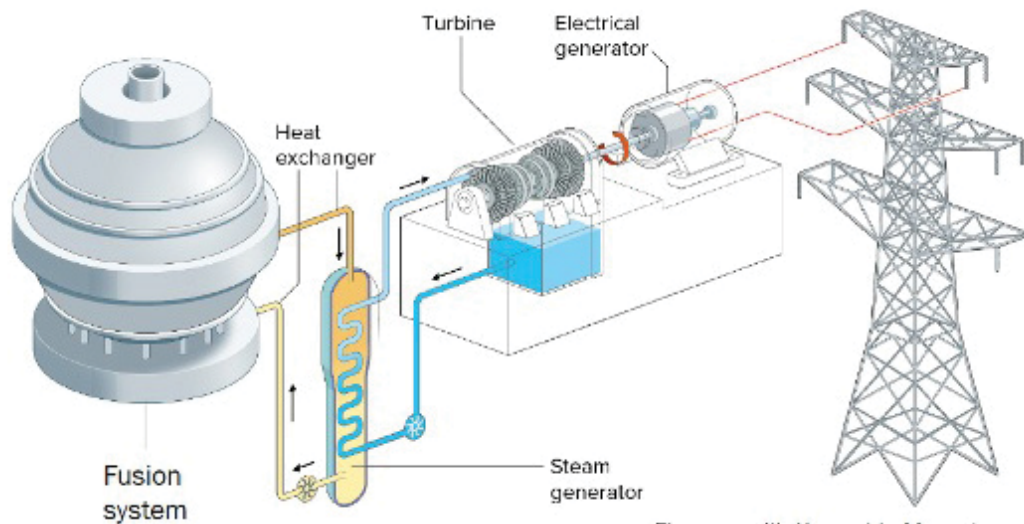


Figura 1: Esquema simplificado de una planta de *fusión*. Fuente: Knowable Magazine

La relevancia estratégica de la fusión también debe entenderse en el contexto de la descarbonización global. A medida que los países persiguen compromisos de cero emisiones netas, las limitaciones de las tecnologías energéticas existentes se hacen cada vez más evidentes. Las fuentes de energía renovable requieren almacenamiento a gran escala y refuerzo de redes; la fisión nuclear enfrenta desafíos

políticos, regulatorios y problemas relacionados con los residuos en muchas regiones. Por último, las tecnologías de captura de carbono siguen siendo inciertas a gran escala. Por ello, la fusión se perfila cada vez más como una opción de «energía firme y limpia» capaz de complementar las renovables en futuros sistemas bajos en carbono (Comisión Europea, 2023). Este enfoque posiciona la fusión no como una curiosidad científica, sino como un posible pilar de las estrategias climáticas y energéticas a largo plazo.

Asimismo, la energía de fusión tiene el potencial de desempeñar un papel transformador para satisfacer la demanda de electricidad en rápida expansión durante las próximas décadas. A medida que las sociedades electrifican el transporte, la industria y los edificios, y que las nuevas tecnologías digitales —especialmente la inteligencia artificial (IA) y los centros de datos— impulsan incrementos sin precedentes en el consumo eléctrico, los sistemas energéticos necesitarán una capacidad de base significativamente mayor, fiable y baja en carbono. Se prevé que la demanda global de electricidad continúe aumentando con fuerza hasta mediados de siglo, con escenarios que indican que el consumo total podría incrementarse en más de lo equivalente a añadir el consumo anual de Japón cada año hasta finales de la década de 2020, impulsado por la electrificación y el crecimiento digital (AIE, 2025). El crecimiento del consumo eléctrico podría más que duplicarse entre 2023 y 2050 a medida que la electrificación se expanda a nuevos sectores, la demanda asociada a la IA y la

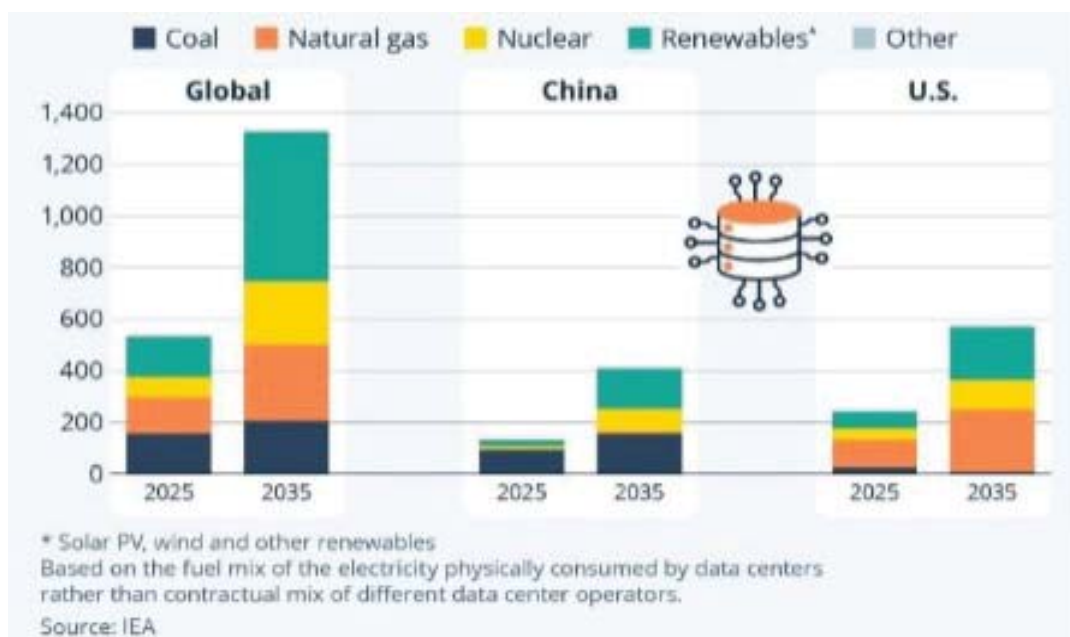


Figura 2: Generación de electricidad para proveer a los centros de datos (en TWh). Fuente: IEA

computación en la nube. Se prevé que la demanda de centros de datos se duplique para 2030 hasta casi 1000 TWh anuales debido a la IA y tecnologías relacionadas (McKinsey & Company, 2024). Al proporcionar energía firme que puede operar las 24 horas sin la variabilidad del viento o el sol, la fusión podría ayudar a garantizar la estabilidad de la red y respaldar la columna vertebral del sistema energético necesaria para satisfacer el creciente apetito global por fuentes de electricidad firmes.

El auge de las empresas privadas de fusión reconfigura aún más el panorama estratégico. A diferencia de generaciones anteriores de tecnología nuclear, la comercialización de la fusión se está impulsando mediante *start-ups* respaldadas por capital riesgo que operan en múltiples países. Esto introduce nuevas cuestiones sobre propiedad intelectual, controles de exportación, marco regulatorio y apoyo estatal. Los Gobiernos se enfrentan ahora a decisiones estratégicas: actuar principalmente como financiadores de investigación, como configuradores del mercado mediante regulación y contratación pública o como socios activos en la comercialización. Estas decisiones influirán no solo a nivel interno, sino también en la competitividad internacional y en las alianzas que se puedan llevar a cabo.

En este contexto, la energía de fusión es relevante desde el punto de vista geoestratégico no porque vaya a transformar inmediatamente la matriz energética global, sino porque las decisiones que se tomen en la década de 2020 determinarán quién controla el conocimiento, la infraestructura, los estándares y la capacidad industrial que sustentan la futura implantación de la fusión. Como en transiciones energéticas anteriores, el posicionamiento estratégico en las primeras fases probablemente generará ventajas a largo plazo. Comprender la fusión desde una perspectiva geoestratégica es, por tanto, esencial para navegar en un sistema energético global cada vez más complejo, competitivo y descarbonizado.

3 Estado de la fusión en 2025: de la investigación a la fase preindustrial

En 2025, la energía de fusión ha alcanzado una etapa en la que la investigación científica y el desarrollo de la ingeniería se superponen cada vez más con las primeras estrategias industriales y la planificación de la comercialización. Tras décadas de investigación básica en física de plasmas y de inversiones en grandes instalacio-

nes internacionales, la fusión ya no se percibe únicamente como un objetivo científico a largo plazo. En su lugar, se sitúa en una fase intermedia en la que se están validando tecnologías clave, múltiples prototipos se encuentran en construcción y un sector privado emergente se está posicionando de cara a una implantación futura.

3.1 ITER y los programas públicos de fusión

A la vanguardia del esfuerzo público se mantiene el *International Thermonuclear Experimental Reactor* (ITER), la mayor infraestructura científica jamás construida para conseguir la fusión mediante confinamiento magnético. Ubicado en Cadarache, Francia, ITER está diseñado para demostrar la viabilidad física y tecnológica para producir energía neta a partir de reacciones de fusión usando como combustible deuterio-tritio, con el objetivo de alcanzar una ganancia energética diez veces superior ($Q \approx 10$), pero sin conectar esa energía a la red, previsto para 2039¹.

El objetivo de ITER es operar a 500 MW (durante al menos 400 segundos de forma continua) con una potencia de calentamiento del plasma de 50 MW. ITER no generará electricidad y será



Figura 3: Vista aérea con dron del tokamak de ITER y del emplazamiento en construcción. 14-05-2025 - Foto: ITER Organization/EJF Riche.

¹ Ver: <https://www.iter.org/sites/default/files/media/2025-11/exe-ra-2024-ok-web.pdf>

una máquina experimental. El Tokamak de ITER será el mayor jamás construido, con un volumen para el plasma de 830 m³ y un radio mayor de 6,2 metros.

ITER está financiado y será operado por siete miembros: China, la Unión Europea (UE), India, Japón, Rusia, Corea del Sur y Estados Unidos. Suiza participó a través de Euratom y F4E hasta 2021, aunque se espera que se reincorpore en 2026, tras negociaciones posteriores con la UE. ITER también mantiene acuerdos de cooperación técnica con Australia, Canadá, Kazajistán y Tailandia².

El proceso de diseño del proyecto ITER comenzó tras el lanzamiento de la idea en 1985, con una fase conceptual en 1988 y con la aprobación del diseño final en 2001, aunque la ingeniería detallada continuó, dando lugar al acuerdo formal para su construcción en 2007 y al inicio de las obras en 2013.

ITER ha experimentado múltiples retrasos en el calendario y aumentos de costes. Las proyecciones iniciales sugerían que la construcción se completaría en 2016, con los primeros experimentos en 2020, a un coste total de 10 000 millones de dólares americanos (ajustado por inflación).

En 2016, el calendario se amplió hasta 2025, con la entrada en funcionamiento completa prevista para 2035, añadiendo 5200 millones de dólares americanos adicionales (ajustados por inflación) al coste total. En julio de 2024, ITER anunció que la instalación no estaría operativa hasta 2039 y que supondrá un coste final de 22 000 millones de dólares americanos³.

La construcción de ITER y la entrega de componentes —como la instalación de los enormes imanes superconductores de niobio-estaño— subrayan tanto la magnitud tecnológica como los retos temporales del desarrollo de la fusión. A pesar de los reiterados ajustes en el calendario y los incrementos del presupuesto, el progreso de ITER genera información muy valiosa sobre la fabricación de componentes, el control de calidad, los problemas en la fase de ensamblaje, así como ha dado lugar a la formación de una incipiente cadena de suministro para la fusión.

En paralelo a ITER, programas regionales como EUROfusion en Europa⁴ coordinan la investigación y el diseño hacia un dispositivo posterior a ITER (a menudo denominado DEMO) que ejem-

² Ver: <https://www.iter.org/about/iter-members>

³ Ver: <https://www.congress.gov/crs-product/R48362>

⁴ Ver: <https://euro-fusion.org/>

plifique una planta de fusión capaz de producir electricidad. Estos programas van más allá de la ciencia pura del plasma e incluyen la ciencia de materiales, sistemas de mantos fértiles (*blankets*), ciclos de combustible de tritio y pruebas de componentes, todos ellos esenciales para reducir la distancia entre los dispositivos experimentales y las plantas industriales.

3.2 Validación de materiales y desarrollo de infraestructuras

Un obstáculo técnico fundamental sigue siendo el comportamiento de los materiales bajo intensa irradiación neutrónica y altos flujos térmicos. Los sistemas de energía de fusión producen espectros y flujos de neutrones no habituales en reactores de fisión ni en plantas convencionales, lo que convierte la cualificación de materiales en una prioridad internacional.

Una iniciativa estratégica en 2025 es el proyecto IFMIF-DONES en España⁵. Una fuente de neutrones de alto flujo basada en aceleradores, diseñada para ensayar materiales para plantas de fusión. España, la Comisión Europea y socios internacionales han comprometido cientos de millones de euros para su construcción y operación, reflejando el enfoque global en la preparación de materiales como requisito previo para disponer de una flota operativa de plantas de fusión.

3.3 Impulso y diversificación del sector privado

Históricamente, la investigación en fusión ha estado dominada por instituciones públicas y colaboraciones multilaterales como ITER. Sin embargo, en 2025, las empresas privadas de fusión han crecido en número, ambición y financiación. El informe de 2025 de la Fusion Industry Association⁶ indica que existen más de cincuenta compañías privadas en todo el mundo que desarrollan diversos conceptos de fusión, desde tokamaks compactos y configuraciones de campo invertido hasta sistemas de confinamiento alternativos y enfoques basados en láser.

Los datos de inversión muestran un aumento récord en la financiación de estas iniciativas privadas, con un crecimiento anual del 178 % respecto al año anterior y una inversión total cercana a los 10 000 millones de dólares americanos desde 2021.

⁵ Ver: <https://ifmif-dones.es/>

⁶ Ver: <https://www.fusionindustryassociation.org/fusion-industry-reports/>



Figura 4: Distribución de las start-ups de Fusión en 2025. Fuente: informe 2025 de la Fusión Industry Association[ASP1.1].12

Aunque los requisitos de capital siguen siendo elevados, esta afluencia de fondos privados demuestra tanto confianza en las perspectivas de la fusión como interés estratégico por parte de inversores comerciales e institucionales. Capital riesgo, inversores corporativos estratégicos y, cada vez más, fondos soberanos e institucionales están configurando el sector. Se observa un cambio de tendencia de la financiación especulativa inicial hacia rondas de inversión más grandes, fundamentadas en la evidencia de consecución de logros técnicos necesarios para el desarrollo de la fusión.

En la siguiente tabla se muestran las cinco *start-ups* de energía de fusión con mayor capitalización en 2025:

Empresa	Financiación total (aprox.)	Sede	Concepto / Tecnología	Prototipo / Proyecto principal	Principales inversores
Commonwealth Fusion Systems (CFS)	~3000 millones USD+	Devens, Massachusetts, EE. UU.	Tokamak de alto campo (imanes HTS)	SPARC y futura planta ARC	Breakthrough Energy Ventures; Eni; Google; Temasek
TAE Technologies	~1300 millones USD+	Foothill Ranch, California, EE. UU.	Configuración de campo invertido (FRC)	Copernicus / Da Vinci (planificado)	Google; Chevron; (Prefusión) Rusnano
Helion Energy	~1030 millones USD	Everett, Washington, EE. UU.	Fusión magneto-inercial / FRC	Prototipo Polaris	Sam Altman; Reid Hoffman; Peter Thiel's Mithril Capital Management
Pacific Fusion	~900 millones USD	Fremont, California, EE. UU.	Fusión inercial / pulsos electromagnéticos	Prototipo basado en pulsos electromagnéticos (impulso por hitos)	No divulgados en su totalidad/ basado en hitos (los principales inversores aún no se han publicado ampliamente)
SHINE Technologies	~778 millones USD	Janesville, Wisconsin, EE. UU.	Ensayos de neutrones y soporte isotópico	Instalaciones de prueba y producción de isótopos	Energy Ventures Group; Koch Disruptive Technologies; Nucleation Capital

Tabla 1. Resumen de las cinco *start-ups* de energía de fusión con mayor capitalización en 2025

Un ejemplo reciente es TAE Technologies, una compañía americana que desarrolla conceptos alternativos de fusión y que ha colaborado con la Autoridad de Energía Atómica del Reino Unido para comercializar tecnologías auxiliares como sistemas de haces neutros, con aplicaciones a más corto plazo en medicina e industria. En diciembre de 2025, TAE se fusionó con Trump Media & Technology Group en una transacción valorada en más de 6000 millones de dólares americanos⁷.

⁷ Ver: <https://tae.com/trump-media-and-technology-group-to-merge-with-tae-technologies/>

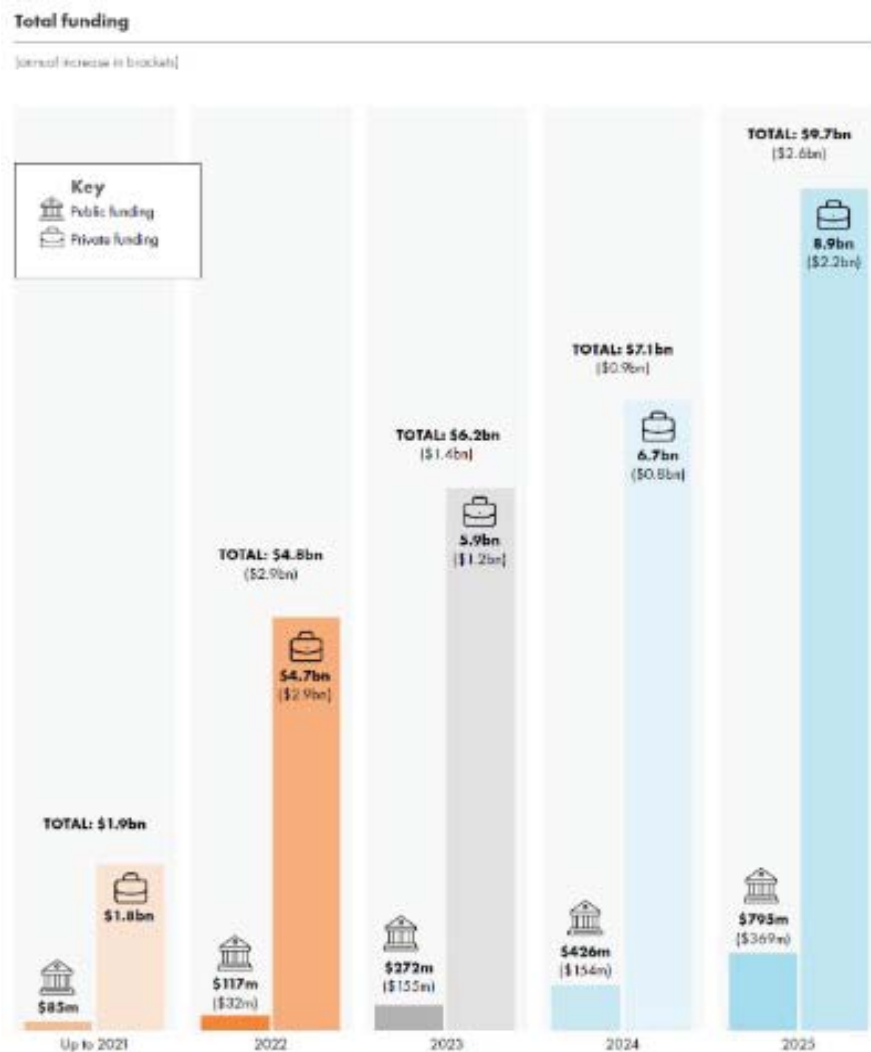


Figura 5: Fondos totales destinados al desarrollo de la fusión. Fuente: informe 2025 de la Fusion Industry Association[ASP2.1].12

3.4 Nivel de madurez tecnológica y retos pendientes

La fusión aún requiere desarrollos tecnológicos significativos. No se ha logrado la producción neta de electricidad ni la operación continua. Los ensayos de materiales, la integración del ciclo de combustible —en particular la producción y gestión del tritio— y la fabricación de componentes a un coste viable para la explotación comercial a gran escala siguen siendo desafíos clave.

La próxima década será decisiva para transformar la fusión en un sector industrial capaz de ofrecer soluciones energéticas reales.

La inteligencia artificial (IA) puede acelerar significativamente el desarrollo de la energía de fusión abordando algunos de los retos más complejos como son el manejo masivo de datos en múltiples aspectos del diseño y la operación de las plantas industriales.

Desde el control en tiempo real del plasma mediante aprendizaje por refuerzo y redes neuronales para gestionar activamente la forma, posición y estabilidad del mismo hasta alcanzar objetivos RAMI (fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad, inspeccionabilidad) en futuras plantas mediante la optimización del ciclo de combustible, la gestión del tritio y todas las operaciones asociadas al funcionamiento de estas instalaciones.

3.5 Plazos para la conexión a red

El desarrollo de la energía de fusión sigue múltiples líneas temporales en paralelo, determinadas en gran medida por el concepto de confinamiento elegido, el enfoque de desarrollo adoptado y el equilibrio entre el riesgo asociado a los límites de la física de plasmas y la complejidad de la ingeniería. Más que una única «fecha de la fusión», el sector se caracteriza por un conjunto de trayectorias con distintos perfiles de riesgo y retorno.

3.5.1 Programas públicos tipo DEMO (tokamaks basados en ITER)

Los programas públicos centrados en ITER y seguidos por máquinas DEMO representan la vía más conservadora y validada desde el punto de vista de la física. Estas iniciativas priorizan la demostración completa del comportamiento del plasma, la producción de tritio, la cualificación de materiales y la aceptación regulatoria antes de la conexión a la red.

- Fortalezas: alta confianza en la física, sólida gobernanza internacional, credibilidad regulatoria.
- Limitaciones: cronogramas largos, difícil integración de innovaciones, coordinación internacional compleja, máquinas de gran tamaño, altamente intensivos en capital.
- Conexión indicativa a red: ~2045-2050.

3.5.2 Start-ups basadas en tokamaks con imanes superconductores de alto campo y alta temperatura (p. ej., CFS, Tokamak Energy)

Las *start-ups* de tokamak con imanes superconductores de alto campo y alta temperatura aprovechan los avances en superconductores de alta temperatura (HTS) para reducir significativamente el tamaño de las máquinas y acelerar los ciclos de

iteración. Estas empresas buscan tender puentes entre el conocimiento científico presente en la esfera pública y el foco en el producto final propio del sector privado, mitigando riesgos clave en la física que rige el funcionamiento de los dispositivos mientras comprimen los plazos de ingeniería.

- Fortalezas: base física sólida, iteración más rápida que las máquinas del tamaño de ITER, máquinas más pequeñas, enfoque ágil.
- Limitaciones: vida útil de materiales, sistemas de tritio, integración.
- Conexión indicativa a red: ~2035.

3.5.3 Conceptos basados en configuración de campo invertido (*Field-Reversed Configuration, FRC*) (p. ej., *Helion, TAE*)

Los conceptos basados en FRC se basan en diseños compactos, pulsados y, a menudo, semianeutrónicos, en ocasiones evitando los ciclos de vapor mediante conversión directa de energía. Estos enfoques priorizan la velocidad y la simplicidad, aceptando un mayor riesgo en la física que gobierna las distintas configuraciones del plasma.

- Fortalezas: potencialmente una vía más rápida, máquinas más pequeñas, menor coste de capital.
- Limitaciones: estabilidad del plasma, frecuencia de repetición y electricidad neta aún no demostradas.
- Conexión indicativa a red: ~2031-2033.

3.5.4 Start-ups basadas en stellarator (p. ej., *Proxima Fusion*)

Los conceptos avanzados de stellarator buscan explotar configuraciones de plasma intrínsecamente estables aplicando técnicas de diseño computacional moderno y fabricación avanzada. Aunque la física en estos conceptos está bien establecida, la complejidad en el ámbito de la ingeniería sigue siendo elevada.

- Fortalezas: estabilidad intrínseca del plasma, operación en régimen estacionario.
- Limitaciones: complejidad de fabricación, experiencia operativa limitada a gran escala, conceptos menos maduros que los tokamaks.
- Conexión indicativa a red: ~2037.

3.5.5 Energía de fusión inercial (IFE) (p. ej., Xcimer Energy)

La energía de fusión inercial se basa en los avances conseguidos en el Laboratorio Nacional de Fusión de Lawrence Livermore hasta la fecha. Sin embargo, este concepto aún enfrenta desafíos en la frecuencia de repetición de los pulsos, la fabricación de los «pellets de combustible» y la eficiencia energética. Aunque científicamente prometedora, en esta línea aún existen brechas en la ingeniería de los dispositivos que hay que construir para poder operar plantas de energía utilizando esta tecnología.

- Fortalezas: alta densidad de potencia, diseño muy modular.
- Limitaciones: escalabilidad industrial, coste e integración del sistema.
- Conexión indicativa a red: ~2040-

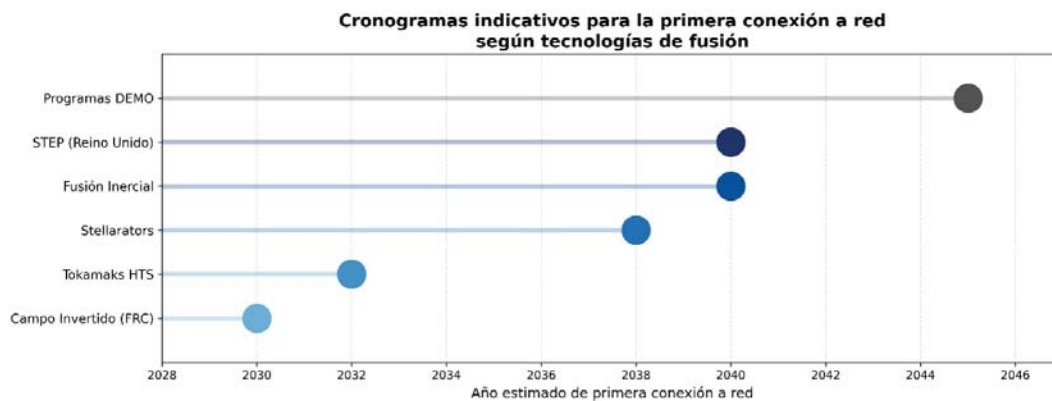


Figura 6: Plazos indicativos para la primera conexión a red de las principales líneas de desarrollo de energía de fusión

4 Un elemento clave para la implantación de la energía de fusión: la regulación

A medida que la energía de fusión progresa desde la fase de prototipos hacia las primeras plantas de carácter comercial, la regulación emerge como uno de los factores no técnicos más determinantes para su éxito. El marco regulatorio que gobierne la fusión moldeará no solo los resultados en materia de seguridad, sino también las decisiones de inversión, la ubicación de las instalaciones, el ritmo de implantación de esta tecnología y la competitividad industrial a largo plazo.

Se están diseñando instalaciones destinadas a conectarse a la red, abastecer mercados eléctricos y operar en condiciones

comerciales. Estos sistemas deben ser autorizados, asegurados, financiados y aceptados por la sociedad. En este contexto, la regulación debe lograr un equilibrio entre garantizar la protección de los trabajadores, del público y del medio ambiente, a la vez que mantiene una proporcionalidad con el perfil real de riesgo de las tecnologías de fusión.

La historia demuestra que la desalineación regulatoria puede retrasar significativamente las transiciones energéticas. Marcos excesivamente conservadores aumentan los costes, prolongan los plazos y desincentivan el capital privado. Por el contrario, una regulación clara, predecible y basada en un mayor conocimiento de los riesgos puede acelerar el aprendizaje fundamentado en la práctica, fomentar la innovación y consolidar nuevos ecosistemas industriales. Para la energía de fusión —donde múltiples líneas tecnológicas avanzan en paralelo—, la claridad regulatoria es ahora una necesidad estratégica, no una preocupación futura.

4.1 Diferencias fundamentales entre fusión y fisión

La necesidad de adoptar un enfoque regulatorio diferenciado para la fusión se sustenta en diferencias físicas y operativas fundamentales entre los sistemas de fusión y los de fisión nuclear.

En los reactores de fisión se producen reacciones en cadena controladas, que requieren sistemas de ingeniería complejos para gestionar la reactividad, el calor residual y los escenarios de accidente. Las reacciones de fusión, en cambio, son intrínsecamente autolimitadas. El proceso de fusión cesa inmediatamente si no se mantienen condiciones precisas de plasma, eliminando la posibilidad de reacciones descontroladas. No existe posibilidad de reacción en cadena.

Las plantas de fisión contienen grandes inventarios de material fisible que deben ser salvaguardados durante décadas. Los sistemas de fusión operan con cantidades muy pequeñas de combustible, principalmente deuterio y tritio. El tritio presenta riesgos radiológicos y ambientales, pero no implica los mismos riesgos de proliferación ni de seguridad a largo plazo que los materiales fisibles. Por ejemplo, la vida media del tritio es de 12,32 años.

La fisión produce residuos radiactivos de alta actividad que requieren aislamiento durante milenios. La fusión no genera productos de fisión; sus residuos consisten principalmente en materiales

activados por neutrones, muchos de los cuales decaen a residuos de baja actividad en cuestión de décadas. Esta diferencia tiene implicaciones importantes para la clasificación de residuos, las vías de eliminación y las responsabilidades a largo plazo.

Los escenarios de accidente creíbles en fusión se limitan a liberaciones localizadas de tritio o polvo activado en lugar de emisiones radiológicas masivas fuera del emplazamiento. Como resultado, los requisitos de planificación de emergencias para instalaciones de fusión son radicalmente distintos de los de los reactores de fisión.

4.2 Por qué la regulación de la fusión debe ser específica

Dado el perfil de riesgo distintivo de la fusión, la regulación debería centrarse en la supervisión basada en los peligros existentes, más que en licencias otorgadas basadas en las características del reactor. Los principales aspectos regulatorios que tener en cuenta son los siguientes:

- Gestión de materiales radiactivos (especialmente tritio)
- Protección radiológica ocupacional
- Emisiones ambientales
- Seguridad industrial convencional

Con este enfoque, la regulación de la fusión se asemeja más a la aplicada a aceleradores de partículas e instalaciones de investigación que a la propia de los reactores nucleares.

Las tecnologías de fusión madurarán conforme se construyen prototipos cada vez más integrados, por lo que la regulación debe ser adaptativa, permitiendo que las lecciones aprendidas en instalaciones iniciales sirvan como base para diseños más avanzados. Normativas excesivamente prescriptivas en las fases iniciales corren el riesgo de fijar prematuramente los diseños e incrementar los costes sin aportar beneficios reales en materia de seguridad.

La inversión privada desempeña ahora un papel central en el desarrollo de la fusión. La incertidumbre regulatoria se traduce directamente en mayores costes de financiación. Vías claras de autorización, plazos definidos y estabilidad regulatoria son esenciales para movilizar el capital necesario para la implantación de la energía fusión.

4.3 Impacto de los marcos regulatorios en la implantación de tecnologías de fusión

Los marcos regulatorios funcionan cada vez más como herramientas de política industrial. Una regulación proporcional permite licencias más rápidas, conexión temprana a la red y un aprendizaje más rápido, mientras que una regulación excesivamente conservadora retrasa proyectos, aumenta costes e incentiva a las empresas a establecerse en jurisdicciones más favorables. El liderazgo regulatorio en fases iniciales permite a los países moldear normas y estándares internacionales, reforzando la competitividad a largo plazo.

Los países que se adelanten en establecer una regulación adecuada para la fusión tienen más probabilidades de atraer instalaciones, inversión en cadenas de suministro y talento especializado: ingredientes clave para una futura industria de fusión. Esto se refleja en la distribución emergente de la industria, con Estados Unidos como líder.

4.4 Estado de la regulación de la fusión en jurisdicciones clave

Estados Unidos

Estados Unidos ha dado los pasos más explícitos para definir un marco regulatorio específico para la fusión. Las instalaciones de fusión se regulan bajo un régimen de materiales (*byproduct materials*), en lugar de ser tratadas como reactores de fisión nuclear.

Elementos clave:

- 2009: la NRC (Nuclear Regulatory Commission) confirma su jurisdicción sobre la fusión.
- 2019-2022: reforma legislativa vía NEIMA (*Nuclear Energy Innovation and Modernization Act*).
- 2023: decisión de la NRC de regular la fusión bajo 10 CFR parte 30 (*Rules of General Applicability to Domestic Licensing of Byproduct Material*).
- 2024: el *ADVANCE Act* codifica la fusión como aceleradores de partículas en la ley federal.

Este marco permite la obtención de licencias de una forma más rápida manteniendo la seguridad y la protección ambiental.

Reino Unido

Reino Unido ha adoptado uno de los enfoques más proactivos y explícitos del mundo para desarrollar un régimen regulatorio que sea proporcional al perfil real de riesgo de la energía de fusión, evite obstáculos innecesarios y proporcione claridad y confianza tanto a proyectos públicos como privados.

Esta estrategia regulatoria está ahora incorporada en la legislación, respaldada por consultas formales e integrada en los planes energéticos nacionales. Esta combinación otorga a Reino Unido una ventaja sólida por ser el primero en posicionarse respecto a una regulación que permita el desarrollo de estas tecnologías. Este enfoque respalda iniciativas nacionales como el tokamak STEP y posiciona al país como un centro global de fusión.

Una de las innovaciones regulatorias más destacadas de Reino Unido es la exclusión explícita de las instalaciones de fusión del régimen tradicional de licencias nucleares bajo la *Nuclear Installations Act* de 1965. El Gobierno británico ha legislado para garantizar que las instalaciones de fusión no se regulen automáticamente como «instalaciones nucleares», ya que su perfil de riesgo es muy diferente al de los reactores de fisión. Este cambio legal proporciona una claridad y proporcionalidad esenciales para hacer de Reino Unido una jurisdicción que atraiga *start-ups* de todo el mundo a instalarse allí.

Las instalaciones de energía de fusión no requieren una licencia de emplazamiento nuclear bajo la *Nuclear Installations Act*. Por lo tanto, no están reguladas por la Office for Nuclear Regulation (ONR) como sí lo están los reactores de fisión. En su lugar, las instalaciones de fusión seguirán siendo reguladas principalmente por la Environment Agency (EA) y la Health and Safety Executive (HSE).

Unión Europea

En materia de política y desarrollo regulatorio, la Unión Europea está trabajando hacia una estrategia específica para la fusión que podría conducir a un entorno regulatorio más estructurado en 2026, reflejando el creciente reconocimiento del papel potencial de la fusión en el futuro *mix* energético. Los actores implicados —incluidos responsables políticos y grupos industriales— han solicitado principios regulatorios más claros y armonizados que distingan la fusión de la regulación nuclear de fisión para ofrecer certeza a inversores y empresas desarrolladoras. El Parlamento Europeo y la Comisión están participando en consultas y plani-

ficando la integración de la fusión en marcos industriales y de neutralidad climática más amplios (por ejemplo, debates sobre su categorización en la *Net Zero Industry Act*), pero las normas detalladas de licenciamiento para instalaciones comerciales de fusión siguen en fases iniciales de desarrollo o discusión, más que plenamente codificadas en toda la UE.

En resumen, la regulación de la fusión en la UE está evolucionando desde la gobernanza de la investigación básica hacia iniciativas políticas emergentes orientadas a habilitar la futura comercialización, pero aún no existe un régimen regulatorio específico y completo para plantas de energía de fusión; se prevé como parte de la próxima estrategia y planificación legislativa de la UE.

Estados nórdicos (Finlandia, Suecia, Dinamarca y Noruega)

Finlandia se sitúa a la vanguardia del desarrollo regulatorio para la fusión en los países nórdicos, impulsada por su plan de reforma integral de la legislación nuclear y el tratamiento claro de la fusión bajo la normativa de radiación.

En junio de 2025, el Gobierno finlandés envió a consulta pública un borrador de revisión de la ley de energía nuclear. La propuesta representa una reforma sustancial de una ley que llevaba más de 35 años en vigor y había sido modificada repetidamente. La investigación en fusión y el uso experimental de reactores de fusión no quedarían bajo la ley de energía nuclear que regula las instalaciones de fisión; en su lugar, estas actividades se regularían bajo la ley de radiación. Esta distinción refleja en la norma regulatoria que el perfil de riesgo y las necesidades operativas de la fusión difieren de las de los reactores nucleares convencionales.

La Autoridad de Seguridad Radiológica y Nuclear (STUK) será la autoridad competente para las actividades reguladas bajo la ley de radiación, mientras que las instalaciones que impliquen reacciones de fisión seguirán reguladas bajo la ley de instalaciones nucleares. El borrador separa las decisiones sobre residuos radiactivos y salvaguardias de las cuestiones técnicas de seguridad, permitiendo licencias modulares y una gobernanza más clara. La ley revisada está programada para entrar en vigor el 1 de enero de 2027, si es aprobada.

Suecia se identifica como el siguiente país en nivel de preparación. Su legislación nuclear existente ya incluye explícitamente las máquinas de fusión, pero esas normas están basadas en

requisitos regulatorios de la fisión. Esto significa que las reglas suecas pueden aplicarse a la fusión, pero los proyectos que decidirán iniciarse en Suecia podrían tener que sortear condiciones centradas en la fisión que no están optimizadas para el perfil de riesgo propio de la fusión, creando cargas adicionales que no aportan ningún valor añadido.

Tanto Dinamarca como Noruega tienen marcos regulatorios nucleares más antiguos que no mencionan específicamente la energía de fusión. Esto genera incertidumbre política y procedimental para los proyectos de fusión, ya que la ausencia de referencias explícitas puede retrasar la claridad en las vías de licenciamiento. Ninguno de los dos países ha adoptado aún lenguaje legal específico para la fusión ni estrategias que hagan su entorno jurídico particularmente atractivo para el desarrollo de esta tecnología⁸.

Japón

La estructura legal relacionada con la energía nuclear en Japón se construyó en torno a la fisión: licencias de reactores, controles de materiales nucleares y regulación de emplazamientos. La consecuencia más importante para la fusión es definicional: los dispositivos de fusión no son «reactores» según el significado legal utilizado para la regulación de fisión, por lo que el principal estatuto centrado en la fisión (la ley de regulación de reactores dentro de la estructura de la ley básica de energía atómica) no se aplica automáticamente a las instalaciones de fusión. El resultado práctico es que las máquinas de fusión japonesas se han gestionado bajo la categoría de dispositivos generadores de radiación/radioisótopos, en lugar del de «reactor» de fisión.

Los dispositivos de fusión en Japón (especialmente las máquinas a escala de investigación donde no suele usarse tritio) se han regulado típicamente bajo la normativa que gobierna radioisótopos y equipos generadores de radiación. Por ejemplo, el JT-60SA, el tokamak operativo más grande del mundo, pero sin tritio, se ha regulado como dispositivo generador de plasma bajo el marco de radioisótopos/radiación.

Según la ley vigente, los dispositivos de fusión pueden regularse como equipos generadores de radiación, pero el marco actual

⁸ *Framework of siting criteria and initial assessment for siting the Novatron 3 facility in Nordic region*, disponible en: <https://static1.squarespace.com/static/634d70f7acf00f3d7942848e/t/68f5cc3af2297812c492e052/1760939066885/VTT+report.pdf>

presenta limitaciones para ciclos de combustible orientados a la comercialización, especialmente por la presencia de tritio. El uso de tritio como combustible requeriría cambios o actualizaciones para que los generadores de plasma alimentados con tritio puedan ser regulados adecuadamente.

El regulador nuclear japonés (NRA) ha sido cada vez más explícito en que está siguiendo las tendencias tecnológicas emergentes, incluida la I+D en fusión, como parte de su trabajo prospectivo sobre regulación para la prevención de riesgos radiológicos.

China

El avance regulatorio más reciente en China es un aviso del Ministerio de Ecología y Medio Ambiente (MEE) titulado «Aviso sobre cuestiones relativas a la gestión de la seguridad radiológica de dispositivos de fusión», fechado en abril de 2025. La estructura institucional china sitúa la regulación de la seguridad nuclear y radiológica bajo el MEE, incluyendo las funciones de la administración nacional de seguridad nuclear. El aviso de 2025 asigna explícitamente al MEE la responsabilidad de los permisos de seguridad radiológica e indica que las estaciones regionales de supervisión realizan la inspección y supervisión diaria.

El aviso de 2025 declara efectivamente que los dispositivos de fusión están dentro del alcance del sistema regulatorio de seguridad radiológica, proporcionando una clasificación específica para la fusión y una vía administrativa para permisos y evaluaciones de impacto ambiental.

El marco chino para la fusión avanza hacia una regulación graduada basada en una clasificación (un enfoque habitual en la gestión de dispositivos radiológicos en China). El aviso y las presentaciones asociadas describen que los dispositivos de fusión se agrupan en tres categorías: dispositivos experimentales de física de plasma, dispositivos experimentales de fusión de deuterio-tritio y dispositivos con aplicación energética basados en fusión, que luego se gestionarían según el riesgo asociado a cada una de estas categorías y su correspondiente tratamiento regulatorio.

Esto resulta especialmente relevante, ya que se apoya en el principio de proporcionalidad. Es en los experimentos con combustible deuterio-tritio (D-T) y en los dispositivos con aplicación energética donde aparecen inventarios significativos de tritio, materiales activados e interfaces industriales, que constituyen los principales factores de riesgo desde el punto de vista de la

seguridad. En este contexto, la aplicación de un marco normativo uniforme que no incorpore la proporcionalidad podría, por un lado, imponer cargas regulatorias excesivas a dispositivos experimentales de bajo riesgo y, por otro, resultar insuficiente para abordar adecuadamente los requisitos de seguridad de sistemas con perfiles de riesgo más elevados.

El mensaje transmitido en el aviso de 2025 subraya que la fusión no encaja en los esquemas tradicionales de supervisión aplicables a los reactores de fisión y que el regulador está avanzando hacia un marco regulatorio específico para la fusión, basado en la evidencia científica y en el desarrollo de un sistema propio de estándares regulatorios.

Dimensión	Fisión nuclear	Fusión
Comportamiento de la reacción	Reacción en cadena autosostenida	Autolimitada
Inventario de combustible	Grandes inventarios de material fisibles	Pequeñas cantidades (D-T)
Riesgo de proliferación	Alto	Muy bajo
Tipo de residuos	Alta actividad, larga vida	Materiales activados, vida corta
Potencial de accidente	Consecuencias masivas fuera del emplazamiento	Localizadas, limitadas
Planificación de emergencias	Extensa	Limitada, específica del sitio
Regulación adecuada	Licencias basadas en el reactor	Supervisión basada en peligros

Tabla 2. Fusión vs fisión. Diferencias relevantes para la regulación

País/Región	Enfoque regulatorio	Estado
Estados Unidos	Materiales (<i>Byproduct material</i>)/ acelerador	Definido, codificado
Reino Unido	Proporcional, específico para fusión	Definido, en evolución
Unión Europea	Enfoques a nivel nacional	Fragmentado
Finlandia	Proporcional, específico para fusión	En progreso
Japón	Marco nuclear adaptado	Adaptación gradual
China	Proporcional, específico para fusión	En progreso. Centralizado, liderado por el Estado

Tabla 3. Estado de la regulación de la fusión por país (2025)

5 Tecnologías habilitadoras de la fusión: el papel clave de la inteligencia artificial, la computación de alto rendimiento y la computación cuántica

La física y la ingeniería de la fusión presentan una complejidad extraordinaria: plasmas a cientos de millones de grados deben generarse, confinarse y mantenerse estables en el tiempo y los materiales deben soportar cargas intensas de calor, además del impacto de neutrones. Para que la energía de fusión sea viable de forma comercial, los dispositivos de fusión deben operar de forma fiable como plantas de energía industrial. Cada aspecto de este desafío implica física multiescala, no lineal y de alta dimensionalidad, muy por encima del alcance de la intuición humana o de la experimentación tradicional por sí sola.

Los dispositivos de fusión involucran fenómenos fuertemente acoplados y no lineales que abarcan órdenes de magnitud en espacio y tiempo: plasmas turbulentos, imanes superconductores, materiales irradiados por neutrones, ciclos de combustible con tritio, sistemas de conversión de energía y la necesidad de control en tiempo real.

Históricamente, el progreso en fusión ha estado limitado por la velocidad de iteración experimental. Las decisiones de diseño se validaban construyendo máquinas, operándolas durante años, aprendiendo de los fallos y luego construyendo la siguiente generación. Este enfoque no es compatible con los plazos requeridos para la implantación industrial de la energía de fusión que se demanda por parte de la sociedad en la primera parte del siglo XXI.

Por ello, la integración de inteligencia artificial (IA), computación de alto rendimiento (HPC) y la emergente computación cuántica como herramientas fundamentales en el desarrollo de fusión supone un cambio radical. Estas tecnologías permiten pasar de un paradigma limitado por la construcción de equipos a una disciplina de ingeniería acelerada por computación, comprimiendo décadas de aprendizaje en pocos años.

5.1 Computación de alto rendimiento y marcos integrados de simulación

La simulación predictiva de plasmas de fusión requiere resolver ecuaciones cinéticas y magnetohidrodinámicas no lineales a

través de enormes separaciones de escala (Jenko *et al.*, 2000; Chang *et al.*, 2017; Birdsell *et al.*, 2019). La iteración experimental tradicional no puede igualar la amplitud del espacio de parámetros que los modelos HPC pueden explorar. La capacidad de computación a nivel exaescala se reconoce ahora como requisito para modelar el transporte turbulento, el acoplamiento borde-núcleo y los efectos electromagnéticos con una fidelidad cercana a las condiciones experimentales (Birdsell *et al.*, 2019).

Una colaboración reciente entre Commonwealth Fusion Systems (CFS), NVIDIA y Siemens demuestra cómo las bibliotecas modernas de simulación habilitadas por IA y las herramientas de ingeniería digital pueden acortar aún más los ciclos de diseño en fusión.

Según CFS, la combinación de los SDK de IA y simulación de NVIDIA (como cuQuantum, cuFFT, cuBLAS y TensorRT) con las herramientas de gemelo digital Xcelerator de Siemens permiten que *solvers* de física de plasma acelerados por GPU que aprovechan miles de núcleos permitan reducir meses de tiempo de simulación; modelos subrogados asistidos por IA, que reemplazan núcleos numéricos costosos por aproximaciones aprendidas sin pérdida significativa de fidelidad, y flujos de trabajo integrales de ingeniería digital, que conectan simulaciones de plasma con análisis estructurales y electromagnéticos directamente.

Al aprovechar baterías de simulación aceleradas por GPU, CFS ha mostrado mejoras de velocidad de varios órdenes de magnitud frente a flujos de trabajo basados solo en CPU, lo que permite más iteraciones de diseño en el mismo tiempo y mejora la fidelidad de las predicciones del rendimiento integral de la planta (incluyendo imanes, cargas estructurales y comportamiento integrado del plasma)⁹.

5.2 Inteligencia artificial: del control a la optimización del diseño

La IA está ahora integrada en toda la cadena de innovación en fusión, no solo en proyectos aislados.

IA para el control del plasma

Métodos como el aprendizaje por refuerzo profundo han demostrado en investigaciones académicas superar a los controladores

⁹ Ver: <https://blog.cfs.energy/how-nvidia-ai-and-simulation-libraries-and-siemens-tools-can-accelerate-fusion-energy/>

clásicos en el mantenimiento de la forma del plasma y la supresión de inestabilidades (Degrave *et al.*, 2022; Kates-Harbeck, Svyatkovskiy y Tang, 2019). Estos métodos son viables a escala de planta industrial solo si se integran en marcos computacionales que puedan entrenarse con datos simulados y luego generalizar a nuevas condiciones operativas.

La IA se utiliza para:

- Predecir elementos precursores de interrupciones en el plasma, evitando la parada súbita de las operaciones de la máquina de fusión.
- Optimizar estrategias de control en tiempo real de las bobinas magnéticas mediante modelos entrenados con datos simulados y experimentales.
- Informar a los sistemas de control donde los bucles de retroalimentación ajustados manualmente son impracticables.

Estos recursos son esenciales, ya que la prevención de interrupciones y el control activo de la estabilidad influyen directamente en la disponibilidad de la instalación, un factor crítico para la viabilidad comercial de las plantas de energía de fusión (Degrave *et al.*, 2022; Van Milligen *et al.*, 2022).

Diseños acelerados asistidos por IA y modelos subrogados

La IA también potencia de forma decisiva la capacidad de generar diseños de prototipos de plantas de fusión de manera mucho más rápida. Las redes neuronales actúan como modelos sustitutos de física, capturando dependencias complejas (por ejemplo, coeficientes de transporte turbulento, márgenes de estabilidad) a una fracción del coste computacional de los *solvers* completos (Bishop, 2006; Sánchez *et al.*, 2019).

Estas herramientas se pueden integrar en el entorno de gemelo digital permitiendo una valoración más rápida de posibles diseños, la optimización multiobjetivo para rendimiento y el coste y la viabilidad de fabricación, así como la exploración de conceptos de diseño no convencionales que resultarían inviables de ensayar físicamente.

Los modelos subrogados entrenados con conjuntos de datos generados por HPC y almacenados para evaluación en tiempo real permiten bucles de diseño iterativos que hacen posible que lo que antes tomaba meses hoy en día se puedan simular en días u horas.

Ejemplos:

El concepto de máquina de fusión propuesto por la *start-up* Type One Energy se basa en décadas de investigación en optimización de stellarators, donde el confinamiento y la estabilidad del plasma necesarias solo se pueden alcanzar mediante optimización numérica a gran escala de configuraciones magnéticas tridimensionales (Hirshman y Whitson, 1983; Landreman y Paul, 2022; Helander *et al.*, 2012). Sin la computación de alto rendimiento moderna (HPC), el desarrollo comercial de los stellarators sería inviable.

La *start-up* Thea Energy explora configuraciones magnéticas y regímenes operativos para las configuraciones de plasma de su stellarator que requerirían campañas experimentales excesivamente largas, con lo que la presencia de estas nuevas herramientas es fundamental para la viabilidad comercial de este proyecto.

Proxima Fusion es parte del proyecto AI for Fusion Engineering (respaldado por el Ministerio Federal de Educación e Investigación de Alemania en colaboración con Forschungszentrum Jülich, la Universidad Técnica de Munich y la Universidad de Bonn). Este proyecto se basa en el uso de *machine learning* geométrico y *deep learning* para abordar problemas complejos de geometría típicos en el diseño de stellarators, aprendiendo a predecir y optimizar el comportamiento del plasma y la calidad del campo mucho más rápido de lo que permiten por sí solos los métodos numéricos existentes.

5.3 IA aplicada a materiales y componentes para fusión

Los materiales que se usen en una máquina de fusión van a estar expuestos a alta fluencia de neutrones, cargas térmicas extremas y tensiones mecánicas simultáneamente.

La IA se utiliza en este campo para acelerar el descubrimiento de nuevas aleaciones que puedan soportar estas condiciones, así como predecir su vida útil. Esto se consigue aprendiendo de respuestas no lineales y complejas bajo condiciones de irradiación y gradientes térmicos. Diversos estudios han demostrado que la selección asistida por inteligencia artificial puede acotar el rango de posibles variantes para el diseño de un material en varios órdenes de magnitud en comparación con los métodos tradicionales de prueba y error (Butler *et al.*, 2018).

5.4 Gemelos digitales: aprendizaje continuo mediante datos y simulación

Los gemelos digitales representan una síntesis de HPC, IA y herramientas de simulación industrial. En fusión, los gemelos digitales adquieren datos provenientes de los diagnósticos instalados en la máquina de fusión en tiempo real, los comparan con modelos físicos y predicen estados futuros del sistema.

Estudios científicos sobre gemelos digitales aplicados a la fusión demuestran que estos sistemas pueden anticipar interrupciones antes de que se produzcan, evaluar en tiempo real múltiples trayectorias de control y proporcionar a los operadores información accionable sobre el estado operativo y el rendimiento de la instalación (Pankin *et al.*, 2019; Rea *et al.*, 2018).

Por ejemplo, el entorno de ingeniería digital mencionado anteriormente, creado por Siemens y utilizado por CFS, extiende estas ideas al contexto industrial, donde los gemelos digitales son herramientas operativas centrales para plantas piloto y futuras plantas comerciales. Al vincular simuladores de plasma, análisis estructural y modelos de control en un único prototipo virtual, el flujo de trabajo garantiza que las decisiones de diseño consideren todo el contexto físico y de ingeniería, reduciendo el riesgo durante la construcción y puesta en marcha de la planta¹⁰.

5.5 Computación cuántica como tecnología habilitadora emergente

Incluso cuando la IA y la HPC impulsan la agenda de fusión a corto plazo, la computación cuántica se perfila como una tecnología de horizonte largo para problemas que escalan de forma combinatoria o implican química cuántica compleja.

Entre los ámbitos en los que los métodos cuánticos podrían superar a los enfoques clásicos se incluyen: modelado de materiales y cálculos de interacción plasma-superficie con fidelidad cuántica completa, así como problemas de optimización con espacios de búsqueda exponencialmente grandes (Preskill, 2018; McArdle *et al.*, 2020).

¹⁰ Ver: <https://blog.cfs.energy/how-nvidia-ai-and-simulation-libraries-and-siemens-tools-can-accelerate-fusion-energy/>

En la práctica, se espera que la computación cuántica se integre mediante flujos de trabajo híbridos cuántico-clásicos, donde subrutinas cuánticas aceleren núcleos (*kernels*) específicos dentro de mayor flujo de trabajo de HPC+IA. Aunque la ventaja cuántica práctica en fusión sigue siendo una frontera abierta de investigación, la implicación de fases iniciales facilitará que la I+D en fusión pueda hacer uso de estas nuevas herramientas en cuanto estén disponibles.

5.6 Tecnologías computacionales como catalizadores del desarrollo de la fusión

El impacto integrado de la IA, la HPC y las herramientas de simulación permite:

- La aceleración del diseño: la exploración digital reemplaza secuencias experimentales más lentas y costosas, permitiendo una convergencia más rápida hacia configuraciones viables de plantas de fusión.
- La mitigación de riesgos: los modelos predictivos identifican modos de fallo en fases iniciales del diseño, reduciendo así los costes que estos podrían haber supuesto de no ser eliminados.
- La fiabilidad operativa: el control basado en IA y los gemelos digitales mejoran la disponibilidad de la planta, prolongan la vida útil de los componentes y controlan su degradación.
- Un uso más eficiente del capital: menos prototipos físicos y experimentos mejor diseñados reducen sustancialmente el tiempo empleado y el coste asociado al desarrollo de una planta de fusión.

6 Dinámicas globales de poder en el desarrollo de la fusión

La energía de fusión ha dejado de concebirse exclusivamente como un proyecto científico de largo plazo para situarse en el terreno de la competencia tecnológica y estratégica, donde la innovación y la capacidad industrial desempeñan un papel central. Aunque todavía no existen centrales comerciales de fusión en operación, la magnitud, la estructura y la orientación de las inversiones evidencian que las principales potencias consideran cada vez más su desarrollo como un elemento clave de la futura fortaleza económica, la seguridad energética y la soberanía tecnológica. En este contexto, la fusión comienza a debatirse junto

con los semiconductores, la inteligencia artificial y la fabricación avanzada como una tecnología con efectos indirectos de amplio alcance.

A diferencia de transiciones energéticas anteriores, el desarrollo de la fusión se produce en un periodo de rivalidad geopolítica sistémica. Los Gobiernos ya no financian la fusión únicamente como un esfuerzo científico orientado al bien público; la integran en estrategias industriales nacionales, doctrinas de seguridad y agendas de competitividad a largo plazo. Como resultado, el panorama de la fusión refleja políticas económicas divergentes: proyectos impulsados por el mercado en Estados Unidos, planificación estatal coordinada en China, gobernanza científica pero fragmentada en Europa y posicionamiento en la cadena de suministro en países con tradición en la fabricación industrial avanzada como Japón y Corea del Sur.

Este subcapítulo describe la fusión desde la óptica del poder y la captura de valor, centrándose no en quién logra la fusión primero, sino en quién controla los ecosistemas industriales, la propiedad intelectual, las cadenas de suministro y los estándares que determinarán la ventaja geopolítica a largo plazo cuando la fusión alcance la madurez comercial.

6.1 Estados Unidos: la fusión como vector de competitividad industrial y estratégica

Estados Unidos ha adoptado un modelo para el desarrollo de la fusión que combina la asunción de riesgos por parte del Gobierno federal con la ejecución en el sector privado. La financiación pública, principalmente a través del Departamento de Energía (DOE), respalda la ciencia fundamental del plasma, la investigación en materiales y las tecnologías habilitadoras, mientras que las empresas privadas impulsan el diseño de sistemas, la construcción y la comercialización.

En 2022, el programa Fusion Energy Sciences (FES) del DOE, históricamente centrado en la ciencia del plasma, fue reorientado a *fusion science and technology* para incluir aspectos tecnológicos como el diseño de plantas piloto, la relevancia para la red eléctrica y la preparación de la cadena de suministro. El gasto federal anual en fusión se sitúa actualmente en torno a 800-900 millones de dólares estadounidenses, distribuidos entre oficinas del DOE, incluyendo FES, ARPA-E y programas de fusión inercial en la Administración Nacional de Seguridad Nuclear. Si se incluyen

infraestructuras auxiliares, computación de alto rendimiento y programas de materiales, la inversión pública efectiva supera los 1200 millones de dólares al año.

Este apoyo público ha catalizado la entrada de capital privado en fusión. Desde 2018, las *start-ups* estadounidenses —como Commonwealth Fusion Systems, Helion Energy, TAE Technologies y Zap Energy— han recaudado de forma conjunta entre 6000 y 7 000 millones de dólares en financiación privada. Estas inversiones no son meramente especulativas; se estructuran en torno a logros en la manufactura de componentes clave, acuerdos de compra de energía y, en algunos casos, aplicaciones vinculadas a defensa. La misión Genesis, anunciada en 2023¹¹, enmarcó la fusión como prioridad estratégica a corto plazo y sirvió como señal a los mercados de que la fusión se sitúa, junto con la IA, los semiconductores y la fabricación avanzada, como elemento clave en la competencia estratégica de EE. UU. Cabe destacar que la necesidad de fuentes de energía para alimentar la IA, la computación cuántica y los sistemas autónomos se menciona explícitamente en el documento de estrategia de seguridad nacional publicado en noviembre de 2025:

«Estados Unidos debe invertir simultáneamente en investigación para preservar y avanzar nuestra ventaja en tecnologías militares y de doble uso, con énfasis en las áreas donde nuestras ventajas son más sólidas. Estos incluyen el ámbito submarino, el espacio y el nuclear, así como otros que decidirán el futuro del poder militar, como la IA, la computación cuántica y los sistemas autónomos, además de la energía necesaria para impulsar estas áreas»¹².

La energía de fusión se integra de forma creciente en las narrativas estadounidenses sobre competencia estratégica, en particular en comparación con China. Informes del Congreso y de estrategias del Poder Ejecutivo vinculan el desarrollo de la fusión a prioridades más amplias como la inteligencia artificial, la fabricación avanzada, la autonomía energética y la seguridad nacional. En este marco, la fusión se concibe no solo como una fuente de energía futura, sino como un vector tecnológico cuyas capacidades habilitadoras —imanes de alto campo, electrónica de

¹¹ Ver: <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/11/launching-the-genesis-mission/>

¹² Ver: <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2025/12/2025-National-Security-Strategy.pdf>

potencia, *software* de control y materiales avanzados— refuerzan el liderazgo industrial de Estados Unidos en múltiples sectores. El enfoque refleja una lógica ya observada en el ámbito de la IA: la ventaja estratégica no reside únicamente en quién realiza el descubrimiento inicial, sino en quién logra industrializar y escalar la tecnología con mayor rapidez.

La ventaja estadounidense reside en su capacidad para traducir el éxito en laboratorio en empresas con potencial de crecimiento. Los laboratorios nacionales proporcionan validación, mientras que las compañías privadas asumen el riesgo de ingeniería. Este modelo privilegia la velocidad y la diversidad frente a la eficiencia como resultado de la centralización. Sin embargo, también incorpora vulnerabilidades: la fragmentación de proyectos podría duplicar infraestructuras y los plazos requeridos por el sector privado podrían colisionar con las limitaciones de la red eléctrica. Aun así, en 2025, EE. UU. sigue siendo la única jurisdicción donde la fusión se incluye explícitamente como parte del *mix* energético futuro y como un pilar de proyección de poder estratégico.

Las vías de comercialización que se están desarrollando en EE. UU. corresponden a múltiples tipologías. El confinamiento magnético, la fusión inercial, los híbridos magneto-inerciales y los conceptos alternativos, todos ellos reciben financiación en mayor o menor medida, reflejando una preferencia por el desarrollo de diferentes tecnologías. Esto contrasta con las apuestas de décadas anteriores en las que todos los esfuerzos se concentraban fundamentalmente en una única tecnología, el tokamak. Los programas de asociación público-privada basados en consecución de logros que el DOE ha venido financiado con aproximadamente 50-75 millones de dólares por adjudicación durante varios años no están diseñados para «elegir ganadores», sino para reducir riesgos en múltiples vías hasta que surjan elementos de rendimiento relevantes para la red.

Desde la perspectiva de la política industrial, la fusión se alinea cada vez más con las agendas de relocalización. Las técnicas avanzadas de fabricación —fabricación aditiva de grandes componentes, producción nacional de cinta superconductora REBCO y aleaciones tolerantes a neutrones— se enmarcan como capacidades de doble uso con efectos indirectos en los sectores aeroespacial y de defensa. Varias empresas de fusión mantienen relaciones fluidas con el Departamento de Defensa, especialmente en torno a energía pulsada, reactores compactos y propulsión espacial. Aunque estos programas son modestos en

términos presupuestarios, refuerzan la percepción de la fusión como tecnología estratégica más que puramente civil.

El avance de esta tecnología también tiene un componente de política internacional. La fusión es, cada vez más, mencionada en diálogos bilaterales sobre tecnología con aliados, posicionando a las empresas estadounidenses como socios preferentes para futuras plantas de demostración. Esto tiene el efecto de consolidar normas de propiedad intelectual y estándares desde los inicios del desarrollo tecnológico. La postura regulatoria de EE. UU. —la fusión se regula de forma separada de la fisión, con cargas más ligeras asociadas a la obtención de licencias— aumenta su atractivo como centro de desarrollo, acelerando la llegada de talento desde Europa y Asia.

El modelo estadounidense refleja un cálculo estratégico: el liderazgo en fusión lo asegurarán quienes integren ciencia, mercados de capital y ejecución industrial más rápido que sus rivales. En este marco, la habilidad de construir una planta comercial piloto —aunque sea a alto coste— confiere ventajas geopolíticas al consolidar cadenas de suministro y moldear las expectativas globales. EE. UU. se preocupa menos por lograr una fusión económicamente viable en primera instancia que por garantizar que, cuando la fusión sea viable, sus empresas, estándares y alianzas definan el sector.

6.2 China: la fusión como soberanía tecnológica

La estrategia de China en fusión se entiende mejor desde la óptica de la soberanía tecnológica impulsada por el Estado. La fusión se integra en una doctrina más amplia que prioriza el control a largo plazo de tecnologías fundamentales, incluso cuando los retornos económicos a corto plazo son inciertos. A diferencia de los modelos marcados por el mercado, el enfoque chino enfatiza la continuidad, la acumulación de infraestructuras y la integración con los ciclos de planificación nacional.

El programa de fusión de China está incorporado en la planificación nacional de ciencia y tecnología a largo plazo. Se estima que la financiación pública para la fusión asciende a 1200-1700 millones de dólares al año, superando las asignaciones federales recientes de EE. UU. y caracterizándose por estabilidad y continuidad. Esta financiación respalda proyectos nacionales de referencia como EAST (Tokamak Superconductora Avanzada Experimental) y CFETR, concebido como puente entre dispositivos experimentales y una futura planta de energía. A diferencia de

ITER, estas instalaciones están bajo control nacional, lo que permite una iteración más rápida y una integración más estrecha con la industria doméstica.

El desarrollo de la fusión está liderado por instituciones estatales, no por *start-ups* respaldadas por capital riesgo, reflejando la preferencia china por la coordinación centralizada frente a la diversidad emprendedora.

La fusión se enmarca explícitamente como parte de la agenda de autosuficiencia tecnológica de China. El dominio de superconductores, la producción de tritio y los materiales resistentes a altos flujos de calor se consideran estratégicamente equivalentes a los semiconductores o los motores aeroespaciales. Esta visión justifica una inversión sostenida pese a los largos plazos, aislando los programas de fusión de ciclos políticos cortos.

La dimensión civil-militar también es significativa. Aunque China enfatiza públicamente las aplicaciones energéticas pacíficas, la investigación relacionada con la fusión se solapa con intereses militares en energía pulsada, energía dirigida y fuentes compactas de potencia. La doctrina de fusión militar-civil garantiza que los avances en un dominio se transfieran rápidamente al otro, amplificando los retornos estratégicos de la inversión.

A nivel internacional, China aprovecha su participación en fusión para moldear normas mientras mantiene autonomía estratégica. Su implicación en ITER le proporciona acceso a redes científicas globales, pero los programas nacionales paralelos aseguran que el conocimiento crítico no dependa de fuentes externas. El desarrollo de talento es sistemático, con experiencia en fusión cultivada en universidades, laboratorios estatales y centros de investigación industrial.

6.3 Reino Unido: la fusión como apuesta industrial nacional

Reino Unido destaca como el actor europeo con una postura estratégica más decidida en fusión. La fusión se contempla no solo como ciencia, sino como una misión industrial nacional, alineada con la seguridad energética, el desarrollo regional y la identidad tecnológica *postbexit*.

La gobernanza de la fusión reside en la UK Atomic Energy Authority (UKAEA), que funciona no solo como organismo de investigación, sino como promotor de proyectos y referente industrial.

El proyecto de referencia en Reino Unido es el programa STEP (Tokamak Esférico para Producción de Energía). Este proyecto tiene como objetivo la construcción de un prototipo de fusión conectado a la red a principios de la década de 2040. A diferencia de ITER, STEP está concebido explícitamente como una instalación destinada a suministrar energía a la red eléctrica, con un carácter piloto preindustrial y una función catalizadora para el desarrollo de la cadena de suministro nacional.

West Burton, situado al sur de la ciudad de Sheffield, ha sido seleccionado como emplazamiento para STEP, lo que aporta credibilidad al proyecto y, al mismo tiempo, ha facilitado una campaña de divulgación sobre qué es la energía de fusión a escala nacional en todo Reino Unido¹³.

Reino Unido ha comprometido 410 millones de libras en financiación para 2025, con unos compromisos totales acumulados en fusión a varios miles de millones de libras¹⁴.

Otro elemento de especial relevancia es el avance hacia un marco regulatorio que facilite el desarrollo de la energía de fusión. Reino Unido ha establecido una regulación específica para esta tecnología, evitando de forma deliberada clasificar las instalaciones de fusión como reactores nucleares de fisión. Esta claridad regulatoria constituye un activo estratégico, ya que permite acelerar el despliegue de esta tecnología y, al mismo tiempo, atraer a desarrolladores internacionales al país. En paralelo, parte de esta estrategia se ha orientado a la creación de un polo empresarial para la fusión en el campus de Culham, sede de UKAEA, conocido como The Fusion Cluster, que incluye programas específicos para el desarrollo de una fuerza laboral especializada en tecnologías de fusión.

Desde el punto de acuerdos internacionales, Reino Unido firmo una alianza estratégica con EE. UU. para acelerar el desarrollo de la fusión, centrada en I+D, intercambio de conocimientos y competencias en noviembre de 2023¹⁵. Este acuerdo se ha visto reforzado por el Technology Prosperity Deal (TPD), firmado en septiembre de 2025, en el que la energía de fusión se menciona de forma explícita. El TPD tiene como objetivo facilitar el intercambio de conoci-

¹³ Ver: <https://stepfusion.com/west-burton/>

¹⁴ Ver: <https://www.gov.uk/government/news/25-billion-for-world-first-prototype-fusion-energy-plant>

¹⁵ Ver: <https://www.gov.uk/government/news/uk-and-us-form-major-partnership-to-accelerate-global-fusion-energy-development>

miento, recursos y desarrollos en inteligencia artificial con el fin de acelerar la comercialización de la fusión, a través de colaboraciones en investigación, el acceso compartido a instalaciones para la realización de ensayos y la alineación de los marcos regulatorios¹⁶.

6.4 Europa: liderazgo científico sin soberanía industrial

Europa ocupa una posición paradójica en la dinámica global de la fusión. Conserva conocimiento científico excepcional gracias a ITER y a una densa red de laboratorios nacionales, pero tiene dificultades para transformar este liderazgo en una ventaja industrial. El ecosistema europeo de fusión ha sido moldeado por décadas de gobernanza multilateral, aversión al riesgo y predominio del sector público, una arquitectura optimizada para el consenso científico más que para la velocidad que requiere el sector privado.

ITER sigue siendo la pieza central del ecosistema de fusión europeo. Con un coste total proyectado superior a 20 000 millones de euros a lo largo de su vida útil, ITER ha consolidado el papel de Europa como referente mundial en ciencia de fusión. El siguiente paso después de ITER según la estrategia europea es DEMO, una planta de demostración prevista para la década de 2040. El gasto anual de la UE en fusión, incluyendo programas como Euratom y cofinanciación nacional, se sitúa en torno a 1000-1200 millones de euros, lo que hace que la inversión pública europea sea comparable en escala a la estadounidense.

ITER es un ejemplo de colaboración internacional y capacidad de ingeniería. Sin embargo, también ilustra el desafío estructural europeo: el liderazgo científico a gran escala no se traduce automáticamente en dominio de la industria. ITER no está diseñado para ser un prototipo de una planta de energía ni como vehículo de comercialización; es un experimento.

Este patrón de asignación de recursos, tanto públicos como privados, pone de manifiesto un desequilibrio estructural. El ecosistema europeo de fusión se encuentra fragmentado entre instituciones de la Unión Europea, laboratorios nacionales y un sector privado de dimensión aún limitada. La financiación se concentra principalmente en grandes instalaciones públicas con plazos de eje-

¹⁶ Ver: <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/09/memorandum-of-understanding-between-the-government-of-the-united-states-of-america-and-the-government-of-the-united-kingdom-of-great-britain-and-northern-ireland-regarding-the-technology-prosperity-de/>

cución muy prolongados, que, además, carecen de mecanismos eficaces para una rápida transferencia industrial. Aunque existen *start-ups* privadas de fusión en Europa —especialmente en Alemania—, estas operan con niveles de capitalización significativamente inferiores a los de sus homólogas estadounidenses.

El gasto público anual en fusión en la UE se estima en 800-1000 millones de euros, dominado por compromisos relacionados con ITER. La inversión privada acumulada en fusión sigue siendo modesta, en torno a 1000-1500 millones de euros, un orden de magnitud menor que los niveles estadounidenses.

Empresa	Fondos recaudados/capitalización	Concepto de fusión (breve)	País	Principales inversores/apoyos
Marvel Fusion	€400 M	Confinamiento inercial mediante láser (láseres de pulso corto/implosión de objetivo)	Alemania (Múnich)	EQT Ventures, Siemens Energy Ventures, EIC Fund, Tengemann, Bayern Kapital, entre otros
Proxima Fusion	≈ €200 M	Stellarator cuasiisodinámico (variante de confinamiento magnético orientada a operación estable)	Alemania (Múnich; vínculos con Max-Planck IPP)	Cherry Ventures, Balderton Capital, UVC Partners, DTCF, redalpine, otros
Focused Energy	≈ €175 M	Fusión inercial basada en láser (prototipo de ingeniería y diseño integrado)	Alemania / EE. UU. (operación dual)	Alianzas estratégicas con RWE, estado de Hesse; inversores privados vinculados a fondos de EE. UU. y UE
Renaissance Fusion	≈ €61,5 M	Stellarator compacto/confinamiento magnético con imanes HTS y paredes de metal líquido (enfoque en materiales)	Francia	Fondos liderados por Crédit Mutuel Impact y participación de inversores climáticos/VC
Gauss Fusion	€10 M (subvención del BMBF)	Tokamak/ambiciones de megaproyecto (planes para gran planta comercial GIGA)	Alemania	Público (BMBF) y apoyos de capital riesgo; asociaciones industriales en desarrollo
Novatron Fusion	≈ €18 M	Confinamiento magnético alternativo tipo espejo (<i>spin-out</i> de investigación sueca)	Suecia	Axon Partners Group, junto con St1 y consorcio de inversores, Santander InnoEnergy Climate Fund

Tabla 4. Lista de *start-ups* europeas de fusión a diciembre de 2025 (datos indicativos, no exhaustivos)

Esta fragmentación limita la capacidad de Europa para alinear financiación, regulación y estrategia industrial¹⁷. La consecuencia geopolítica es un riesgo creciente de que, aun manteniendo el liderazgo científico por algún tiempo, no se tenga soberanía industrial.

6.5 Japón y Corea del Sur: capacidades clave en la cadena de suministro

Japón y Corea del Sur son líderes mundiales en la producción de superconductores, fabricación de componentes de alta precisión y materiales avanzados, capacidades indispensables para cualquier concepto de fusión.

Se estima que el gasto público anual en fusión de Japón asciende a 400-500 millones de dólares, respaldando dispositivos como JT-60SA y una amplia tradición en la investigación de materiales (por ejemplo, el desarrollo de aceros de activación reducida para fusión). Las empresas japonesas dominan segmentos de la cadena de suministro de superconductores de alta temperatura y componentes ultraprecisos, posicionando al país como proveedor crítico independientemente del concepto de fusión que prevalezca. Este dominio en partes de la cadena de suministro constituye una forma de poder estratégico que no requiere necesariamente la capacidad de construir plantas de producción de energía.

Corea del Sur sigue un patrón similar. Con una inversión anual en fusión de aproximadamente 300-400 millones de dólares, centrada en KSTAR y en I+D industrial, Corea integra el desarrollo de la fusión en su estrategia general de fabricación avanzada de componentes industriales. La participación de grandes conglomerados empresariales garantiza una rápida traducción de la investigación en componentes para la industria, reforzando el papel de Corea como socio manufacturero indispensable.

Otros actores, incluidos Suiza e Italia, ocupan también posiciones en la cadena de suministro muy específicas como en tecnología de vacío, criogenia y diagnósticos.

¹⁷ *A Fusion Engine for Growth: A European Industrial Strategy for Fusion Energy*, disponible en: <https://www.catf.us/resource/fusion-engine-growth-european-industrial-strategy-fusion-energy/>

Región/ País	Financiación pública anual (aprox.)	Compromisos públicos acumulados	Inversión privada en fusión (acumulada)	Modelo de financiación dominante	Implicaciones estratégicas
Estados Unidos	0,8-1,5 mil M\$/año (alta volatilidad)	~25-30 mil M\$ (incl. laboratorios)	8-9 mil M\$ (~50-55 % del capital privado global)	I+D federal + <i>start-ups</i> respaldadas por VC	Liderazgo industrial, iteración rápida, fuerte captura de propiedad intelectual pero vulnerable a oscilaciones presupuestarias
China	1,2-1,7 mil M\$/año (estable)	~20-25 mil M\$ (estimado)	4-5 mil M\$ (fundamentalmente vinculados al Estado)	Programas públicos dirigidos por el Estado	Soberanía a largo plazo, construcción de infraestructuras críticas, progreso más lento pero resiliente
Unión Europea (UE-27)	0,8-1,0 mil M€/año (ITER + I+D)	45-50 mil M€ (ciclo de vida ITER)	1,0-1,5 mil M€	Megaproyectos públicos, VC limitado	Liderazgo científico, riesgo de no transferencia industrial
Reino Unido	250-400 M€/año	2-3 mil M€ (incl. programa STEP)	700 M-1 mil M€	Híbrido público + privado	Política de fusión fundamentalmente orientada a la comercialización
Japón	300-500 M\$/año	~6-8 mil M\$	<500 M\$	I+D público + cadenas de suministro industriales	Dominio de partes de la cadena de suministro (imanes, materiales)
Corea del Sur	200-400 M\$/año	~4-6 mil M\$	<300 M\$	I+D público	Liderazgo en fabricación de componentes
Francia (nacional)	~250-350 M€/año	Incluido en total ITER	<300 M€	Instituciones nucleares públicas	Capacidad técnica en ingeniería, riesgo de no transferencia industrial
Alemania	~200-300 M€/año	~2-3 mil M\$	300-500 M€	Ciencia pública + <i>start-ups</i>	Liderazgo en stellarators, sector privado incipiente
Canadá	<100 M\$/año	~0,5-1 mil M\$	500-700 M\$	Liderado por sector privado (General Fusion)	Nicho de conocimiento en la producción y manejo del tritio
Australia	<50 M\$/año	<500 M\$	<200 M\$	Enfoque en investigación	Física de plasmas y materiales
EAU / Oriente Medio	<50 M\$/año	<500 M\$	<200 M\$	Inversión estratégica/ <i>hosting</i>	Posicionamiento geopolítico a través de inversiones, no liderazgo tecnológico

Tabla 5. Resumen de inversiones en fusión y enfoque empresarial/gubernamental por país.

Bibliografía

- AIE. (2023). *World Energy Outlook 2023*. París.
- . (2025). *World Energy Outlook 2025*.
- Birdsell, J. *et al.* (2019). Exascale computing and fusion energy sciences. *Journal of Physics: Conference Series*. 1258, 012006.
- Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer.
- Butler, K. T. *et al.* (2018). Machine learning for molecular and materials science. *Nature*. 559, pp. 547-555.
- Chang, C. S. *et al.* (2017). Whole-device modelling of plasma transport in fusion plasmas. *Physics of Plasmas*. 24, 055503.
- Comisión Europea. (2023). *State of the Energy Union 2023*. Bruselas.
- Degrave, J. *et al.* (2022). Magnetic control of tokamak plasmas through deep reinforcement learning. *Nature*. 602, pp. 414-419.
- Helander, P. *et al.* (2012). Stellarator and tokamak plasmas: a comparison. *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 54, 124009.
- Hirshman, S. P. y Whitson, J. C. (1983). Steepest-descent moment method for three-dimensional equilibrium calculations. *Physics of Fluids*. 26, pp. 3553-3568.
- Jenko, F. *et al.* (2000). Electron temperature gradient driven turbulence. *Physics of Plasmas*. 7, pp. 1904-1910.
- Kates-Harbeck, J., Svyatkovskiy, A. y Tang, W. (2019). Predicting disruptive instabilities in controlled fusion plasmas through deep learning. *Nature*. 568, pp. 526-531.
- Landreman, M. y Paul, E. J. (2022). Magnetic fields with precise quasisymmetry for plasma confinement. *Physical Review Letters*. 128, 035001.
- McArdle, S. *et al.* (2020). Quantum computational chemistry. *Reviews of Modern Physics*. 92, 015003.
- McKinsey & Company. (2024). *Global Energy Perspective 2024*.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2021). *Bringing Fusion to the U.S. Grid*. Washington, DC, The National Academies Press.
- Pankin, A. *et al.* (2019). Toward digital twins for fusion reactors. *Fusion Engineering and Design*. 146, pp. 140-146.

- Preskill, J. (2018). Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*. 2, p. 79.
- Rea, C. *et al.* (2018). Disruption prediction and avoidance in tokamaks using real-time data. *Fusion Science and Technology*. 74, pp. 1-13.
- Sanchez, R. *et al.* (2019). Gyrokinetic turbulence simulations with reduced models. *Nuclear Fusion*. 59, 056014.
- Van Milligen, B. P. *et al.* (2022). Machine learning control for tokamak plasmas. *Nuclear Fusion*. 62, 056019.

Anexo: 1. ¿Qué es la energía de fusión?

La posibilidad de obtener energía a partir de reacciones nucleares de fusión fue planteada por primera vez en el ámbito científico en la década de 1920. En 1926, el astrofísico británico Arthur Eddington sugirió que los procesos responsables de la enorme energía emitida por las estrellas debían estar asociados a la fusión de núcleos ligeros en otros más pesados. Esta hipótesis abrió un nuevo campo de investigación que impulsó a científicos de distintos países a estudiar tanto la física nuclear como los mecanismos que gobiernan el interior estelar, sentando las bases conceptuales de la fusión como fuente energética.

El primer paso experimental hacia la reproducción de estos procesos en la Tierra se dio en 1932 en la Universidad de Cambridge. Ernest Rutherford y su equipo lograron inducir reacciones de fusión en laboratorio, observando la interacción entre núcleos de deuterio. Estos experimentos no solo confirmaron la posibilidad de fusionar núcleos ligeros, sino que permitieron identificar nuevos productos nucleares, como el helio-3 y el tritio. Rutherford destacó entonces que, aunque cada evento de fusión liberaba una cantidad significativa de energía, la baja probabilidad de que estas reacciones ocurrieran implicaba un balance energético global negativo.

Pocos años después, en 1938, Hans Bethe desarrolló un marco teórico detallado para describir las reacciones nucleares responsables de la producción de energía en las estrellas. Al calcular las probabilidades de interacción de distintas reacciones, Bethe demostró que la energía estelar procede de una compleja cadena de procesos de fusión que, con el tiempo, transforma hidrógeno en helio y posteriormente en núcleos más pesados. Este trabajo consolidó definitivamente la fusión como el mecanismo energético fundamental del universo observable.

A comienzos de la década de 1950, el conocimiento acumulado sobre la física de la fusión de núcleos ligeros permitió formular criterios cuantitativos para evaluar su viabilidad energética en dispositivos terrestres. En este contexto, John Lawson estableció el conocido criterio de Lawson, que define las condiciones mínimas necesarias para obtener energía neta en un sistema de fusión por confinamiento. Dichas condiciones dependen de la temperatura del plasma, la densidad de partículas y el tiempo durante el cual la energía permanece confinada. Así, la temperatura que debía alcanzar esa máquina debía ser de unos 10 keV

(100 millones de grados centígrados), una densidad de electrones de $n_e \sim 10^{20} \text{ m}^{-3}$ y un tiempo de confinamiento $\tau_E > 1,5 \text{ s}$. Alcanzar la densidad fue relativamente fácil. La temperatura parecía ser una tarea difícil, pero varios métodos han logrado alcanzar e incluso superar este valor. Sin embargo, el verdadero desafío sería el tiempo de confinamiento de la energía.

Durante este periodo, comenzaron a explorarse distintas configuraciones experimentales para reproducir la fusión en la Tierra. En 1950, los científicos soviéticos Andrei Sájarov e Ígor Tamm propusieron el concepto del tokamak, un dispositivo basado en el confinamiento magnético del plasma en forma toroidal. Poco después, en 1951, Lyman Spitzer presentó en Estados Unidos el concepto alternativo del stellarator. Aunque inicialmente el stellarator atrajo gran parte del interés científico, los avances experimentales liderados por Lev Artsímovich en la Unión Soviética demostraron que el tokamak ofrecía mejores prestaciones en términos de confinamiento, lo que condujo a su adopción generalizada. En estos dispositivos se alcanzaron por primera vez temperaturas del orden del kiloelectronvoltio.

La década de 1950 también estuvo marcada por un cambio en el contexto político de la investigación en fusión. Las conferencias «Átomos para la Paz», organizadas por el Organismo Internacional de la Energía Atómica en 1955 y 1958, promovieron la cooperación internacional en el uso pacífico de la energía nuclear. Como resultado, la investigación en fusión fue desclasificada oficialmente, facilitando el intercambio científico y acelerando el progreso tecnológico.

Un nuevo salto cualitativo se produjo en 1968, cuando los tokamaks soviéticos alcanzaron simultáneamente temperaturas elevadas y tiempos de confinamiento sin precedentes. Estos resultados consolidaron al tokamak como la configuración dominante en la investigación en fusión, posición que mantiene hasta la actualidad como el concepto más avanzado desde el punto de vista experimental.

En la década de 1970 se hizo evidente que el desarrollo de la fusión requeriría esfuerzos a escala internacional. En Europa, esta convicción llevó al diseño del Joint European Torus (JET) en 1973. La construcción de esta instalación, que se convertiría en el mayor experimento operativo de confinamiento magnético, finalizó en 1983 en Reino Unido, logrando sus primeros plasmas ese mismo año y estableciendo un referente mundial en física de plasmas.

Paralelamente, comenzó a tomar forma la idea de un proyecto verdaderamente global para demostrar la viabilidad científica y tecnológica de la fusión. Esta iniciativa cristalizó en 1985, durante la cumbre de Ginebra entre las superpotencias, cuando se propuso formalmente el proyecto ITER. Tras más de dos décadas de negociaciones, ITER se estableció en Francia en 2007 con el objetivo de demostrar la producción sostenida de energía de fusión en condiciones cercanas a las de una planta industrial.

Mientras tanto, los programas nacionales —especialmente en Europa, China, Japón, Corea del Sur, Reino Unido y Estados Unidos— continuaron avanzando en áreas clave como la física del plasma, los materiales sometidos a neutrones y las tecnologías asociadas. A partir de la década de 2010, el énfasis comenzó a desplazarse gradualmente desde la demostración científica hacia la viabilidad comercial y el diseño de plantas piloto.

Los resultados más recientes refuerzan esta percepción. En 2021, JET estableció un nuevo récord al producir 59 megajulios de energía de fusión, superando su propio récord de 1997. Poco después, en diciembre de 2022, la National Ignition Facility en Estados Unidos logró por primera vez una ganancia neta de energía en un experimento de fusión por confinamiento inercial, alcanzando un factor $Q_{\text{científico}}$ (ganancia) superior a la unidad. Estos hitos no implican aún una aplicación comercial, pero sí confirman que los principios físicos fundamentales están validados.

En la actualidad, cerca de ciento treinta dispositivos experimentales de fusión se encuentran en operación, construcción o fase de planificación en todo el mundo, junto con múltiples diseños de plantas de demostración y reactores piloto. Este conjunto de avances sitúa la fusión en una transición crítica: de ser una aspiración científica de largo plazo, comienza a perfilarse como una opción tecnológica con implicaciones reales para los sistemas energéticos.

La reacción de fusión

Una reacción de fusión nuclear es un fenómeno en el que dos núcleos atómicos de baja masa se unen para dar lugar a un núcleo de mayor masa, proceso que va acompañado de una liberación significativa de energía. Este mecanismo contrasta con la fisión nuclear, en la que núcleos pesados se fragmentan en otros más ligeros para producir energía.

La fusión nuclear está gobernada por la interacción nuclear fuerte, la fuerza fundamental que mantiene cohesionados protones y neutrones dentro del núcleo atómico. Para que dos núcleos puedan fusionarse, deben aproximarse lo suficiente como para que esta fuerza supere la repulsión eléctrica existente entre protones, que poseen carga positiva. A escalas extremadamente pequeñas, la interacción nuclear fuerte domina sobre la repulsión electrostática, permitiendo que los núcleos se unan.

La energía que se libera en una reacción de fusión tiene su origen en una diferencia de masa. El núcleo resultante de la fusión presenta una masa ligeramente menor que la suma de las masas de los núcleos iniciales. Esta diferencia se transforma en energía de acuerdo con el principio de equivalencia entre masa y energía formulado por Albert Einstein, expresado mediante la relación $E=mc^2$.

En términos conceptuales, diversas combinaciones de núcleos ligeros pueden dar lugar a reacciones de fusión con potencial aplicación energética. En principio, cualquiera de las reacciones indicadas en la tabla siguiente podría servir como base para el diseño de un sistema de fusión destinado a la producción de energía, siempre que se cumplan las condiciones físicas y tecnológicas necesarias para su control y aprovechamiento.

Nº	Reacción	Productos
1	D + T	^4He (3,5 MeV) + n (14,1 MeV)
2	D + D	T (1,01 MeV) + p (3,02 MeV) (50 %)
		^3He (0,82 MeV) + n (2,45 MeV) (50 %)
3	D + ^3He	^4He (3,6 MeV) + p (14,7 MeV)
4	T + T	^4He + 2 n + 11,3 MeV
5	^3He + ^3He	^4He + 2 p
6	^3He + T	^4He + p + n + 12,1 MeV (51 %)
		^4He (4,8 MeV) + D (9,5 MeV) (43 %)
		^4He (0,5 MeV) + n (1,9 MeV) + p (11,9 MeV) (6 %)
7	D + ^6Li	2 ^4He + 22,4 MeV
8	p + ^6Li	^4He (1,7 MeV) + ^3He (2,3 MeV)
9	^3He + ^6Li	2 ^4He + p + 16,9 MeV
10	p + ^{11}B	3 ^3He + 8,7 MeV

Tabla 6. Reacciones de fusión posibles para la producción de energía.
Fuente: Fusion Physics, IAEA

Tipos de combustible de fusión

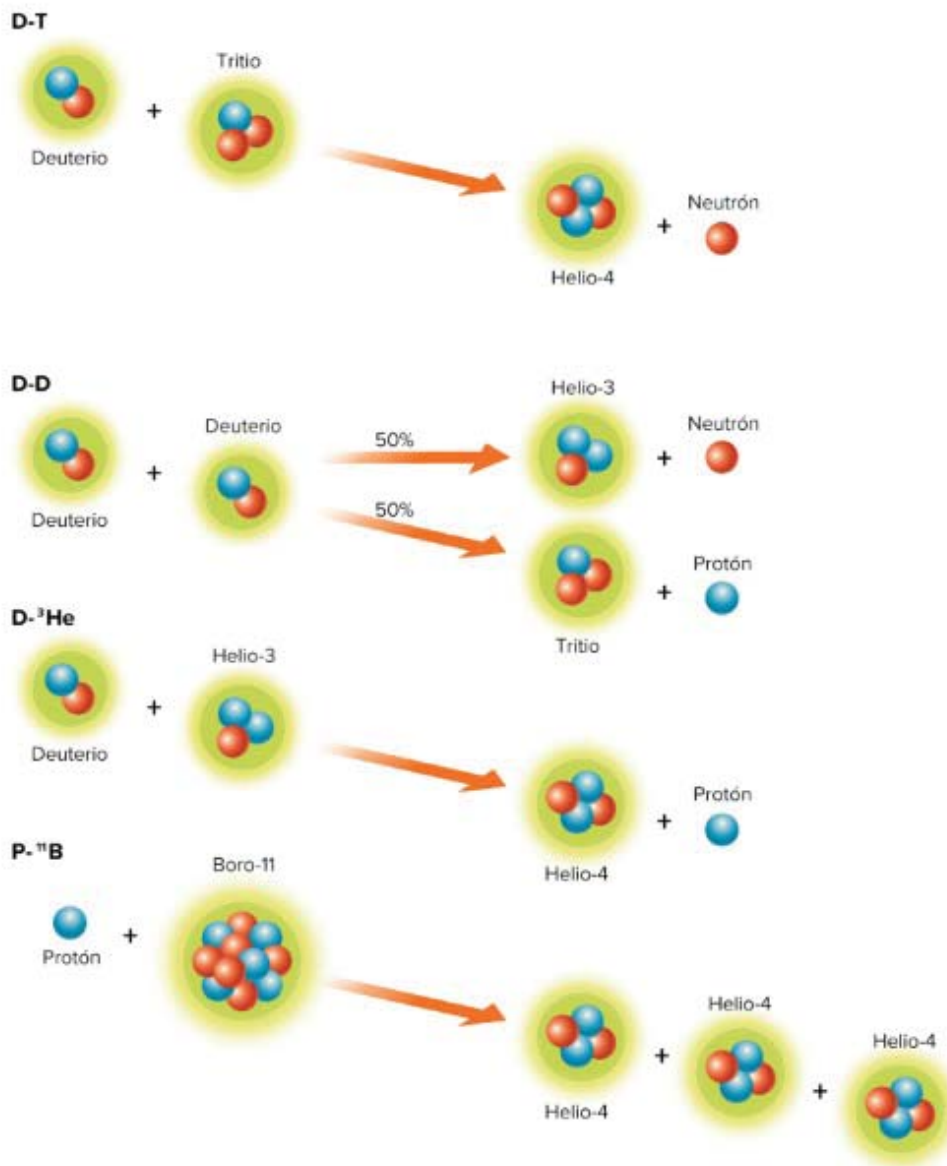


Figura 7: Ilustración de las reacciones de fusión mencionadas en la tabla 1.
Fuente: Infographic/Knowable

La reacción de fusión entre deuterio y tritio (D-T) es la más utilizada en los diseños actuales de dispositivos de fusión, ya que presenta la mayor probabilidad de reacción a temperaturas relativamente «bajas» en comparación con otras posibles combinaciones de combustible. Su sección eficaz alcanza un máximo en el entorno de los 100 keV, mientras que otras reacciones alternativas requieren temperaturas significativamente más elevadas y, aun así, presentan probabilidades de fusión menores. Esta diferencia explica por qué la gran mayoría de los conceptos de reactores de fusión en desarrollo se apoyan en el ciclo D-T.

Como se ha indicado previamente, la viabilidad energética de la fusión está condicionada por el criterio de Lawson, que establece los requisitos mínimos para que un sistema de fusión produzca más energía de la que consume. Este criterio actúa como una referencia fundamental para el diseño y la evaluación de máquinas de fusión, ya que permite identificar los límites físicos que deben superarse para que la fusión pueda convertirse en una fuente de energía útil.

El criterio de Lawson se articula en torno a tres variables clave:

- Temperatura (T): el plasma —un medio ionizado extremadamente caliente— debe alcanzar temperaturas muy elevadas para que los núcleos de combustible tengan suficiente energía cinética como para vencer su repulsión eléctrica y fusionarse.
- Densidad (n): la concentración de iones de combustible en el plasma debe ser lo bastante alta como para incrementar la frecuencia de colisiones y, con ello, la tasa de reacciones de fusión.

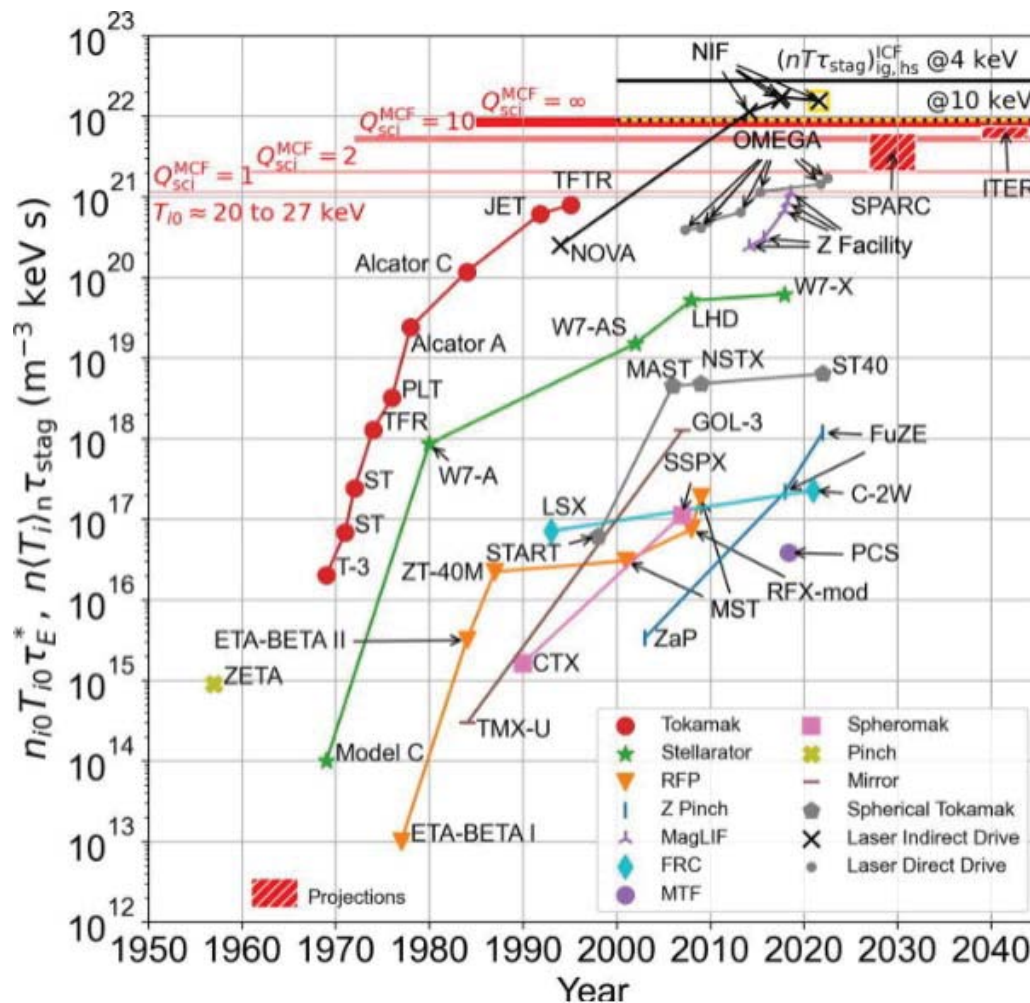


Figura 8: Avances hacia el punto de equilibrio y la ganancia de energía de fusión de diferentes máquinas experimentales de fusión según el criterio de Lawson. Fuente: Phys. Plasmas 32, 112106 (2025)

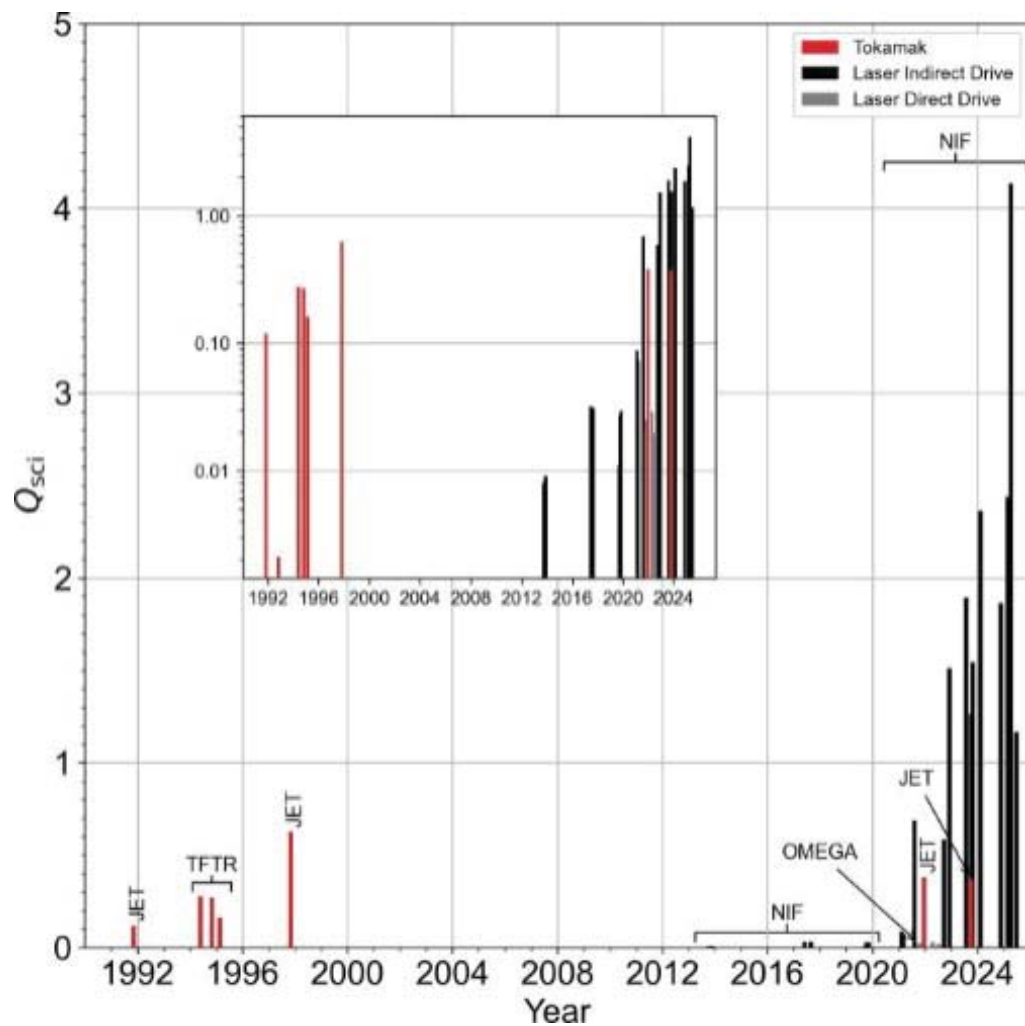


Figura 9: Gráfico de los resultados reales frente a la fecha de obtención de los experimentos de fusión D-T. Fuente: Phys. Plasmas 32, 112106 (2025)

- Tiempo de confinamiento energético (τ): el plasma debe mantenerse estable, a la temperatura y densidad requeridas, durante un intervalo de tiempo suficiente para que el número total de reacciones genere un balance energético positivo.

Estos tres parámetros suelen combinarse en una magnitud única conocida como el producto triple de Lawson ($nT\tau$), que sirve como indicador del grado de proximidad de un experimento de fusión al equilibrio energético y a la ganancia neta. Alcanzar valores elevados de este producto implica un ajuste preciso entre calentamiento, densidad y confinamiento, lo que constituye uno de los principales retos científicos y tecnológicos de la fusión.

El objetivo último es llevar el plasma hasta el régimen de ignición, en el que la energía liberada por las propias reacciones de fusión es suficiente para compensar las pérdidas energéticas, especialmente las debidas a la radiación. En este punto, el sistema puede

sostener la reacción sin aportes externos significativos, marcando el umbral hacia una producción neta de energía de fusión.

Principales enfoques tecnológicos

En la actualidad existen múltiples propuestas tecnológicas orientadas a la obtención de energía mediante fusión nuclear. Aunque difieren de forma significativa en su diseño y principios de funcionamiento, todas comparten un objetivo común: alcanzar un régimen de operación capaz de generar energía neta de manera eficiente y controlada.

La mayoría de estos enfoques se basan en dos grandes estrategias para manejar el plasma, el medio en el que se producen las reacciones de fusión. Por un lado, los sistemas de confinamiento magnético emplean campos magnéticos intensos para contener y estabilizar el plasma a altas temperaturas. Por otro, los métodos de confinamiento inercial utilizan impulsos extremadamente rápidos —mediante láseres o corrientes eléctricas— para comprimir el combustible hasta condiciones en las que la fusión puede tener lugar antes de que el plasma se expanda.

Existen también conceptos híbridos que combinan elementos de ambos enfoques, conocidos como sistemas magneto-inerciales, que buscan aprovechar las ventajas de cada técnica. Hasta la fecha, los mayores hitos experimentales en términos de energía de fusión producida se han alcanzado principalmente en dos tipos de dispositivos: los sistemas de confinamiento inercial y los tokamaks, que representan la configuración más madura dentro del confinamiento magnético.

Junto con estos enfoques dominantes, se desarrollan otras alternativas menos avanzadas desde el punto de vista experimental, pero con características potencialmente atractivas. Entre ellas se encuentran conceptos como el z-pinch, que, aunque todavía se encuentran en fases tempranas de desarrollo, continúan evolucionando y ofrecen posibles ventajas en simplicidad de diseño o escalabilidad.

Persisten aún desafíos técnicos de gran envergadura que deben resolverse antes de que la fusión pueda convertirse en una fuente de energía operativa. La generación y el control de plasmas sometidos a temperaturas y presiones extremas imponen exigencias muy elevadas a los sistemas tecnológicos actuales. A ello se suma la dificultad de mantener el plasma estable durante periodos prolongados y de limitar las pérdidas energéticas asociadas

Confinamiento magnético

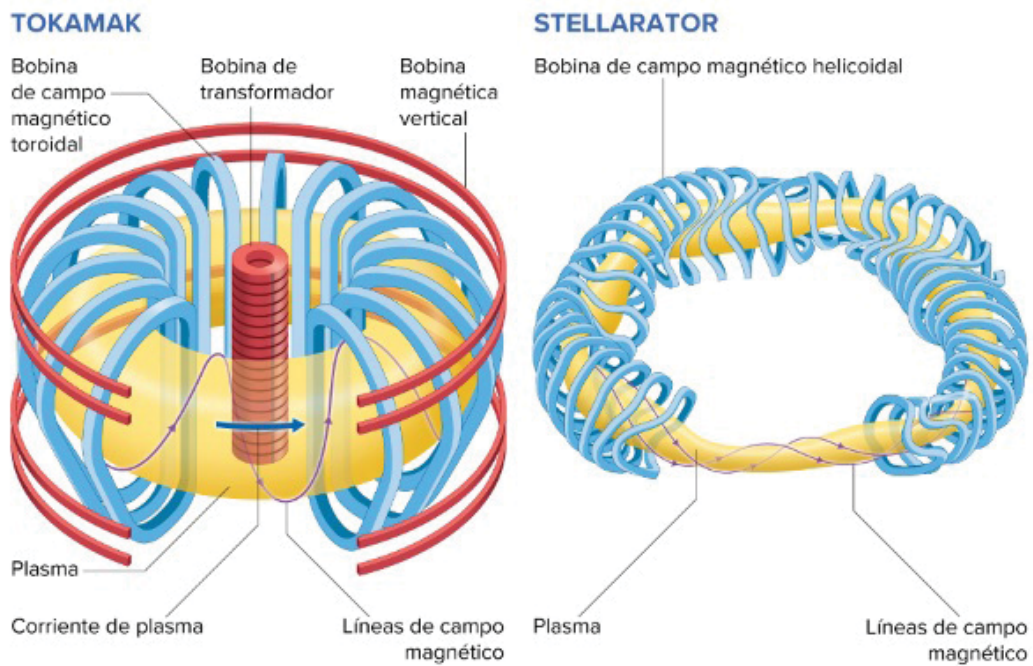


Figura 10: Máquinas de fusión por confinamiento magnético: tokamak (izq) y stellarator (der). Fuente: Infographic/Knowable

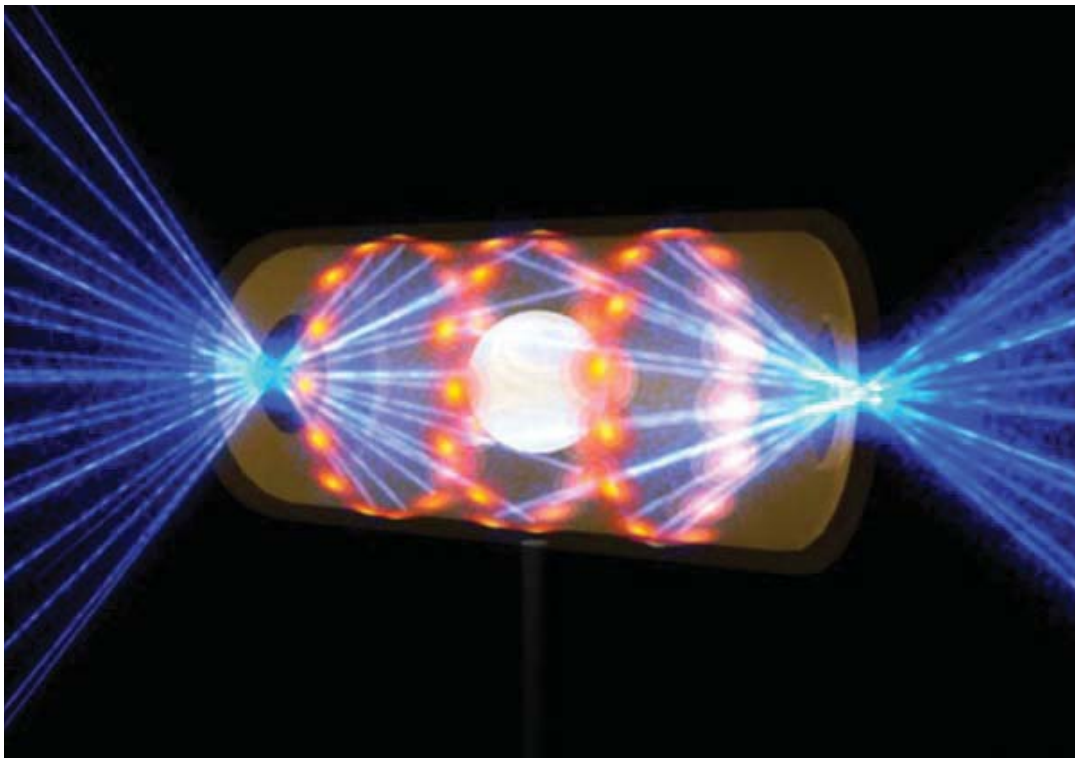


Figura 11: National Ignition Facility (EEUU). Máquina experimental basada en el concepto de fusión inercial en la que los rayos láser de la instalación entran por las aberturas situadas en ambos extremos de un hohlraum donde se encuentra el combustible de fusión, en este caso D-T. Fuente: Lawrence Livermore National Laboratory

a procesos de radiación y transporte térmico, factores que afectan directamente al rendimiento global del sistema. Asimismo, la disponibilidad de materiales capaces de resistir el intenso flujo de neutrones, las altas cargas térmicas y las tensiones mecánicas del entorno de un reactor de fusión constituye un elemento crítico para garantizar su operación continuada y su viabilidad económica a largo plazo.

No obstante, los progresos recientes indican una evolución sostenida. Las mejoras en los esquemas de confinamiento magnético, en particular en configuraciones como tokamaks y stellarators, han permitido incrementar tanto la estabilidad del plasma como los tiempos de confinamiento energético. De forma paralela, la fusión por confinamiento inercial, basada en la compresión rápida del combustible mediante sistemas láser de alta potencia, continúa mostrando resultados relevantes en el ámbito experimental. Además, se exploran ciclos de combustible alternativos, como los basados en reacciones de protones y boro, que, aunque presentan mayores retos tecnológicos, podrían dar lugar a reacciones de fusión con menores residuos y características operativas potencialmente más favorables.

Para una completa descripción de los principios físicos que gobiernan la energía fusión y las implicaciones tecnológicas que ellos conllevan, se recomiendan las siguientes lecturas:

- *Principles Of Fusion Energy: An Introduction To Fusion Energy For Students Of Science And Engineering*. A. A. Harms , D. R. Kingdon, K. F. Schoepf , G. H. Miley. ISBN-13: 978-9812380333
- *Fusion: Introduction to the Physics and Technology of Magnetic Confinement Fusion*. Weston M. Stacey. ISBN-13: 978-0471880790
- *Fusion Physics*. IAEA.