

PERSPECTIVAS DEL OIEA SOBRE LA FUSIÓN EN EL MUNDO 2024



PERSPECTIVAS DEL OIEA SOBRE LA FUSIÓN EN EL MUNDO 2024

"El camino hacia la energía de fusión da muestra del ingenio y la perseverancia humanos".

Rafael Mariano Grossi, Director General del OIEA

El empuje que está cobrando actualmente la energía de fusión es innegable. Inspirado por este progreso, el pasado año presenté la publicación *Perspectivas del OIEA sobre la fusión en el mundo*, una referencia mundial exhaustiva que recorre los avances más recientes en la energía de fusión. Me complace en gran medida la recepción tan positiva que ha tenido esta publicación.

El camino hacia la energía de fusión da muestra del ingenio y la perseverancia humanos. Para allanar aún más ese camino, establecí el Grupo Mundial sobre la Energía de Fusión, una iniciativa mundial dedicada a fomentar la colaboración en todo este ámbito. Nuestra misión es ambiciosa a la par que clara: acelerar la investigación, el desarrollo, la demostración y la implantación de la energía de fusión. Con la unión de la industria, el Gobierno, el mundo académico y los órganos reguladores, estamos sentando las bases de una comunidad de la energía de fusión cohesionada, unida en pos de objetivos comunes.

Los Gobiernos están desempeñando un papel crucial en este afán. Para que la energía de fusión pase del laboratorio a la red es esencial contar con inversiones públicas estratégicas, un sólido apoyo en materia de políticas, y colaboración internacional. El éxito de la comunidad mundial dedicada a la fusión depende de estos esfuerzos sostenidos. Quisiera alentar el establecimiento de marcos reguladores acordes con los riesgos y que aporten la claridad necesaria para acelerar el desarrollo de la energía de fusión y atraer inversiones en el sector.

Por otra parte, este año invité a un grupo de expertos internacionales a que señalasen una serie de elementos clave de la fusión que brindarán una exhaustiva hoja de ruta y una valiosa orientación a corto y medio plazo a científicos, ingenieros, reguladores, empresarios, encargados de la formulación de políticas y partes interesadas de todo el mundo.

A medida que nos adentramos en una fase crucial para la energía de fusión, debemos redoblar nuestros esfuerzos en todos los

sectores: desarrollando tecnologías y materiales propicios, reforzando las alianzas público-privadas, aprovechando el capital privado para lograr la viabilidad comercial y cultivando una fuerza de trabajo a escala mundial. La energía de fusión exige un amplio conjunto de conocimientos especializados, y esto abarca desde trabajadores cualificados a profesionales del derecho, así como en materia de políticas y comunicaciones, todos los cuales contribuyen a la economía mundial.

Las inversiones en investigación sobre energía de fusión y su comercialización prometen importantes beneficios económicos, que van mucho más allá del potencial que ofrece esa energía en materia de descarbonización. Las tecnologías derivadas de la fusión tienen aplicaciones en ámbitos como la atención médica, la propulsión espacial, la imagenología industrial, la perforación geotérmica y la gestión de desechos nucleares, con lo que se abren nuevas vías de negocio más allá de la generación de energía.

Conforme transitamos por las complejidades de esta revolucionaria tecnología, nuestra determinación es firme: aprovechar el poder de la energía de fusión en favor de un mundo sostenible, próspero y pacífico. La era de la fusión ya no es una mera aspiración, sino una realidad a nuestro alcance, y juntos lograremos que así sea.

La presente edición de las *Perspectivas del OIEA sobre la fusión en el mundo*, correspondiente a este año, no se limita a presentar un mero seguimiento de los avances y logros clave, sino que pone de relieve conceptos emergentes de centrales, calendarios de desarrollo previstos, marcos en materia de políticas y tendencias en inversión pública y privada. Asimismo, abarca métricas de resultados de investigación y ofrece perspectivas regionales y sectoriales. Confio en que las *Perspectivas del OIEA sobre la fusión en el mundo* sigan siendo una valiosa guía para las partes interesadas de los sectores de la energía, las políticas y la investigación en su labor por hacer avanzar la energía de fusión.







"El desarrollo de la energía de fusión es un posible punto de inflexión a largo plazo y un instrumento fundamental para un futuro sostenible de paz y seguridad".

Antonio Tajani, Vicepresidente del Consejo, Ministro de Asuntos Exteriores y Cooperación Internacional

La energía de fusión: un desafío sin precedentes y una oportunidad para el futuro

Es para nosotros un honor acoger y colaborar en la organización de la reunión ministerial inaugural del Grupo Mundial sobre la Energía de Fusión. Este evento pone de manifiesto el apoyo del Gobierno de Italia a la cooperación internacional y nuestro compromiso de larga data con el avance tecnológico: una fuerza motriz clave del crecimiento, el bienestar y la prosperidad.

La seguridad energética es una prioridad en el escenario actual de intensificación de las turbulencias geopolíticas. Desde el punto de vista político, la energía de fusión brinda la gran posibilidad de responder a estos desafíos y garantizar la independencia energética, reduciendo al mismo tiempo las tensiones geopolíticas vinculadas a la explotación de los combustibles fósiles. También pienso en un mejor acceso a la electricidad en vastas zonas del mundo que



aún carecen de infraestructura eléctrica eficiente

El desarrollo de nuevas tecnologías en el sector nuclear puede ser un paso importante en el camino hacia la transición energética y la lucha contra el cambio climático. La energía nuclear se ha incluido como energía limpia en la taxonomía de la Unión Europea y considero que no podemos desaprovechar la oportunidad que nos ofrece el inicio de la nueva legislatura europea. Para reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles. debemos tomar en consideración una canasta energética diversa en la que la energía de fusión coexista con las energías renovables, el hidrógeno y las tecnologías nucleares emergentes como los reactores modulares pequeños. Esto también tendrá una incidencia positiva en los costos energéticos, aumentará la competitividad de nuestras empresas y promoverá el crecimiento.

En otras palabras, el desarrollo de la energía de fusión es un posible punto de inflexión a largo plazo y un instrumento fundamental para un futuro sostenible de paz y seguridad.

El impulso a la innovación y el aumento de las inversiones están a punto de hacer realidad la energía de fusión. Italia desea seguir a la vanguardia de esta labor, gracias al saber hacer de las numerosas entidades nacionales públicas y privadas que intervienen en este ámbito.

Las iniciativas tecnológicas, científicas y financieras son fundamentales. Es crucial fomentar la cooperación internacional y las alianzas público-privadas para reunir las cuantiosas inversiones que tanto se necesitan y poner en común infraestructuras avanzadas y conocimientos altamente especializados. Este es también el objetivo del Grupo Mundial sobre la Energía de Fusión, cuyo papel es esencial para evitar que este empeño de la comunidad científica se convierta en un nuevo escenario de competencia geopolítica.

Italia siempre ha ocupado un lugar destacado en la investigación tecnológica y la innovación en la esfera de la energía nuclear, comenzando por el desarrollo del primer reactor nuclear, gracias al cual el físico italiano Enrico Fermi sentó las bases de la física nuclear moderna.

En la actualidad, nuestra Agencia Nacional de Nuevas Tecnologías, Energía y Desarrollo Económico Sostenible (ENEA) es una institución líder en el ámbito de la energía de fusión, y su centro de investigación en Frascati es un claro ejemplo de alianza virtuosa entre los sectores público, privado y académico.

"El impulso a la innovación y el aumento de las inversiones están a punto de hacer realidad la energía de fusión".

También pienso en nuestras principales empresas de energía, que llevaron nuestro afán de innovación más allá de las fronteras nacionales, y participaron en muchos proyectos innovadores.

Italia está dispuesta a compartir sus conocimientos especializados y a contribuir a reducir significativamente la brecha de conocimientos entre los países industrializados y los países en desarrollo. Junto con la participación del sector privado, la colaboración académica, la enseñanza y la formación profesional son el eje de nuestro nuevo acercamiento a nuestros asociados para el desarrollo, especialmente en África. Esta postura también ocupa un lugar central en la presidencia italiana del G7 y en nuestra actuación a nivel europeo.

Esto es muy importante porque la nueva era de la energía nuclear y de fusión depende de que la comunidad de jóvenes científicos, científicas, ingenieros e ingenieras aproveche al máximo sus capacidades.

El camino por recorrer es largo y complejo, y hay mucho en juego. Debemos ser conscientes de que las decisiones que tomemos hoy configurarán el panorama social, económico y geopolítico del mundo del futuro

Trabajemos juntos por un futuro brillante para la próxima generación.■



Todos reconocemos la necesidad de una solución permanente para los desafíos mundiales del cambio climático y la seguridad energética. A fin de hacerla realidad, debemos forjar un camino sólido hacia la descarbonización y tener en cuenta nuestros compromisos actuales en materia de políticas climáticas, energéticas y ambientales. Entre ellos figura alcanzar unas emisiones netas cero de gases de efecto invernadero para 2050 a fin de limitar el aumento de la temperatura global a 1,5 °C. Al mismo tiempo, tenemos que transformar nuestros sistemas económicos y sociales apostando por las emisiones netas cero, las economías circulares y la resiliencia climática, y a la vez garantizar un crecimiento sostenible e inclusivo, mejorar nuestras economías y acelerar la transición energética.

Merece la pena reafirmar la importancia de los enfoques basados en la ciencia a la hora de formular políticas para hacer frente a la crisis climática y ambiental mundial. Para ello es necesario un planteamiento tecnológico neutro que tenga en cuenta todas las soluciones para atender las crecientes necesidades energéticas mundiales en aras del desarrollo sostenible.

La energía de fusión tiene el potencial de aportar una solución duradera para este desafío. La producción con éxito de energía de

fusión podría ofrecer importantes beneficios sociales, ambientales y económicos como fuente de energía limpia posiblemente de emisiones cero, tecnológica y físicamente segura y prácticamente ilimitada. La posibilidad de comercializar futuras centrales de fusión ha llevado al desarrollo de instalaciones de demostración durante los próximos diez años, por conducto de programas de investigación de gran envergadura financiados por gobiernos, la Unión Europea y empresas de todo el mundo. La colaboración internacional acelerará el desarrollo y la demostración de la tecnología de fusión, reforzando así la necesidad de un compromiso a escala mundial para subsanar las dificultades en el ámbito de la investigación y estableciendo cadenas de suministro y una fuerza de trabajo internacionales.

El sector de la energía de fusión a nivel mundial está registrando una importante aceleración, ya que cada vez son más las empresas privadas dedicadas al desarrollo de la fusión por confinamiento magnético y por confinamiento inercial, o métodos mixtos, que atraen inversiones sustanciales de entidades privadas y gobiernos. Algunas empresas prevén construir centrales de fusión capaces de producir electricidad entre 2040 y 2050, antes del plazo de mediados de siglo que se contempla en los programas públicos de investigación. En los próximos años, el proyecto ITER aportará conocimientos valiosos sobre la puesta en servicio, los escenarios de plasma, la gestión del tritio y los aspectos



Gilberto Pichetto Fratin, Ministro de Medio Ambiente y Seguridad Energética de Italia (cortesía del Gobierno de Italia).

"Todos reconocemos la necesidad de una solución permanente para los desafíos mundiales del cambio climático y la seguridad energética".

Gilberto Pichetto Fratin Ministro de Medio Ambiente y Seguridad Energética

nucleares, la seguridad y la disponibilidad de las centrales, la manipulación a distancia, la descarga de energía del plasma y la gestión de desechos radiactivos. El proyecto ITER ya ha proporcionado información importante sobre muchas de las tecnologías de construcción de los componentes y subsistemas de las centrales para la producción de electricidad a partir de la fusión. Recientemente, el ITER anunció planes de ampliar su enfoque relativo a las alianzas público-privadas haciendo partícipes en iniciativas de fusión a empresas del sector privado, con la inclusión de empresas activas en el desarrollo de centrales de fusión, usuarios finales, cadenas de suministro, universidades y centros de investigación. El proyecto ITER, junto con el desarrollo de nuevas máquinas, subraya la necesidad de incluir la cadena de suministro desde el principio del proceso de diseño para optimizar la experiencia y las competencias.

Durante la Cumbre del G7 bajo la presidencia de Italia, recordando un compromiso recogido en el comunicado de la Reunión de Ministros de Clima, Energía y Medio Ambiente del G7 (Comunicado de Turín), los dirigentes de los siete Estados Miembros incluyeron la energía de fusión entre las esferas de colaboración para afrontar los desafíos mundiales con el compromiso de crear el Grupo de Trabajo del G7 sobre Energía de Fusión. Esto demuestra una vez más el reconocimiento cada vez mayor del importante papel que desempeña la energía de fusión en

la consecución de los objetivos climáticos y de seguridad energética a largo plazo.

El 21 de septiembre de 2023 establecí la Plataforma Nacional para una Energía Nuclear Sostenible, por conducto de la cual se encomienda a las principales organizaciones científicas y empresas que trabajan en el ámbito nuclear la tarea de elaborar una posible hoja de ruta para replantearse la generación de energía nucleoeléctrica como fuente de energía descarbonizada y disponible de la canasta energética de Italia. La Plataforma ha evaluado la utilidad y viabilidad de implantar la energía nuclear en Italia a partir de 2035 para apoyar el pleno despliegue de las energías renovables, y paralelamente se ha centrado en la energía de fusión, en concreto, en su investigación y desarrollo y su implantación a mediano y largo plazo.

En consecuencia, sobre la base de los datos nucleares y el análisis de la Plataforma Nacional para una Energía Nuclear Sostenible, el Plan Nacional de Energía y Clima de Italia propone replantearse la energía nuclear como parte de la canasta energética del país, e incorporar tecnologías de fisión sostenibles, como reactores modulares pequeños, reactores modulares avanzados y microrreactores, junto con una posible contribución de la energía de fusión a partir de 2050 aproximadamente.

Aunque Italia dejó de producir energía nuclear hace casi 40 años, las entidades públicas de investigación y las industrias han seguido invirtiendo en la investigación de tecnologías nucleares, incluida la energía de fusión, y desarrollando estas tecnologías. Por lo tanto, Italia puede aprovechar ahora los conocimientos científicos y técnicos especializados de que dispone y las capacidades actuales de sus organizaciones de investigación, el sector académico, las empresas y las industrias establecidas para fomentar una industria de fusión sólida como parte de un marco nacional cohesionado.

El Gobierno de Italia está decidido a desarrollar la ciencia y la tecnología de la energía de fusión. Bajo la orientación del Ministerio de Medio Ambiente y Seguridad Energética, la Agencia Nacional Italiana de Nuevas Tecnologías, Energía y Desarrollo Económico Sostenible (ENEA) coordina ya a 21 asociados nacionales, entre ellos entidades de investigación, universidades y empresas punteras, para impulsar los avances en la tecnología de fusión. Las empresas italianas han conseguido más de 1500 millones de euros en contratos para el desarrollo de sistemas y componentes para el ITER, lo que incluye la preparación de las operaciones del ITER y sus siguientes fases.

Recientemente, la empresa estatal RSE también empezó a trabajar en el desarrollo de materiales para la fusión por confinamiento inercial; gracias a estos conocimientos especializados, RSE se está consolidando como importante asociado internacional en el desarrollo de la energía de fusión.

Italia alberga varias instalaciones de investigación experimental sobre la fusión, como los centros de investigación de la ENEA en Frascati, cerca de Roma, y en Brasimone, en los Apeninos del norte; el Consorcio RFX en Padua, y el Instituto de Ciencia y Tecnología del Plasma del Consejo Nacional de Investigación (ISTP-CNR) en Milán. Todas estas instalaciones contribuyen notablemente a los avances científicos en la energía de fusión. En el centro de investigación de la ENEA en Frascati se está construyendo la nueva instalación de investigación del Divertor Tokamak Test, como parte de un consorcio público-privado entre la ENEA, la empresa de

energía Eni y diversos institutos y universidades italianos, con el fin de demostrar la tecnología del divertor para futuras instalaciones de fusión.

Eni fue una de las primeras empresas de energía en invertir en la tecnología de fusión y en 2018 se convirtió en accionista estratégico de Commonwealth Fusion Systems, con el objetivo de acelerar la industrialización de la fusión.

Para encontrar soluciones a los desafíos pendientes que plantea demostrar la viabilidad de la energía de fusión, debemos ampliar el alcance de la colaboración internacional mediante la búsqueda de nuevas alianzas para reforzar la investigación y el desarrollo, el fomento de las alianzas público-privadas y la promoción de la innovación y el intercambio de recursos en el desarrollo de la fusión.

A medida que la fusión pasa de ser un proyecto científico a ser una realidad de la industria, y teniendo en cuenta los esfuerzos que aún quedan por hacer para suplir las carencias tecnológicas, es fundamental que sigamos fomentando el clima positivo de colaboración y puesta en común de infraestructuras que ha caracterizado hasta ahora las iniciativas mundiales en el ámbito de la fusión. Hacen falta marcos claros de propiedad intelectual en relación con los procesos y productos de las centrales de fusión que propicien una transferencia eficaz de tecnología y respalden el crecimiento global del mercado de la fusión.

Al mismo tiempo, quisiera insistir en la importancia de elaborar nuevos enfoques reguladores para garantizar un alto grado de seguridad, proporcional a los muy limitados peligros de la fusión. Estos enfoques deberían tener en cuenta la innovación que supone esta tecnología emergente, de manera que las centrales de fusión puedan implantarse y funcionar de forma segura. La colaboración internacional entre los gobiernos, el OIEA y las respectivas autoridades de seguridad es esencial para lograr un enfoque coordinado de la reglamentación entre los países avanzados en la fusión y proporciona al sector de la fusión el nivel de previsibilidad y confianza que necesita.

Gracias a su situación geográfica, Italia podría convertirse en el futuro en un punto nodal en el Mediterráneo para la energía de fusión —como parte del "Piano Mattei", el plan Mattei—, posicionándose como líder a la hora de abordar los desafios regionales de seguridad energética y sostenibilidad y de promover la creación de capacidad. Italia está dispuesta a compartir sus amplios conocimientos generales y especializados para prestar apoyo a países como Argelia, Egipto, Marruecos y Túnez con miras a fomentar la tecnología de fusión. Los programas específicos de formación y desarrollo de la fuerza laboral pueden servir como puntos de partida para el desarrollo de competencias que luego pueden hacerse extensivas a aplicaciones de la fusión.

Italia posee una combinación prácticamente única de competencias científicas, tecnológicas, industriales y de ingeniería, lo que le permite desempeñar un papel preponderante en el desarrollo y la construcción de instalaciones de fusión en el país y en Europa.

Por estos motivos, Italia se enorgullece de ser uno de los coanfitriones de la reunión ministerial inaugural del Grupo Mundial sobre la Energía de Fusión (WFEG). El Grupo actuará como catalizador en este momento decisivo, en el que es esencial aunar esfuerzos para avanzar rápidamente en el desarrollo de la energía de fusión. A medida que la conquista de la energía de

fusión a escala mundial cobra impulso, se hace cada vez más evidente el potencial de esta tecnología para proporcionar una solución energética abundante, limpia y sostenible para el futuro, como reconoce también el G7. Los recientes avances en el ámbito de la fusión han captado gran interés e inversiones de un amplio abanico de partes interesadas.

La reunión inaugural del WFEG en Italia, de cara a la conferencia sobre el cambio climático COP29, representa un momento crucial en la búsqueda mundial de soluciones energéticas avanzadas. La reunión tiene como objetivo maximizar el impacto y la visibilidad del debate sobre la energía de fusión dentro del marco más amplio de las negociaciones internacionales relacionadas con el clima. El WFEG no solo hará hincapié en la importancia de los avances científicos en la energía de fusión, sino que también facilitará la cooperación internacional y las inversiones en esta tecnología transformadora, con el objetivo de desempeñar un papel crucial en la configuración del futuro de la energía para garantizar que se cumplan los objetivos climáticos mundiales y velar por la producción energética sostenible a largo plazo.

Italia espera promover la energía de fusión a nivel mundial y se compromete a apoyar y financiar la labor de investigación e innovación en este sector. El dinámico programa de energía de fusión de Italia contará con la participación de numerosas organizaciones de investigación, el sector académico e industrias de ese país, así como con actividades de colaboración internacional con el OIEA.

Italia celebra y seguirá promoviendo enérgicamente la labor del OIEA y sus Estados Miembros en el ámbito de la energía de fusión.■

Perspectivas del OIEA sobre la fusión en el mundo 2024 fue un proyecto coordinado por Sayed Ashraf.

Matteo Barbarino dirigió la elaboración de esta publicación.

Colaboradores en la redacción y la revisión

Anikeev, A. Corporación Estatal de Energía Atómica Rosatom (Federación de Rusia)

Artisiuk, V. Organismo Internacional de Energía Atómica
Ascic, M. Organismo Internacional de Energía Atómica
Ashraf, S. Organismo Internacional de Energía Atómica
Barbarino, M. Organismo Internacional de Energía Atómica
Barton, J. Helion Energy (Estados Unidos de América)
Bellehumeur, C. Stellarex (Estados Unidos de América)

Catena, G. Gauss Fusion (Alemania)

Chae Kim, W. Instituto de Energía de Fusión de Corea (República de Corea)Cheong, C. Autoridad de Energía Atómica del Reino Unido (Reino Unido)

Donovan, J. Organismo Internacional de Energía Atómica

Federici, G. EUROfusion (Alemania)

Finnerty, M. Organismo Internacional de Energía Atómica

Ganzarski, N. nT-Tao (Israel)

Goodman, A. TAE Technologies (Estados Unidos de América)

Jasper, A. Zap Energy (Estados Unidos de América)

Johnson, D. General Fusion (Canadá)

Kaneko, T. Organismo Internacional de Energía Atómica

Ma, T. Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (Estados Unidos de América)

Paluska, J. Commonwealth Fusion Systems (Estados Unidos de América)

Sciortino, F. Proxima Fusion (Alemania)

Solomon, W. General Atomics (Estados Unidos de América)

Strömstedt, L. Novatron Fusion Group (Suecia)

Subbiah, I. Commonwealth Fusion Systems (Estados Unidos de América)
 Surrell, J. Longview Fusion Energy Systems (Estados Unidos de América)

Wagner, R. Organismo Internacional de Energía Atómica

White, S. Tokamak Energy (Reino Unido)

Wurzel, S. Fusion Energy Base (Estados Unidos de América)

Yoshimura, N. Helical Fusion (Japón)

Yoshiteru, S. Institutos Nacionales de Ciencia y Tecnología Cuánticas (Japón)

Zhuang, G. Universidad de Ciencia y Tecnología de China (China)

Esta publicación recibió un valioso apoyo del Gobierno del Japón.

Avances en a materia de fusión

Centrales de fusión

Contexto y 29 escenarios

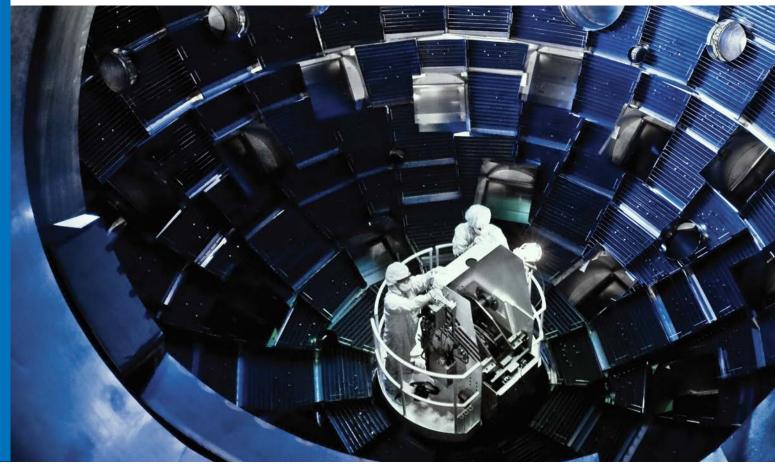
Perspectivas

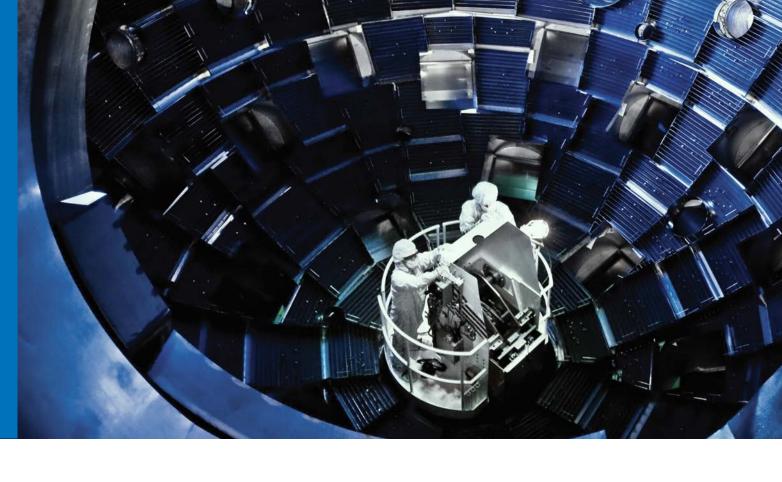
La fusión 63 en cifras

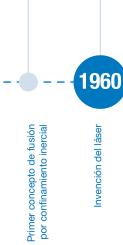
AVance

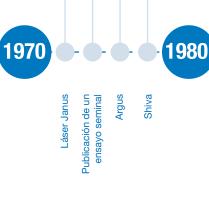
REAL COMPANY OF THE PROPERTY O

Últimos avances y descubrimientos













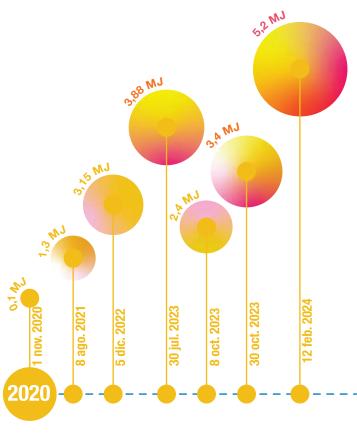


La Instalación Nacional de Ignición (NIF) repite la ignición cuatro veces

Prosiguen los avances en la Instalación Nacional de Ignición (NIF)

Desde el gran avance que supuso la ignición en la energía de fusión en diciembre de 2022 [1], los investigadores del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (Estados Unidos de América) han replicado con éxito este logro al menos cuatro veces. La ignición se repitió en cuatro experimentos posteriores realizados en 2023 y principios de 2024. El más reciente produjo un rendimiento récord de 5,2 MJ y una ganancia superior a 2.

La NIF en el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore de los Estados Unidos de América (cortesía del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, Estados Unidos de América).



2000

Operaciones de la NIF (1,9 MJ)

2010

Plasma en condiciones de

La ignición según el criterio de Lawson Ganancia del blanco 1,5

Ganancia del blanco ~2

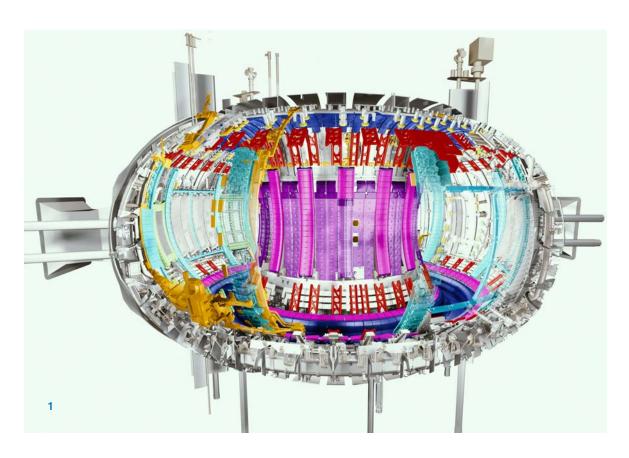
Ganancia del blanco 1,3

Ganancia del blanco 1,5

Ganancia del blanco >2

inancia dei bianco

3





El Toro Europeo Común (JET) logra un récord mundial y comienza su clausura

Tras 40 años de operación y los experimentos finales de deuteriotritio realizados en 2023, se ha iniciado la clausura del Toro Europeo Común (JET), que se extenderá hasta aproximadamente 2040. La clausura del JET proporcionará información valiosa a la comunidad de fusión, ya que posibilitará el análisis del modo en que los materiales del interior de la vasija han cambiado durante el tiempo de operación.

En los experimentos finales realizados en diciembre de 2023, el JET logró un hito revolucionario [2]. Los científicos establecieron un récord mundial al mantener una fusión sostenida durante 5 segundos, lo que generó 69 MJ de energía con una cantidad mínima de combustible. Exploraron técnicas innovadoras, como invertir la forma del plasma para mejorar su confinamiento. Además, dirigieron intencionalmente a la pared interior un haz de electrones de alta energía, producido durante las disrupciones del plasma, para lograr un mayor entendimiento del control del haz y los mecanismos de deterioro.

¹ Vista de los cables, componentes y sistemas que se encuentran en el interior de la vasija del JET (cortesía de la Autoridad de Energía Atómica del Reino Unido (UKAEA), Reino Unido).



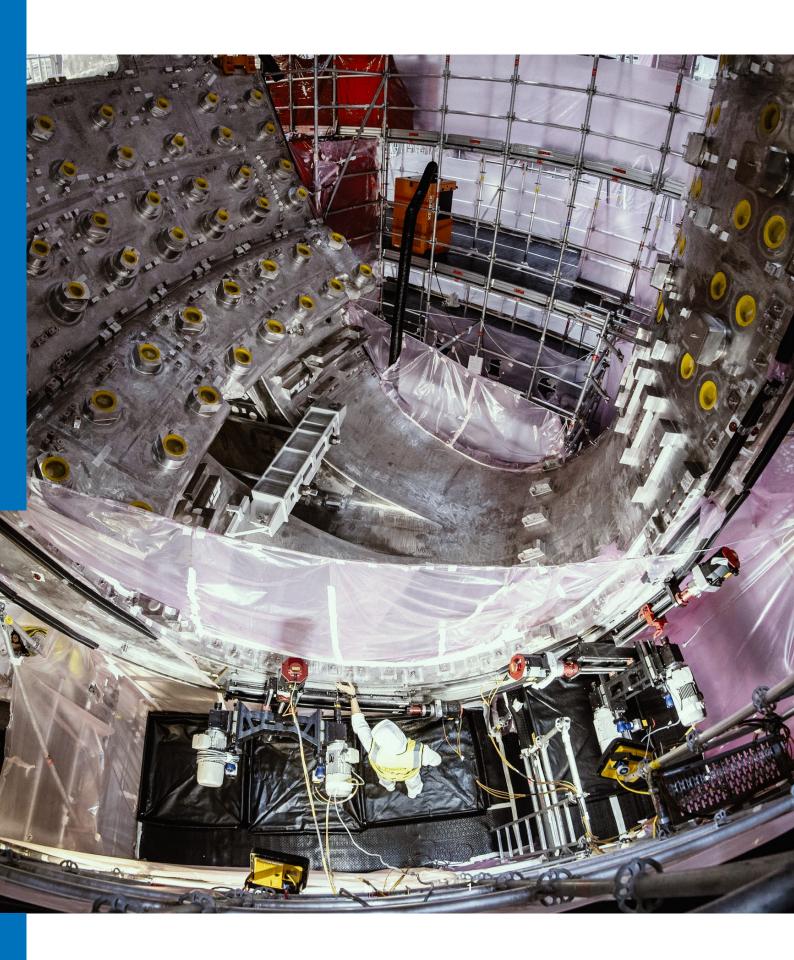
² Vista aérea del emplazamiento del ITER en julio de 2024 (cortesía del ITER, Francia).



El ITER avanza hacia una nueva hoja de ruta

El proyecto ITER ha pasado por un período de transición y ahora avanza hacia una nueva hoja de ruta. Las reparaciones de los componentes clave progresan según lo previsto. Se ha seguido avanzando en la construcción, la fabricación, el montaje y la puesta en servicio del sistema. Tras más de un año de examen, en junio de 2024 se presentó al Consejo del ITER una nueva propuesta de referencia, que ahora sirve como calendario de trabajo de base.

El descubrimiento y el análisis de discrepancias geométricas en las juntas biseladas de varios sectores de la cámara de vacío, así como de fisuras por corrosión de cloruros en las tuberías de refrigeración de los blindajes térmicos, hicieron que se retrasara el montaje del tokamak del ITER mientras se realizaban las reparaciones. Paralelamente, un análisis de causa básica, que comprendió un autoexamen de la cultura de la calidad del proyecto, motivó una reorganización con miras a estar preparados para los desafíos futuros. Se han mantenido amplias conversaciones con la Autoridad de Seguridad Nuclear de Francia para mejorar la demostración de la seguridad que trae aparejada el proceso de concesión de licencia del ITER. Entretanto, se han instalado y, en gran medida, puesto en servicio los sistemas de suministro eléctrico, la planta criogénica y el sistema de agua de refrigeración. Se han entregado todas las bobinas de campo poloidal hhy toroidal, así como la mayoría de los módulos del solenoide central y otros componentes principales.





La tarea más importante del último año ha consistido en canalizar estos elementos en una hoja de ruta del proyecto actualizada y realista.

Las fases de montaje y operación previstas anteriormente se han consolidado en la propuesta resultante. Los riesgos técnicos y operativos se mitigan incorporando en una máquina más completa, antes de la operación inicial, el divertor, los bloques de blindaje, un primer muro de sacrificio y otros componentes que reducen el riesgo, así como probando íntegramente algunas bobinas de campo toroidal y poloidal antes de instalarlas.

El inicio de las operaciones de investigación en 2034 inaugurará un período de 27 meses de importante experimentación con plasmas de hidrógeno y deuterio-deuterio, que culminará en 2036 con la operación del tokamak en pulsos largos a plena energía magnética y corriente del plasma (15 MA).

El comienzo de la fase de operaciones de investigación demostrará en gran medida la integración de sistemas necesaria para las operaciones de fusión a escala industrial. El inicio de la fase de operaciones con deuterio-tritio se retrasará cuatro años, de 2035 a 2039, con respecto a lo planificado anteriormente.



2034 inicio de los experimentos con plasma de hidrógeno y plasma de deuterio-deuterio



2036 comienzo de la operación con pulsos largos a plena energía magnética y corriente del plasma



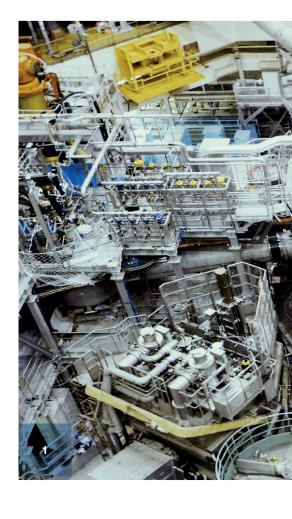
2039 inicio de las operaciones con deuterio-tritio

La metrología está desempeñando un papel fundamental en la reparación de algunos sectores de la cámara de vacío del ITER, entre otras cosas en lo que atañe al posicionamiento, con precisión micrométrica, de las fresadoras encargadas de cortar al ras el material sobrante y devolver el componente a su valor nominal (cortesía del ITER, Francia).

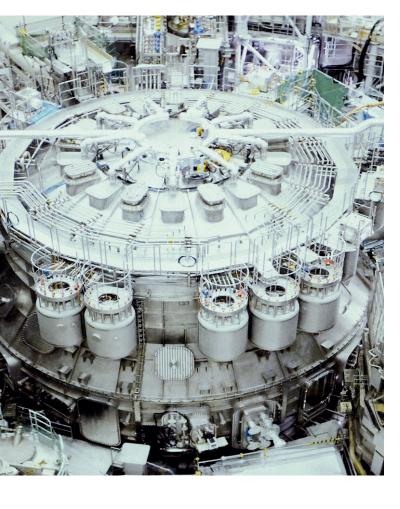
Más avances desde la primera edición de *Perspectivas del OIEA* sobre la fusión en el mundo

El tokamak JT-60SA produjo su primer plasma [3]. Esta máquina de cuatro plantas de altura está diseñada para albergar plasma calentado hasta los 200 millones de grados Celsius durante unos 100 segundos, bastante más tiempo que los tokamaks anteriores de grandes dimensiones. Los plasmas del JT-60SA se parecerán mucho a los previstos para el ITER y deberían permitir a los físicos estudiar la estabilidad del plasma y la manera como esta afecta a la potencia de salida de fusión en períodos prolongados, lo que proporcionará datos útiles que se pueden aplicar a futuros tokamaks. Por su parte, en el Japón se ha instalado en Rokkasho el prototipo de acelerador lineal de la Instalación Internacional de Irradiación de Materiales de Fusión (IFMIF).■

El tokamak EAST de China logró una operación prolongada de plasma de alto confinamiento en estado estacionario durante 403 segundos [4]. Con este logro se superó el récord original de 101 segundos alcanzado por el EAST en 2017. La temperatura y la densidad de las partículas se incrementaron mucho durante la operación de plasma de alto confinamiento, lo que aumentará la eficiencia de la generación de electricidad de las futuras centrales de fusión. También en China, el tokamak HL-3 operó por primera vez en modo de alto confinamiento con una corriente plasmática de un millón de amperios, gracias a la mejora de los sistemas de calefacción, operación, control, diagnóstico y suministro de energía eléctrica.



Investigadores del Instituto de Energía de Fusión de Corea, que trabajan en el tokamak superconductor avanzado de investigación de Corea (KSTAR), lograron un récord al alcanzar una temperatura de 100 millones de grados Celsius durante 48 segundos y mantener un modo de alto confinamiento del plasma durante más de 100 segundos. Este logro sigue al anterior hito de mantener un alto confinamiento del plasma durante 30 segundos en 2021, lo que supone un avance significativo en la investigación de la energía de fusión. El KSTAR apunta a mantener durante 300 segundos temperaturas de plasma de 100 millones de grados de aquí a 2026. En consonancia con la decisión del ITER de sustituir el divertor de berilio por uno de tungsteno, el KSTAR funciona ahora con un divertor de tungsteno.

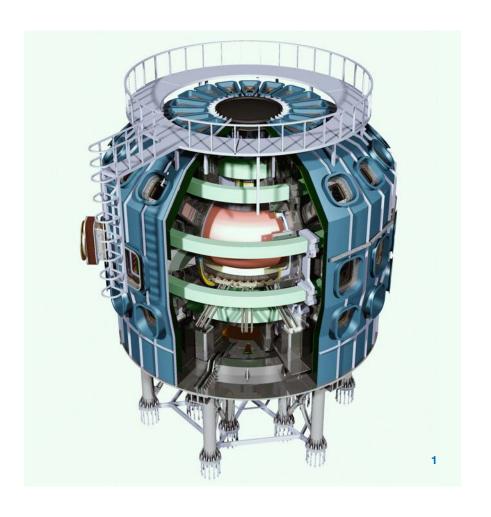








- 1 El JT-60SA es el mayor tokamak en funcionamiento, diseñado y construido conjuntamente por el Japón y la Unión Europea (cortesía de los Institutos Nacionales de Ciencia y Tecnología Cuánticas del Japón).
- 2 El tokamak KSTAR en el Instituto de Energía de Fusión de Corea (cortesía del Instituto de Energía de Fusión de Corea, República de Corea).
- 3 El Director General del OIEA, Rafael Mariano Grossi, visita el prototipo de acelerador lineal IFMIF en el Instituto de Fusión de Rokkasho durante su visita al Japón (cortesía de los Institutos Nacionales de Ciencia y Tecnología Cuánticas del Japón).
- 4 Interior del tokamak EAST (cortesía del Instituto de Física del Plasma de la Academia China de Ciencias, China).





En Italia se siguió avanzando en la construcción de la instalación del Divertor Tokamak Test (DTT), un nuevo tokamak superconductor destinado al estudio de soluciones avanzadas de divertores para centrales de fusión. El consorcio que ejecuta el proyecto (Consorcio DTT), conformado por muchas instituciones de investigación italianas y asociados internacionales, entre los que figura una de las mayores empresas de energía del mundo, ha recaudado casi 500 millones de euros para construir la instalación. La misión principal del DTT es estudiar y poner a prueba la física y la tecnología de conceptos para la descarga de energía del plasma que se podrían utilizar en la central europea de demostración (EU-DEMO).

Al igual que KSTAR, el tokamak WEST de Francia, ubicado en el emplazamiento de la Comisión de Energía Atómica y Energías Alternativas de Cadarache, también ha comenzado a operar eficazmente con un divertor de tungsteno. Durante la campaña experimental inicial se produjo una alta fluencia neutrónica en una serie de pulsos de plasma de una duración aproximada de un minuto cada uno, lo que demostró la durabilidad y el rendimiento de este nuevo componente. Además, en un esfuerzo colectivo, investigadores de la Comisión de Energía Atómica y Energías Alternativas y del Laboratorio de Física del Plasma de Princeton, en los Estados Unidos de América, lograron un importante hito

al mantener el plasma de fusión a unos 50 millones de grados Celsius durante un tiempo récord de seis minutos [5]. Este avance, que supuso inyectar un 15 % más de energía y duplicar la densidad del plasma con respecto a tentativas anteriores, pone de relieve el potencial de los dispositivos de fusión con revestimiento de tungsteno para futuras centrales de fusión.





- 1 Visualización de la instalación DTT (cortesía del Consorcio DDT, Italia)
- 2 El tokamak WEST equipado con un divertor de tungsteno refrigerado activamente (cortesía de la Comisión de Energía Atómica y Energías Alternativas, Francia).





La instalación nacional de fusión de los Estados Unidos de América, DIII-D, explotada por General Atomics para el Departamento de Energía de los Estados Unidos, ha finalizado importantes actualizaciones, entre ellas nuevos sistemas de control del plasma, herramientas avanzadas de diagnóstico, sistemas mejorados de calentamiento y de generación de corriente y mejoras en el sistema del divertor. Estas mejoras dotan a DIII-D de herramientas avanzadas para operar de forma coherente con las necesidades de una central de fusión. Justo antes de la actualización, los experimentos en DIII-D lograron una combinación



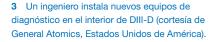


de alta densidad y alto confinamiento del combustible que nunca se había conseguido en forma simultánea [6]. Este régimen de operación es compatible con los requisitos esenciales de muchos diseños de centrales de fusión de todo el mundo y abre una posible vía para producir energía de fusión atractiva desde el punto de vista económico. Además, en los experimentos realizados en DIII-D los investigadores del Laboratorio de Física del Plasma de Princeton demostraron que el modelo de inteligencia artificial (IA) que utilizan, entrenado únicamente con datos experimentales del pasado, podía prever con una anticipación

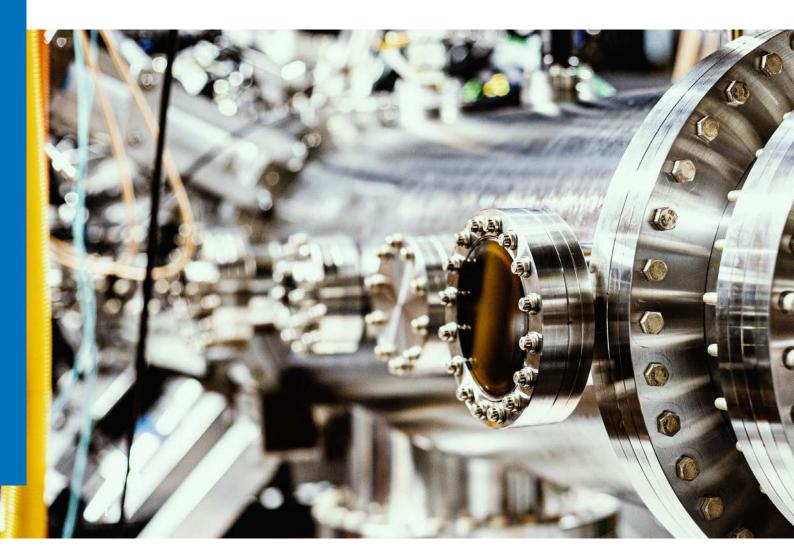
de hasta 300 milisegundos posibles inestabilidades del plasma, conocidas como inestabilidades de modo *tearing* [7]. El controlador de IA logró predecir y evitar las inestabilidades antes de que aparecieran, allanando así el camino para un controlador que pudiera mantener un régimen de plasma estable y de alta potencia en tiempo real en las centrales de fusión.

En Commonwealth Fusion Systems (CFS) los avances han sido constantes en las obras de construcción de SPARC, un tokamak planificado para generar una ganancia neta de energía científica.

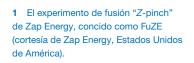
La llegada de la cámara de vacío supuso un hito importante. Se prevé que SPARC entre en funcionamiento en 2025 y demuestre una ganancia neta de energía científica. Está previsto que ARC, el proyecto sucesor de SPARC, esté terminado a mediados de la década de 2030, y tendrá por objeto demostrar la producción de electricidad.











2 Interior del tokamak HH70, que empezó a operar en junio de 2024 (cortesía de Energy Singularity, China).



El experimento de fusión de Zap Energy "Z-pinch", conocido como FuZE, ha alcanzado temperaturas de los electrones del plasma que oscilan entre 1 y 3 keV [8] y superan los 10 millones de grados Celsius. El rendimiento de esta máquina ha avanzado hasta alcanzar un nivel comparable al de los principales dispositivos experimentales de fusión del mundo. Al mismo tiempo, se está desarrollando una central de fusión basada en esta misma tecnología.

El HH70, novedoso tokamak superconductor de alta temperatura (HTS) desarrollado por Energy Singularity, ha logrado su primer plasma. Este dispositivo cuenta con un campo magnético toroidal de 0,6 T y un radio mayor que mide 0,75 m y con un sistema de 26 imanes HTS. De cara al futuro, Energy Singularity está planificando el HH170, un tokamak HTS de alto campo de próxima generación cuyo objetivo es alcanzar una ganancia de energía equivalente al deuterio-tritio superior a 10.

Central fusion

Existen al menos 20 conceptos de centrales de fusión en diversas etapas de desarrollo en Alemania, el Canadá, China, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Israel, el Japón, el Reino Unido, la República de Corea y Suecia, con fechas de conclusión que van desde finales de la década de 2020 hasta mediados de la década de 2050.

Estos conceptos están siendo desarrollados por Gobiernos, empresas privadas y algunas empresas conjuntas de carácter público-privado.

CRITERIOS PARA LOGRAR UNA CENTRAL PILOTO DE FUSIÓN EFICAZ [9, 10]

Categoría	Criterios
Rendimiento de la potencia de fusión y de la energía eléctrica	 Potencia térmica neta de fusión promediada en el tiempo de 100 a 500 MW ≥50 MW(e) de generación máxima de electricidad Q_e>1 Operación durante varios ciclos ambientalesª
Componentes	 Estrategia, costo y calendario para la retirada y la sustitución de componentes degradados como característica de diseño
Combustible y cenizas	 6. El concepto de eliminación de cenizas puede ampliarse para la primera central de fusión de una serie 7. Componentes expuestos al plasma que pueden soportar daños causados por las cenizas de helio en un entorno representativo de la primera de una serie de centrales de fusión 8. Tasa de reproducción de tritio >0,9 9. Inventario de tritio ≤1 kg 10. Innovaciones en la ciencia de la frontera del plasma, las tecnologías de alimentación de combustible y el procesamiento de gas 11. Rendición de cuentas respecto del tritio claramente definida junto con métodos analíticos que permitan cumplir los requisitos de rendición de cuentas
Fiabilidad y disponibilidad	12. Realizar tareas de mantenimiento a distancia y de sustitución13. Componentes modulares y sustituibles
Aspectos ambientales y de seguridad	 14. Mitigación de la emisión de tritio 15. Reducir al mínimo el volumen de desechos y los peligros en general y evitar todo lo posible los desechos de clases superiores a C 16. Clausura de desechos activados
Aspectos económicos	17. El costo de construcción inmediato no supera los 5000-6000 millones de dólares de los Estados Unidos

^a Un ciclo ambiental en una central de fusión comprende la instalación de componentes del núcleo, la operación de la central hasta que esos componentes se degraden y la realización ulterior de tareas de mantenimiento para dar continuidad a las operaciones. Si bien la duración de este ciclo no está definida con precisión y puede variar según el diseño, podría transcurrir un año de operación a potencia máxima antes de que hubiera que realizar tareas de mantenimiento o reparación en la primera de una serie de centrales de fusión.

Nota: Los criterios señalados en gris corresponden a las centrales de fusión basadas en deuterio-tritio

Central de General Fusion (General Fusion, Canadá)

El objetivo de General Fusion es construir la primera central de fusión de blanco magnetizado del mundo entre principios y mediados de la década de 2030. Debido a un revestimiento de metal líquido en la máquina de fusión comprimido mecánicamente por una serie de pistones, las condiciones de fusión se crean mediante pulsos cortos y no creando un proceso sostenido. Con este singular diseño, que no requiere imanes superconductores ni un conjunto de láseres, se procura resolver cuestiones como la degradación de los materiales, la producción de combustible, la captura de energía y los obstáculos relacionados con los costos de comercialización. Con el diseño actual, una central de General Fusion produciría unos 300 MW(e) a partir de dos máquinas de 150 MW que funcionarían en tándem para suministrar electricidad con cero emisiones de carbono a un costo competitivo.



2030

Sistemas de fusión eléctrica



Avalanche Energy, Blue Laser Fusion, Helion Energy, Kyoto Fusioneering, LPPFusion, Magneto Inertial Fusion Technologies, nT-Tao, Openstar Technologies, Princeton Fusion Systems

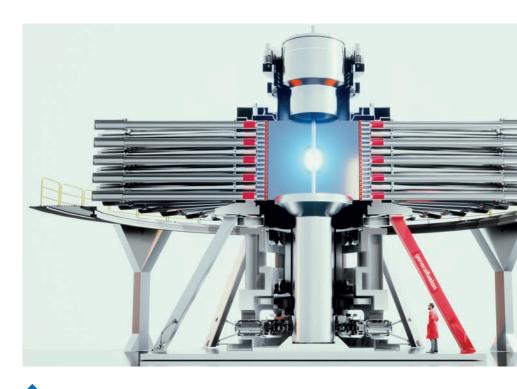


Acceleron Fusion, Commonwealth Fusion Systems, Deutelio, Ex-Fusion, First Light Fusion, Fuse, General Atomics, General Fusion, HB11 Energy, Helical Fusion, Longview Fusion Energy Systems, Marvel Fusion, Nearstar Fusion, NK Labs, Novatron Fusion Group, Openstar Technologies, Proxima Fusion, Realta Fusion, Renaissance Fusion, Stellarex, TAE Technologies, Terra Fusion Energy Corporation, Thea Energy, Tokamak Energy, Type One Energy Group, Xcimer Energy, Zap Energy



En enero de 2024 los resultados examinados por homólogos confirmaron que General Fusion puede producir la compresión uniforme, rápida y simétrica de una cavidad líquida necesaria para una central comercial. En marzo de 2024 la empresa también logró avances en la modelización del revestimiento de metal líquido en una máquina comercial desarrollando un código propietario, que permite poner a prueba diversos diseños y configuraciones para una central.

General Fusion está construyendo una máquina experimental de fusión llamada Lawson Machine 26 (conocida como LM26) con el objetivo de lograr avances técnicos que reduzcan los riesgos y aceleren el camino hacia la construcción de una central. El LM26 está diseñado para lograr condiciones de fusión de más de 100 millones de grados Celsius en 2025 y energía científica neta en 2026. Los datos recopilados con el LM26 se incorporarán al diseño de la máquina a escala comercial prevista por la empresa.



Concepto de lo que podría ser un LM26 (cortesía de General Fusion, Canadá).





































China Fusion Engineering Test Reactor (consorcio chino, China)

El China Fusion Engineering Test Reactor (CFETR) es un concepto de central de fusión basado en un diseño de tokamak convencional, que actualmente está desarrollando un consorcio nacional en China. El CFETR es el siguiente dispositivo en la hoja de ruta para la materialización de la energía de fusión en China. Está previsto que la construcción concluya en 2040. Se espera del CFETR que salve las distancias entre el ITER y una central de fusión y demuestre, además, una ganancia neta de electricidad y un factor de utilización de 0.5. Las actividades de investigación del CFETR y su plan de desarrollo constarán de dos fases. Durante la primera fase la labor se centrará en lograr un régimen de operación en estado estacionario y demostrar la autosuficiencia con respecto al tritio con una potencia de fusión de hasta 200 MW. En esta fase se abordarán cuestiones relacionadas con la investigación y el desarrollo de la física del plasma en condiciones de quemado para determinar la viabilidad de la operación avanzada en estado estacionario. La segunda fase se centrará en validar la tecnología de importancia para las centrales con una potencia de fusión superior a 1 GW. Un producto clave de la segunda fase es la creación de una base de datos RAMI¹ para el diseño de una central comercial. Algunas características conceptuales del CFETR son: un radio mayor que mide 7,2 m, un radio menor que mide 2,2 m, una elongación del plasma de κ_{oc} =2, una corriente del plasma de 14 MA, un campo magnético en el eje de 6,5 teslas, beta normalizado $\beta_{\rm N}$ =2,3 y una ganancia de energía científica prevista de Q = 20.■

EU-DEMO (EUROfusion, UE)

EU-DEMO es un concepto de central de fusión basado en un diseño de tokamak convencional que EUROfusion está desarrollando en Europa. Se prevé que EU-DEMO será la instalación que siga al ITER en la hoja de ruta europea hacia la obtención de electricidad a partir de la fusión. El proyecto se encuentra actualmente en la fase de diseño conceptual y se prevé que empiece a funcionar para 2050. EU-DEMO tiene por objetivo demostrar la viabilidad tecnológica y económica de la energía de fusión produciendo unos 500 MW(e) de electricidad neta, y lograr la autosuficiencia con respecto al tritio. Se están estudiando varias opciones de diseño, que afectarán a varias tecnologías de la central, como la configuración del divertor y las soluciones para el manto reproductor, entre otras. El diseño preconceptual de EU-DEMO prevé un radio mayor que mida ~9 m y una potencia de fusión de ~2 GW. Actualmente la atención se centra en reducir al mínimo el tamaño de la máquina y los riesgos técnicos para propiciar un despliegue más temprano.

Gauss GIGA (Gauss Fusion, Alemania)

El objetivo de Gauss Fusion es diseñar y desarrollar, para 2045, Gauss GIGA, una central de fusión eléctrica

de tipo GW basada en diseños de estelarátor. Este proyecto se llevará a cabo mediante una alianza público-privada con instituciones nacionales y europeas. El diseño base actual presenta una razón de aspecto relativamente alta y una sección transversal similar a la del ITER, lo que permite utilizar imanes y cámaras de vacío que forman parte de las capacidades de producción, transporte e instalación de la industria.

Gauss Fusion planea acelerar el despliegue evitando la necesidad de dispositivos intermedios experimentales o de demostración. Esto se logrará impulsando un proceso de puesta en servicio en varias fases para la primera de esta serie de centrales de fusión. Está previsto que la puesta en servicio se lleve a cabo por etapas, cada una de ellas diseñada para recopilar el máximo de datos y posibilitar ampliaciones y mejoras operativas continuas. El proceso comenzará con un dispositivo inicial para plasma, seguido de la demostración de un sistema de mantenimiento a distancia, para pasar después a una máquina que pueda utilizar tritio y, por último, incorporar un ciclo de combustible totalmente continuo y la generación de electricidad.

Se prevé que este enfoque gradual permita disociar los plazos de desarrollo de la tecnología del ajuste de los parámetros, los sistemas de diagnóstico y los sistemas de control. Además, facilitaría la recopilación de datos sobre materiales críticos.

Central de Proxima Fusion (Proxima Fusion, Alemania)

Proxima Fusion se centra en los estelarátores cuasiisodinámicos de alto campo que utilizan tecnología de imanes HTS. Los conceptos de la central de fusión de la empresa provienen del innovador estelarátor Wendelstein 7-X (W7-X), ubicado en Alemania, en el que se han desarrollado por primera vez los principios de la optimización cuasi-isodinámica y el método para la extracción del calor de las islas magnéticas alrededor del plasma. Los diseños de las centrales de Proxima Fusion se basan en la tecnología HTS para alcanzar amplitudes de campo magnético inaccesibles para los imanes superconductores tradicionales (de baja temperatura) y utilizan el diseño computacional integrado para superar antiguos límites de ingeniería en las estructuras de base. Los diseños de estelarátores cuasi isodinámicos de Proxima Fusion se basan en el calentamiento por resonancia ciclotrónica electrónica de alta frecuencia y en mantos reproductores de litio-plomo refrigerados por agua.

Máquina Tao (nT-Tao, Israel)

nT-Tao es una empresa emergente israelí que trabaja en el diseño de una central de fusión del tamaño aproximado de un contenedor de transporte. El sistema podría suministrar de 10 a 20 MW de potencia a una red existente o servir de solución energética remota, independiente y ampliable. nT-Tao prevé lograr un diseño de prototipo comercial para finales de esta década. La solución de nT-Tao se basa en un método patentado de calentamiento del plasma basado en pulsos y una topología de cámara magnética basada en

¹ RAMI es el acrónimo de *reliability, availability, maintainability and inspectability* (confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad e inspeccionabilidad). Describe un proceso cuyo objetivo principal es garantizar que todos los sistemas de la central de fusión sean fiables durante la fase de operación y mantengan su rendimiento en condiciones operativas con la mejor disponibilidad posible.

un toro estabilizado dinámicamente. El enfoque de nT-Tao tiene por objeto reducir el tamaño de la máquina, lo que permitiría realizar iteraciones de desarrollo rápidas, abaratar costos y reducir la complejidad del diseño.

Central de fusión de Helical Fusion (Helical Fusion, Japón)

Helical Fusion tiene como objetivo desarrollar para 2034 una central de fusión que opere en estado estacionario, la cual prevé comercializar en la década de 2040. La central se basa en una configuración de heliotrón que presenta dos bobinas helicoidales e incropora tecnologías de conductores HTS y de mantos de metal líquido. El conductor HTS flexible de alta densidad de corriente permite la construcción de bobinas helicoidales compactas. El manto de metal líquido protege todas las paredes expuestas al plasma y posibilita una generación de electricidad altamente eficiente. Además, el diseño en heliotrón requiere un mantenimiento estructural más simple que el de los otros estelarátores, lo que lo hace particularmente eficaz para su comercialización. Gracias a estas innovaciones se puede crear una central de fusión compacta con una producción eléctrica de entre 50 y 100 MW(e).

JA-DEMO (consorcio japonés, Japón)

JA-DEMO es un concepto de central de fusión que se está desarrollando en el Japón basado en el diseño de un tokamak convencional. Los objetivos de JA-DEMO son lograr una producción eléctrica constante y estable de más de 100 MW(e), la autosuficiencia con respecto al tritio y la disponibilidad de centrales que permitan acortar la distancia hacia la comercialización de la energía de fusión. Entre los principios básicos de JA-DEMO se encuentra la demostración de la viabilidad tecnológica, basada en el diseño de los componentes del ITER, y la garantía de la flexibilidad operativa, que va desde las operaciones pulsadas (aproximadamente 2 horas) hasta las operaciones en estado estacionario. Está previsto que la construcción de JA-DEMO concluya en 2045 y que poco después se demuestre la generación de energía eléctrica mediante un régimen de operación pulsada. El objetivo de la segunda fase es alcanzar el régimen de operación en estado estacionario para 2055. Algunas características conceptuales del JA-DEMO son: una potencia de fusión de 1,5 GW, un radio mayor que mide 8,5 m, un radio menor que mide 2,42 m, una elongación del plasma de κ_{q_5} =1,65, una corriente del plasma de 12,3 MA, un campo magnético en el eje de 5,94 T, beta normalizado β_N =3,4, una potencia de generación de corriente de 83,7 MW y una ganancia de energía científica prevista de $Q_{sci}=17,5$.

K-DEMO (consorcio coreano, República de Corea)

K-DEMO es un concepto de central de fusión que se está desarrollando en la República de Corea basado en el diseño de un tokamak convencional. El diseño conceptual de K-DEMO presenta un radio mayor que mide 6,8 m, un radio menor que mide 2,1 m, un campo toroidal de unos 7 T (con superconductores de baja temperatura) y una corriente del plasma superior a 12 MA. Está previsto que

el diseño de ingeniería de K-DEMO esté terminado en 2035. Recientemente se ha prestado especial atención al espacio de diseño, que se ha estudiado utilizando recursos de supercomputación para investigar parámetros globales. Además del concepto básico, también se está investigando una segunda vía que implica un diseño más pequeño y más avanzado con imanes superconductores de alta temperatura.

DEMO-RF (consorcio ruso, Federación de Rusia)

DEMO-RF es un concepto de central de fusión que un consorcio nacional está desarrollando en la Federación de Rusia sobre la base de un diseño de tokamak convencional. Está previsto que la construcción de DEMO-RF finalice en 2055 con el objetivo de demostrar una ganancia neta de electricidad a partir de entonces. Las características de DEMO-RF están en fase de desarrollo. Actualmente el diseño conceptual prevé el uso de la instalación como una central de energía de fusión pura o como reactor híbrido de fusión-fisión con imanes HTS y un campo magnético total superior a 8 T y una corriente del plasma de unos 5 MA. Para la primera pared y el divertor se está estudiando la posibilidad de utilizar componentes expuestos al plasma fabricados con metal líquido. Además, la Federación de Rusia prevé desarrollar un reactor híbrido de fusión-fisión conocido como DEMO Fusion Neutron Source. Este reactor no solo tiene por objeto generar energía a partir de la fusión, sino también utilizar los neutrones producidos para convertir uranio no fisible en material nuclear fisible o transmutar desechos radiactivos de período largo. DEMO Fusion Neutron Source, cuya finalización está prevista para 2033, es un componente clave de la estrategia acelerada de la Federación de Rusia para lograr la energía de fusión de aguí a 2050.

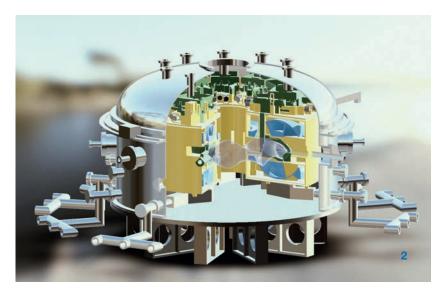
N4 (Novatron Fusion Group, Suecia)

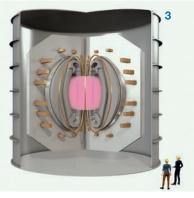
Novatron Fusion Group está desarrollando un concepto de central de fusión basado en un diseño de espejo magnético convencional. La hoja de ruta de la empresa comprende el desarrollo de dos máquinas experimentales (N1 y N2), una central de demostración precomercial (N3) y la primera de una serie de centrales de fusión (N4). Actualmente están avanzando hacia una prueba del concepto en relación con N1, con el objetivo de obtener de N4 1,5 GW(e) a finales de la década de 2030. N4 está diseñada para operar en estado estacionario con suministro continuo de combustible y descarga de gases de combustión, lo que posibilita la conversión directa de partículas ionizadas en electricidad. Además, N4 puede equiparse con tecnología de imanes HTS para mejorar aún más su rendimiento y eficiencia.

Central piloto de energía de fusión de Tokamak Energy (Tokamak Energy, Reino Unido)

Con su central piloto de fusión, Tokamak Energy tiene el objetivo de integrar, probar y demostrar todos los sistemas necesarios para las centrales de fusión comerciales posteriores. Está diseñado como un tokamak de baja razón de aspecto, con imanes HTS (óxido de cobre y bario de tierra rara) de campo toroidal, y su objetivo es demostrar pulsos sostenidos de plasma en condiciones de quemado con producción de energía neta. Un grupo internacional integrado por colaboradores de los Estados Unidos de América y del Reino Unido está a cargo del diseño y el desarrollo de este proyecto en el marco del Programa para el Desarrollo de la Fusión Basado en Hitos, del Departamento de Energía de los Estados Unidos.









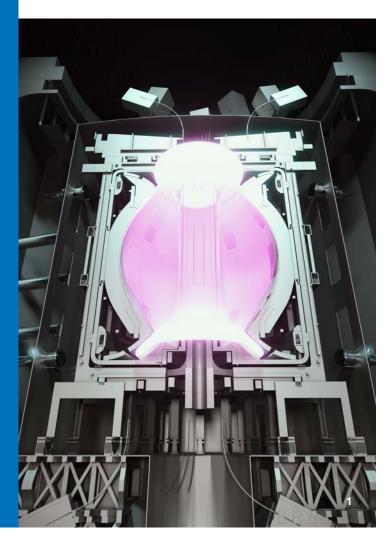




(cortesía de Tokamak Energy, Reino Unido).

4 Concepto de central de fusión N4 de Novatron (cortesía de Novatron, Suecia).

5 Concepto JA-DEMO (cortesía de los Institutos Nacionales de Ciencia y Tecnología Cuánticas del Japón).





STEP (UK Industrial Fusion Solutions, Reino Unido)

El objetivo del prototipo de central de fusión STEP es demostrar la energía neta, la autosuficiencia con respecto al combustible y una vía hacia la potencia de fusión comercial, y está previsto que las primeras operaciones tengan lugar en 2040 [11]. El grupo del STEP ha utilizado una metodología de diseño basada en conjuntos digitales, que se ha sometido a múltiples exámenes del nivel de madurez del concepto y a varias evaluaciones de grupos asesores técnicos independientes. El diseño del concepto logra un cuidadoso equilibrio entre el rendimiento, el costo, el tamaño y el riesgo, y está previsto que el diseño de ingeniería detallado comience en 2025. UK Industrial Fusion Solutions —filial de propiedad absoluta del grupo UKAEA será la responsable de suministrar el STEP y dirigirá una alianza público-privada para diseñar y construir la central, que se ubicará en West Burton, el antiguo emplazamiento de una central eléctrica alimentada con carbón situado en el norte de Inglaterra. Además de la central, la misión del STEP incluye el desarrollo de una cadena de suministro de fusión líder en el mundo para apoyar la comercialización de la energía de fusión. El STEP permitirá crear una nueva infraestructura de proveedores que incluirá integradores de

centrales completas y fabricantes de sistemas capaces de diseñar y suministrar futuras centrales de fusión en todo el mundo.

ARC (Commonwealth Fusion Systems, Estados Unidos de América)

ARC es un concepto de central de fusión que está desarrollando CFS basado en el diseño de un tokamak convencional. El objetivo de ARC es demostrar la viabilidad comercial de la energía de fusión con la tecnología de imanes HTS. ARC será un tokamak convencional compacto con imanes HTS capaz de producir ~400 MW(e), con un radio mayor que mide ~4 m, un radio menor que mide ~1,2 m y un campo magnético en el eje de ~11 T. ARC contará con bobinas magnéticas de campo toroidal, campo poloidal y solenoide central basadas en HTS. Algunas de las bobinas tendrán juntas que permitirán el desmontaje para la sustitución rápida de la cámara de vacío, mitigando así los problemas de vida útil de la primera pared, y darán la posibilidad de cambiar los diseños de la cámara de vacío y los materiales de los divertores en un mismo tokamak.

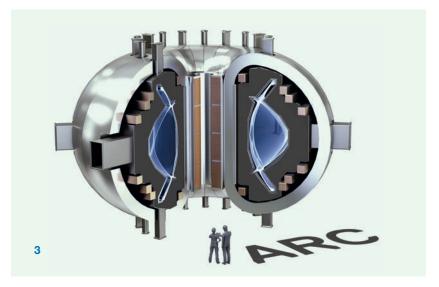
ARC se beneficiará de la información obtenida y las enseñanzas extraídas del tokamak SPARC, actualmente

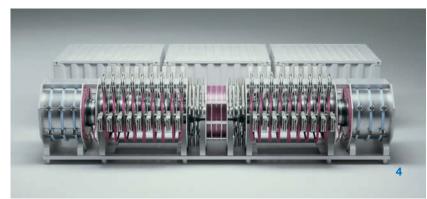


1 STEP apunta a iniciar sus operaciones en 2040 (cortesía de UKAEA, Reino Unido).

2 El GA FPP se basará en sensores avanzados, algoritmos de control y computadoras de alto rendimiento (cortesía de General Atomics, Estados Unidos de América). 3 ARC utilizará tecnología de imanes HTS (cortesía de CFS, Estados Unidos de América).







en desarrollo (comenzó a construirse en febrero de 2023). Se prevé que la construcción finalice en 2025, que entre en funcionamiento en 2026 y que genere una ganancia neta de energía científica. La construcción de la sala del tokamak SPARC casi ha finalizado y este año han llegado los componentes del dispositivo, que han comenzado a ensamblarse. CFS ha comunicado que ha obtenido financiación por unos 2100 millones de dólares de los Estados Unidos y actualmente cuenta con más de 800 empleados a tiempo completo, que prestan apoyo en la construcción de SPARC y la fabricación de imanes HTS en la fábrica de imanes de CFS y posibilitan las actividades de investigación y desarrollo en relación con ARC.

GA FPP (General Atomics, Estados Unidos de América)

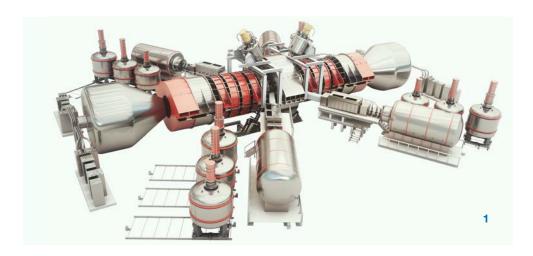
El GA FPP es un concepto de central de fusión que está desarrollando General Atomics basado en un diseño de tokamak avanzado, compacto y en estado estacionario. El diseño tendrá un enfoque basado en sensores avanzados, algoritmos de control y computadoras de alto rendimiento para controlar el plasma, mantos reproductores de carburo de silicio para producir el tritio y

el calentamiento por microondas necesario para alimentar el plasma de fusión.

Polaris (Helion Energy, Estados Unidos de América)

Helion Energy ha construido seis prototipos de fusión y actualmente está construyendo el séptimo, denominado Polaris. Polaris representa un salto significativo en el ámbito de la energía de fusión comercial, ya que aspira a ser la primera máquina en producir electricidad a partir de la fusión. Se está construyendo en una instalación que mide la mitad de una cancha de fútbol y puede considerarse la máquina de fusión de Helion previa a la producción, que prepara el camino para la primera central de fusión comercial. Con una longitud total de 19 m, Polaris está diseñada para trabajar con los tipos de combustible deuterio-deuterio, deuterio-helio-3 y deuterio-tritio.

Operará a una tasa de repetición de 0,1 Hz o superior y dispone de una batería de condensadores con una capacidad superior a 50 MJ. El campo máximo alcanza más de 15 T, equivalente a unas 1000 atmósferas de presión. Polaris dispondrá de 3800 sistemas de diagnóstico y filtrado de gases para evaluar su rendimiento y filtrar los productos resultantes.





Central de Longview (Longview Fusion Energy Systems, Estados Unidos de América)

Longview Fusion Energy Systems tiene por objetivo desarrollar una central de fusión basada en un diseño de confinamiento inercial impulsado por láser, que será diseñada en colaboración con Fluor Corporation. Esta central servirá de modelo para futuras centrales comerciales que se prevé implantar a escala nacional e internacional.

SX0 (Stellarex, Estados Unidos de América)

Stellarex, empresa fundada en 2022, es pionera en el desarrollo de una central de fusión basada en un diseño de estelarátor. En colaboración con Ontario Power Generation, asociados industriales e instituciones académicas, Stellarex tiene la intención de establecer en Ontario (Canadá) un Centro de Excelencia Estelarátor para la energía de fusión. El objetivo de la empresa es construir una máquina de fusión estelarátor, SX0, lograr una ganancia de energía neta en 2030 y, posteriormente, terminar la construcción de la central de fusión de Stellarex, SX1, capaz de producir 600 MW(t) y 250 MW(e) de energía eléctrica.

Da Vinci (TAE Technologies, Estados Unidos de América)

Desde su creación, la empresa TAE Technologies ha tenido el cometido de desarrollar la fusión con hidrógenoboro, que es seguro v abundante, existe un suministro equivalente a más de 100 000 años y es accesible en todo el mundo, pero que requiere mantener temperaturas más elevadas para producir un plasma de fusión que genere energía. Para alcanzar estos niveles de rendimiento, TAE Technologies desarrolló una plataforma patentada denominada configuración avanzada de campo invertido impulsada por un haz. Este enfoque combina los conocimientos más profundos de la física del plasma y la física de los aceleradores para calentar y estabilizar el plasma. Además, esta configuración lineal compacta hace que el dispositivo sea más pequeño y, por tanto, más ampliable y rentable. Se prevé que Da Vinci, el dispositivo de séptima generación de TAE Technologies, sea el primer prototipo de central de fusión de hidrógeno y boro del mundo, y que suministre electrones netos a la red a principios de la década de 2030.



- 1 Se prevé que Da Vinci, el dispositivo de séptima generación de TAE Technologies, sea el primer prototipo de central de fusión de hidrógeno-boro del mundo (cortesía de TAE Technologies, Estados Unidos de América).
- 2 La central de Longview se basará en un diseño de confinamiento inercial impulsado por láser (cortesía de Longview Fusion Energy Systems, Estados Unidos de América).
- **3** El diseño Z estabilizado por flujo cizallado en la central de Zap (cortesía de Zap Energy, Estados Unidos de América).



Central Zap (Zap Energy, Estados Unidos de América)

Zap Energy está desarrollando una central de fusión basada en un diseño Z estabilizado por flujo cizallado. Esta tecnología permite confinar y comprimir el plasma sin utilizar bobinas magnéticas superconductoras ni potentes láseres, gracias a lo cual se puede lograr una rápida iteración que permita disponer de una fuente de energía a escala comercial. Dentro de un dispositivo de fusión en funcionamiento, cada Z-pinch comienza con un potente pulso de electricidad liberado por una batería de condensadores eléctricos. Este pulso transforma una nube de gas deuterio en un anillo plano de plasma caliente. El disco corre por el cátodo interior del dispositivo, o el extremo cargado negativamente. Una vez superado el cono de ojiva del cátodo, el disco de plasma se fusiona en una columna compacta de flujo cizallado, con diferentes capas que fluyen a diferentes velocidades. Paredes de metal líquido en circulación capaces de resistir condiciones extremas captan la energía del plasma de fusión. Una mezcla de plomo y litio en las paredes producirá tritio, que volverá a la central en forma de combustible. Gracias a este diseño compacto, un solo dispositivo de fusión puede medir tan solo 3 m de ancho y generar unos 50 MW(e)

 cantidad suficiente para abastecer a una pequeña ciudad —, y es probable que cada central de Zap Energy albergue varios módulos.■

El papel de la energía de fusión en un sistema eléctrico descarbonizado

La fusión tiene un valor social potencial de billones de dólares de los Estados Unidos en un mundo descarbonizado. La escala y el calendario de implementación, así como la operación de las centrales de fusión, dependen en gran medida de:

- los costos de fusión (los principales generadores de costos en relación con las centrales de fusión son, entre otros, el costo de equipo, los aspectos de reglamentación y los costos de explotación y mantenimiento);
- el costo y la disponibilidad de tecnologías alternativas con bajas emisiones de carbono en cada región;
- las limitaciones en relación con las emisiones de carbono;
- el crecimiento de la economía y de la demanda electricidad;
- el diseño de mercado.

Para que la fusión pueda ampliarse es necesario desarrollar materiales y contar con capacidades de fabricación de componentes de nicho, algo que no sucede con las materias primas [12].



El papel de la energía de fusión en un sistema descarbonizado

Context escena

SOUS STATES OF THE STATES OF T

Destacar las iniciativas públicas y privadas en programas de desarrollo de la energía de fusión

Han aumentado las inversiones privadas en empresas de fusión

Este aumento requiere un compromiso mundial para acelerar el desarrollo científico y tecnológico, crear cadenas de suministro y establecer marcos reguladores.

Los Gobiernos de todo el mundo reconocen el potencial de la energía de fusión y hacen grandes inversiones en investigación y desarrollo para impulsar el progreso. Se están elaborando estrategias nacionales —complementadas con importantes asignaciones de fondos— para apoyar iniciativas de los sectores público y privado, el desarrollo de marcos reguladores iniciales y una mayor colaboración con las cadenas de suministro. La labor colaborativa también va en aumento, y los países suscriben acuerdos para intercambiar conocimientos, recursos e infraestructuras con el fin de acelerar el paso hacia la producción comercial de la energía de fusión. La sinergia entre los avances científicos y los marcos políticos de apoyo está creando un ecosistema sólido que tiene por objeto hacer realidad la energía de fusión en un futuro próximo.

Una amplia gama de partes interesadas prestan cada vez más atención a la energía de fusión. En la industria se han establecido una serie de acuerdos entre desarrolladores de la tecnología de fusión y diversos usuarios finales que desean conseguir una futura fuente de energía limpia y fiable. Los usuarios finales van desde el sector tecnológico, compuesto por empresas como Amazon, Google y Microsoft, que afrontan un aumento súbito de la demanda de electricidad a medida que avanzan sus sistemas de IA, hasta empresas energéticas de combustibles fósiles, compañías eléctricas, empresas de la cadena de suministro de la fusión, la esfera de los vehículos eléctricos e incluso empresas emergentes que desarrollan tecnología de captura directa de aire para eliminar el CO2 de la atmósfera en el camino hacia unas emisiones netas cero.

Ajustar las iniciativas públicas y privadas a un programa de desarrollo de la energía de fusión dirigido por la industria

La fusión comercial a escala puede formar parte de la solución futura a los desafíos climáticos, económicos y de seguridad energética. Dado que la energía de fusión no emite dióxido de carbono ni otros gases de efecto invernadero a la atmósfera, esta potencial fuente de energía limpia está atrayendo un gran interés del mercado y una fuerte inversión de la industria, en parte mediante alianzas público-privadas (APP) [13].

Los avances y el considerable progreso logrados en la ciencia y la tecnología de fusión en los últimos años han disparado el afán del sector privado por promover la energía de fusión, al mismo tiempo que las inversiones públicas, privadas y en el capital social relativas a proyectos de fusión siguen creciendo a ritmo acelerado [14, 15]. Varias empresas aspiran a lograr aplicaciones comerciales en los próximos años o decenios.

Estas labores se ajustan al objetivo global de hacer la transición hacia fuentes de energía sostenibles e implantar la fusión como solución para el suministro de energía segura, limpia y abundante en todo el mundo.



Elementos clave de la fusión (OIEA) Dadas las considerables exigencias financieras y técnicas que conlleva el desarrollo de centrales de fusión viables, las APP se perfilan cada vez más como un mecanismo esencial para el desarrollo de la energía de fusión. Los recursos públicos necesitan la participación de inversores privados que puedan aportar capital adicional y conocimientos especializados de la industria. La importante inversión privada en tecnologías de fusión, que actualmente supera los 7300 millones de dólares de los Estados Unidos en todo el mundo [15], demuestra el interés de los inversores por desarrollar centrales de fusión viables en años venideros. Los proyectos privados requieren el apoyo del Gobierno para infundir confianza a los inversores y sacar provecho de los conocimientos especializados adquiridos en el sector público a lo largo de años de actividades de investigación y desarrollo. Sin embargo, los recursos siguen siendo limitados y la necesidad de asignarlos de forma eficiente es fundamental. Las APP pueden ayudar a mitigar ese problema garantizando que tanto el sector público como el privado compartan los riesgos y los beneficios. La financiación y el apoyo gubernamentales pueden aportar la estabilidad y la confianza necesarias para los inversores privados, facilitando así que las empresas de fusión lleven a cabo proyectos ambiciosos al tiempo que diversifican cualquier riesgo financiero [16].

La colaboración entre instituciones públicas y empresas privadas favorece la aplicación de un enfoque más diversificado de investigación y desarrollo, lo que fomenta la innovación y acelera los progresos al poder avanzar en paralelo con plazos más cortos [17]. En las APP se suelen compartir las responsabilidades del proyecto entre el sector privado y el Gobierno: los Gobiernos suelen proporcionar flujos de efectivo garantizados mientras que el sector privado gestiona el desarrollo del proyecto, compartiendo así el riesgo.

Cuando se gestionan atentamente, las APP pueden ser mecanismos formidables para hacer frente a los desafíos que suponen el capital y la estabilidad política a largo plazo [18]. El sector energético ya ha aprovechado con éxito las ventajas de las APP, que podrían ser una forma de ayudar a mitigar el cambio climático [19, 20]. Además, los marcos para estas alianzas ya existen, pues se emplean ampliamente en otros sectores desde hace muchos años [21].

La construcción de centrales de fusión no se rige por un modelo único. Por tanto, es lógico que las APP sean intrínsecamente flexibles, y que los Gobiernos y los inversores puedan adaptar las iniciativas a las circunstancias particulares de un país, una región o, en algunos casos, un proyecto concreto.

FINANCIACIÓN ANUNCIADA EN 2023-2024

Estado Miembro	Financiación (miles de mill. de dólares de los EE. UU.)	Marco temporal
Alemania	~1,4	a lo largo de 5 años
Corea, Rep.	~0,9	a lo largo de 10 años
Reino Unido	~0,8	a lo largo de 5 años
Estados Unidos	~1,5ª	por año

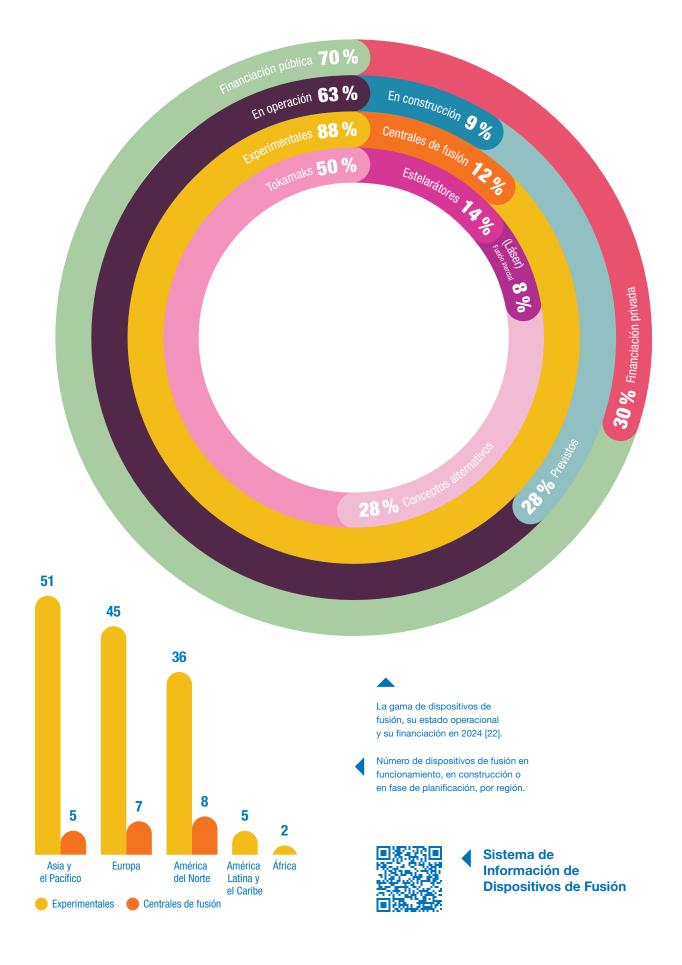
^a Este monto incluye 690 millones de dólares de los Estados Unidos procedentes de la Administración Nacional de Seguridad Nuclear del Departamento de Energía de los Estados Unidos destinados a apoyar la fusión por confinamiento inercial para misiones de la Administración Nacional de Seguridad Nuclear y no al desarrollo de la energía de fusión.

Programas clave que aplican modelos de desarrollo de la fusión dirigidos por la industria

Algunos de los protagonistas de la esfera de la fusión más importantes del mundo están aplicando sus propios modelos para hacer participar a la industria y promover el desarrollo de la energía de fusión:

- Consorcio de fusión
 (China): Comprende institutos
 de investigación y empresas
 propiedad del Gobierno central,
 incluidas algunas de las mayores
 empresas energéticas y siderúrgicas
 del país.
- Iniciativa de financiación
 (Alemania): Combina los esfuerzos
 de empresas, universidades e
 instituciones de investigación para
 construir una central de fusión en
 Alemania antes de 2040.
- Consorcio DTT
 (Italia): Está compuesto por numerosas instituciones de investigación y asociados gubernamentales y regionales, todos ellos de Italia, así como partes interesadas del ámbito internacional.
- Programa Moonshot de investigación y desarrollo (Japón): Fomenta la participación de empresas privadas, universidades y organizaciones en la búsqueda de múltiples enfoques de la energía de fusión.
- Nueva iniciativa (República de Corea): Su finalidad es hacer avanzar la tecnología de las centrales de fusión mediante una APP y establecer un ecosistema industrial de la energía de fusión dirigido por el sector privado.

- Fusion Futures Programme
 (Reino Unido): Tiene por objeto
 fomentar la innovación y estimular
 la capacidad general de la
 industria mediante la colaboración
 internacional y el desarrollo de futuras
 centrales de fusión, proporcionando
 financiación adicional para desarrollar
 infraestructuras para empresas
 privadas de energía de fusión.
- Programa de Desarrollo de la Fusión
 Basado en Hitos y marco de consorcio
 público-privado
 (Estados Unidos de América):
 Apoya a las empresas mediante
 financiación en función de los
 logros y la verificación de hitos de
 comercialización preestablecidos.
 El Departamento de Energía de los
 Estados Unidos también ha empezado
 a recabar información sobre una
 propuesta de consorcio públicoprivado en la esfera de la energía de
 fusión.



Instrumentos facilitadores clave en el camino hacia un ecosistema de la energía de fusión dirigido por la industria

Las empresas de fusión necesitan recibir igual apoyo en la economía política del mercado energético para impulsar la comercialización y proceder a la ampliación de forma eficaz. Otras fuentes de energía comercializadas se benefician de las alianzas con el Gobierno, reglamentos estables e incentivos fiscales estratégicos diseñados para el bien público [23]. Si se ofrece un apoyo similar al desarrollo de la energía de fusión, se podría crear una vía cabal hacia la fusión comercial. Con políticas de apoyo, los Gobiernos pueden acelerar la introducción en el mercado de una energía de fusión limpia, abundante, eficiente y segura.

En los Estados Unidos de América, por ejemplo, las políticas fiscales han incentivado diversas tecnologías de energía limpia. La Ley de Reducción de la Inflación de 2022 concedió muchas de estas bonificaciones al sector de la energía de fusión [24] y, a partir de 2025, la producción de esta energía reunirá las condiciones para obtener beneficios gracias a nuevas bonificaciones fiscales "neutrales desde el punto de vista tecnológico" [25]. En el Reino Unido, el Gobierno empezó a modificar los reglamentos con el objeto de clasificar las centrales de fusión como proyectos de infraestructura de importancia nacional en Inglaterra y Gales. Este cambio agilizará las solicitudes de planificación, ya que permitirá centrarse en cuestiones locales específicas más que en la necesidad de la tecnología [26]. La Ley sobre la Industria de Cero Emisiones Netas de la Unión Europea también caracteriza la fusión como una "tecnología estratégica" [27].

Además de establecer incentivos fiscales, los Gobiernos han creado programas para apoyar las tecnologías de energía limpia, como las normas de cartera para las fuentes de energía renovable y los mandatos relativos a la tecnología de captura de carbono. Una vez que sea operativa, la energía de fusión —con sus beneficios en materia de emisiones y sus ventajas adicionales— podría incluirse en estas definiciones de energía "limpia" o "de emisión cero". Si se quiere implantar la fusión a escala con éxito, es esencial contar con cadenas de suministro resilientes, marcos reguladores eficaces e inversiones estables a largo plazo. El desarrollo de una industria de fusión fuerte exige la colaboración entre Gobiernos, organizaciones de investigación y desarrollo, y empresas privadas.

Grupo Mundial sobre la Energía de Fusión

Con miras a potenciar la colaboración en todo el sector de la fusión, el OIEA anunció la creación del Grupo Mundial sobre la Energía de Fusión (WFEG) [28]. Este grupo tiene por objeto congregar a científicos, ingenieros, encargados de formular políticas, agentes financieros, reguladores y empresas privadas con el fin de acelerar la comercialización de la energía de fusión [13]. La cooperación y la coordinación internacionales desempeñan un papel fundamental en la implantación comercial de la energía de fusión. El WFEG tiene la finalidad de reunir a los sectores público y privado, la industria, el mundo académico y la sociedad civil para así formar una comunidad mundial unida dedicada a la fusión. Fomentando un enfoque de colaboración unificado, el WFEG procura acelerar la transición de la energía de fusión desde las fases de desarrollo hasta la de viabilidad comercial, y garantizar así que la fusión se convierta en uno de los cimientos fundamentales del futuro energético limpio del mundo.

El WFEG actuará como catalizador en este momento decisivo, en el que es esencial aunar esfuerzos para avanzar rápidamente en el desarrollo de la energía de fusión, centrándose en:

- aumentar la cooperación mundial, en particular mediante la coordinación y el ofrecimiento de entornos y oportunidades reiteradas para el diálogo interactivo, el intercambio, la planificación y las alianzas entre las partes interesadas de la industria, los Gobiernos, el mundo académico, los reguladores y el público;
- contribuir a garantizar la eficacia de los programas de investigación y desarrollo de la energía de fusión, por ejemplo en el uso de las instalaciones existentes y la planificación de otras nuevas:
- detectar como comunidad las lagunas relativas a la tecnología y la ingeniería existentes y elaborar estrategias para establecer soluciones a escala internacional;
- fomentar el debate sobre el establecimiento de una reglamentación eficaz de la fusión;
- incrementar la participación del público, potenciar la participación de los jóvenes y aumentar la igualdad de género en el ámbito de la energía de fusión;
- promover la integración de la fusión en el mercado energético, y
- facilitar la integración de la fusión en los sistemas energéticos existentes, incluida la infraestructura de apoyo.





El OIEA apoyará activamente la promoción de los compromisos contraídos en el marco del WFEG. En colaboración con sus Estados Miembros y otros asociados, el OIEA organizará periódicamente reuniones del grupo para analizar los avances hacia el logro de estos resultados, garantizar un compromiso político de alto nivel y promover nuevas medidas de colaboración en materia de energía de fusión. Con esta labor, el OIEA se propone facilitar el progreso continuo y la cooperación en la conquista del desarrollo de la energía de fusión a escala mundial.



El Director General del OIEA, Rafael Mariano Grossi, y la Primera Ministra de Italia, Giorgia Meloni, copresidirán la reunión ministerial inaugural del WFEG (cortesía del Gobierno de Italia).



La primera edición de la Reunión Ministerial del WFEG

Vías de fusión

Panorama general de estrategias nacionales, acuerdos internacionales, inversiones privadas y en el capital social, y procesos de reglamentación que confluyen para lograr avances en la comercialización de la energía de fusión.



Estrategias nacionales y acuerdos internacionales

Durante la 29ª Conferencia del OIEA sobre Energía de Fusión, el Reino Unido dio a conocer su estrategia en materia de energía de fusión [29] con la presentación del nuevo programa Fusion Futures Programme. Esta iniciativa supondrá una inversión adicional de 650 millones de libras (793 millones de dólares de los Estados Unidos) a lo largo de cinco años en un paquete de programas de investigación y desarrollo, que comprende la creación de 2200 plazas de capacitación, una nueva instalación de ensayo del ciclo del combustible y financiación para desarrollar infraestructuras destinadas a empresas privadas de energía de fusión, principalmente en el campus de Culham de la UKAEA. Ese anuncio fue posterior a la decisión del Reino Unido de abandonar el Programa de Investigación y Formación de Euratom.

Más adelante en 2024, el Gobierno del Reino Unido anunció un concurso de la industria [30] a fin de encontrar asociados de las esferas de la ingeniería y la construcción para el prototipo de central de energía de fusión del Reino Unido, STEP. La finalidad del concurso es establecer una alianza público-privada encabezada por UK Industrial Fusion Solutions, filial de la UKAEA, que haga realidad el prototipo STEP. El proyecto, que se ejecuta en el norte

de Inglaterra, tiene por objeto demostrar la energía neta procedente de la fusión para la década de 2040, y se prevé que los contratos para los asociados de ingeniería y construcción se adjudiquen a finales de 2025 o principios de 2026.

El Gobierno del Reino Unido anunció también planes para racionalizar el proceso de planificación de las centrales de fusión futuras. El Departamento de Seguridad Energética y Emisiones Netas Cero del Reino Unido empezó a modificar los reglamentos con el objeto de clasificar las centrales de fusión como proyectos de infraestructura de importancia nacional en Inglaterra y Gales. Este cambio agilizará las solicitudes de planificación, ya que permitirá centrarse en cuestiones locales específicas más que en la necesidad de la tecnología. Con una consulta [26] se recabarán opiniones sobre la declaración de política nacional antes de que se proceda a presentarla para su aprobación parlamentaria.

Además, el Departamento de Seguridad Energética y Emisiones Netas Cero del Reino Unido y el Departamento de Energía de los Estados Unidos anunciaron una nueva alianza estratégica [31] destinada a acelerar la demostración y la comercialización de la energía de fusión, centrada en promover sus estrategias nacionales relativas a esa energía. Posteriormente, en el 28º período de sesiones de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP28), la Casa Blanca dio a conocer su estrategia en favor de las alianzas internacionales para una



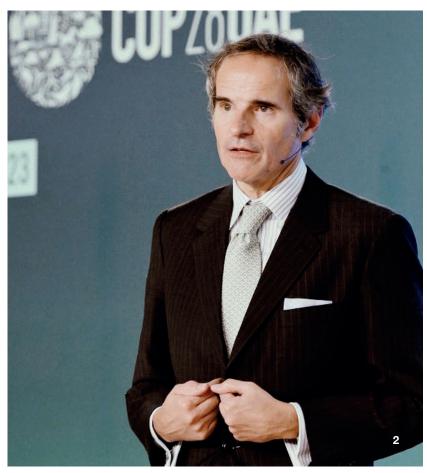
Towards Fusion Energy 2023 (Reino Unido)



Fusion Energy Strategy 2024 (EE. UU.)







nueva era en el desarrollo de la energía de fusión [32], indicando con ello que ampliaría el alcance de su visión de acelerar la demostración y la comercialización de la energía de fusión. Esa visión fue fomentada por otra alianza, una establecida entre los Estados Unidos y el Japón, que se anunció en abril de 2024 [33].

El Departamento de Energía de los Estados Unidos hizo pública su estrategia Fusion Energy Strategy 2024 [34], cuyo objetivo es: i) colmar las lagunas científicas y tecnológicas que existan para construir una central piloto de fusión relevante desde el punto de vista comercial; ii) preparar el camino hacia una implantación comercial de la fusión que sea sostenible y equitativa, y iii) establecer y aprovechar alianzas externas. Además, el mencionado organismo anunció una oportunidad de financiación que está estrechamente coordinada con esa estrategia, por una cuantía de 180 millones de dólares de los Estados Unidos, para colaboradores en la investigación innovadora de la esfera de la fusión, y dio a conocer una nueva visión de su programa de ciencias de la energía de fusión, titulada Building Bridges, que se centra en colmar enérgicamente las lagunas científicas y tecnológicas que existan para conseguir una central piloto de fusión relevante desde el punto de vista comercial, al tiempo que apoya la investigación básica en ciencias de la energía de fusión y tecnologías instrumentales.

- 1 Ceremonia inaugural de la
 29ª Conferencia del OIEA sobre
 Energía de Fusión, celebrada en
 Londres. De izquierda a derecha:
 A. Bowie, Subsecretario de Estado
 Parlamentario de Energía Nuclear y
 Redes del Reino Unido; el Director
 General del OIEA, Rafael Mariano Grossi,
 e I. Chapman, Director Ejecutivo de la
 UKAEA.
- 2 El Director General del OIEA, Rafael Mariano Grossi, en la COP28, celebrada en Dubái (Emiratos Árabes Unidos), en diciembre de 2023.



Debate iniciado por el OIEA sobre la energía de fusión en la COP28

En 2024, el Gobierno de los Estados Unidos aumentó considerablemente la financiación de la investigación sobre la energía de fusión, asignando 790 millones de dólares de los Estados Unidos a la Oficina de Ciencias de Energía de Fusión, de su Departamento de Energía. Por otra parte, la fusión por confinamiento inercial recibió 690 millones de dólares de los Estados Unidos con cargo al presupuesto de la Administración Nacional de Seguridad Nuclear. A ello se sumó un programa de investigación acelerada de la ciencia y la tecnología de la energía de fusión inercial, al que se destinaron 42 millones de dólares de los Estados Unidos para fomentar la ciencia y la tecnología básicas de esa energía. En total, la financiación de 1580 millones de dólares de los Estados Unidos [35] representa una inversión récord del Gobierno de los Estados Unidos en energía de fusión y fusión por confinamiento inercial. Asimismo, el Gobierno propuso ampliar las bonificaciones fiscales que apoyan una gama más abarcadora de tecnologías de energía limpia, comprendida la energía de fusión en virtud de la Ley de Reducción de la Inflación de 2022 [36].

En el dinámico panorama de la energía de fusión, las APP están tomando cada vez más forma. El Departamento de Energía de los Estados Unidos anunció la concertación de acuerdos para asignar 46 millones de dólares de los Estados Unidos a ocho empresas para los primeros 18 meses de esfuerzos por avanzar en relación con diseños y actividades de investigación y desarrollo sobre centrales de fusión, en el marco de su Programa de Desarrollo de la Fusión Basado en Hitos. Estas empresas fueron seleccionadas entre numerosos solicitantes que presentaron propuestas en las que describían sus planes para comercializar la energía de fusión. La financiación se desembolsará según se logren y se verifiquen los hitos de comercialización preestablecidos por el Departamento de Energía de los Estados Unidos. De cara al futuro, ese organismo también ha empezado a recabar información sobre una propuesta de consorcio público-privado [37] de la esfera de la energía de fusión, que tiene por objeto ampliar la financiación federal integrando contribuciones de gobiernos estatales y locales, inversiones del sector privado y fuentes filantrópicas.

El Japón sigue una trayectoria similar. En 2023 adoptó su primera estrategia nacional sobre energía de fusión [38], que hace hincapié en la creación de una industria nacional de energía de fusión con una mayor participación del sector privado en la investigación y el desarrollo. Esta estrategia tenía previsto el establecimiento del Consejo de Energía de Fusión del Japón con miras a fomentar las industrias conexas y elaborar directrices para la reglamentación de la tecnología de la energía de fusión. Además, se creó un grupo de trabajo dedicado a la reglamentación de la fusión. En 2024, el Gobierno del Japón anunció una nueva iniciativa de investigación y desarrollo en favor de la fusión como parte de su Programa Moonshot en esas esferas [39] y, con ello, siguió reforzando su compromiso con el fomento de la tecnología de fusión. También tiene previsto dar prioridad a la enseñanza sobre la energía de fusión en las instituciones académicas, garantizando así que la próxima generación de científicos e ingenieros esté bien preparada para contribuir a ese campo. Estas labores se ven complementadas por la alianza estratégica con los Estados Unidos de América destinada a acelerar el desarrollo de la energía de fusión.

China está ampliando rápidamente su programa de energía de fusión, aumentando la inversión cada año [40]. Consolida esta visión la formación de un consorcio dedicado al desarrollo de la energía de fusión que está dirigido por la Corporación Nuclear Nacional de China. Esta iniciativa se centra en los superconductores de alta temperatura, el almacenamiento de energía de gran capacidad y la producción de tritio. El consorcio comprende 25 institutos de investigación y empresas propiedad del Gobierno central, incluidas algunas de las mayores empresas energéticas y siderúrgicas del país. El Gobierno anunció la creación de una nueva empresa nacional para encabezar el desarrollo de la industria [41].

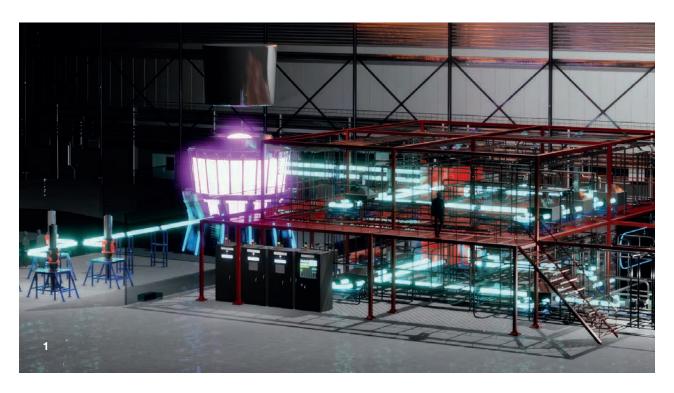
En julio de 2024, el Gobierno de la República de Corea anunció una importante inversión de 1,2 billones de wones (aproximadamente 900 millones de dólares de los Estados Unidos) en el desarrollo de la energía de fusión. Esta iniciativa, que, según se ha programado, comenzará en 2026 y se prolongará durante un decenio, tiene por objeto hacer avanzar la tecnología de las centrales de fusión mediante una APP. El plan incluye la construcción de una central piloto con una capacidad de generación de electricidad de 100 MW en la década de 2030, que se prevé que empiece a funcionar en la década de 2040. El objetivo general es establecer un ecosistema industrial de la energía de fusión dirigido por el sector privado [42].

Como medida encaminada a elaborar una estrategia amplia de la UE en materia de fusión, la Comisión Europea organizó la conferencia titulada *EU Blueprint for Fusion Energy* [43]. El evento puso de relieve varias prioridades clave para la UE: la necesidad de mejorar la colaboración, aumentar la financiación, contar con certidumbre reglamentaria y desarrollar una fuerza de trabajo cualificada.

El Ministerio Federal de Educación e Investigación de Alemania, un motor primario en la UE, anunció que destinará más de 1000 millones de euros a la investigación de la fusión de aquí a 2028, además de los 370 millones de euros (396 millones de dólares de los Estados Unidos) que se han asignado a instituciones de investigación.

Esta financiación institucional se vio reforzada por un nuevo programa de financiación de proyectos denominado Fusion 2024 [44], que tiene por objeto promover las tecnologías, los componentes y los materiales necesarios para las centrales de fusión, haciendo hincapié tanto en el confinamiento magnético como en la fusión por láser. La primera fase de Fusion 2024, cuya finalización está prevista para principios de la década de 2030, se centra en los avances tecnológicos, mientras que la segunda se centrará en la integración de estas tecnologías en el diseño de una central funcional. El programa hace hincapié en la investigación colaborativa orientada a la aplicación como forma de APP que aspira a acelerar el paso hacia la energía de fusión comercial.







- 1 Ilustración de UNITY-1, instalación no radiológica destinada a ensayos de componentes del manto y del ciclo térmico y para usuarios, sita en el Centro de Investigación de Kioto de Kyoto Fusioneering (Japón). Se han iniciado las primeras operaciones y se prevé que las campañas de ensayos a escala real comiencen en 2026 (cortesía de Kyoto Fusioneering, Japón).
- 2 El Subsecretario de Energía de los EE. UU., D. M. Turk, y el Ministro de Educación, Deporte, Ciencia y Tecnología del Japón, M. Moriyama, anunciando su alianza estratégica en favor del fomento de la energía de fusión (cortesía del Departamento de Energía de los EE. UU., EE. UU.).



En Italia, el Ministerio de Medio Ambiente ha creado la Plataforma Nacional para una Energía Nuclear Sostenible [45] con el objetivo principal de elaborar directrices y una hoja de ruta para coordinar y hacer el seguimiento de la promoción de las nuevas tecnologías nucleares a medio y largo plazo. Esto incluye estudiar las posibilidades que ofrece la energía de fusión para contribuir al objetivo de lograr la descarbonización total de aquí a 2050. En la plataforma participará un amplio abanico de interesados, entre ellos la administración pública, las empresas, las asociaciones sectoriales, las universidades, las instituciones de investigación y la sociedad civil.

Durante la presidencia italiana del G7 se hizo hincapié en la energía de fusión, y el G7 hizo un llamamiento a la colaboración internacional para acelerar el desarrollo y la comercialización de la tecnología de fusión. Estos esfuerzos subrayan la necesidad de unos sólidos reglamentos de seguridad, cadenas de suministro internacionales y el desarrollo de la fuerza de trabajo. El G7 se comprometió a propiciar las colaboraciones, fomentar la inversión y establecer grupos de trabajo para que intercambien prácticas óptimas, y acogió con satisfacción la participación del OIEA y sus Estados Miembros [46].

En 2024, el Canadá y el Reino Unido firmaron un acuerdo [47] para colaborar más estrechamente en el desarrollo de la energía de fusión, en esferas como la investigación, la armonización de los reglamentos y la mejora de la cualificación de la fuerza de trabajo. Ambos países cooperarán para prestar apoyo a la implantación de la fusión a escala mundial. Aunque el Canadá no ha anunciado un programa formal de fusión en el ámbito nacional, en 2024 los Laboratorios Nucleares Canadienses (CNL) dieron a conocer un informe titulado Fusion Energy for Canada [48], que sirve como estrategia preliminar y hoja de ruta. Ese informe insta al Gobierno del Canadá a movilizar sin demora un ecosistema de fusión mediante la creación de una política y un mandato claros, al objeto de que el país llegue a ser líder internacional en tecnologías y servicios de fusión, con la meta de proceder a la demostración y adopción de la energía de fusión en las décadas de 2030 y 2040 e implantar la energía de fusión comercial en su territorio para 2050.

En consonancia con esta visión, los CNL concertaron un acuerdo de colaboración con la UKAEA con el propósito de desarrollar tecnologías para el procesamiento de tritio [49]. Los CNL concertaron también acuerdos y proyectos con Stellarex [50] y





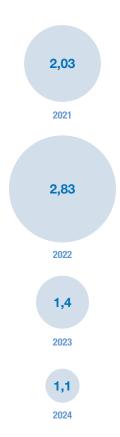
General Fusion [51], comprendida la constitución de Fusion Fuel Cycle con Kyoto Fusioneering [52], para construir y operar UNITY-2, una instalación destinada a ensayos del ciclo del combustible de tritio y para usuarios, que se prevé poner en servicio para finales de 2025 y tener en pleno funcionamiento para mediados de 2026. El objetivo de UNITY-2 es apoyar el desarrollo integrado del ciclo del combustible de deuterio-tritio desde la descarga del combustible hasta su purificación y carga, y demostrar así la eficacia de la tecnología de procesamiento del tritio en las condiciones y a las tasas que correspondan.

Crecimiento de las inversiones privadas y en capital social

Año tras año crecen de manera constante las inversiones en la industria de la energía de fusión. Si bien la mayoría de las inversiones (~70 %) se han dirigido históricamente a empresas de fusión en los Estados Unidos de América, cabe destacar que en 2023 las inversiones en el capital social se extendieron a empresas de fusión en una gama más amplia de países [53]. Entre ellos se encuentran Alemania, el Canadá, China, Francia, Israel, el Japón y Suecia, hecho que refleja el aumento mundial del interés y la financiación relativos al desarrollo de la energía de fusión.

El informe anual sobre la industria de fusión que publica la Fusion Industry Association, titulado The Global Fusion Industry in 2024 [15]—el cuarto de este tipo que publica esta asociación señala que esa industria ha atraído inversiones por un total de 7300 millones de dólares de los Estados Unidos, lo cual supone un aumento con respecto a los 6200 millones de dólares de los Estados Unidos invertidos en 2023. En el informe se estudió a 45 empresas privadas dedicadas a la energía de fusión, desde empresas consolidadas hasta empresas que dan sus primeros pasos en esa esfera. Si bien los Estados Unidos de América siguen liderando este ámbito, pues cuentan con 25 empresas de energía de fusión activas (incluidas muchas de las más grandes), la industria está aumentando su diversidad geográfica: 13 países tienen al menos 1 empresa dedicada a la energía de fusión, y Alemania, China, el Japón y el Reino Unido tienen, cada uno, 3 empresas de ese tipo.

Financiación anunciada por la Fusion Industry Association (en miles de millones de dólares de los EE. UU.)

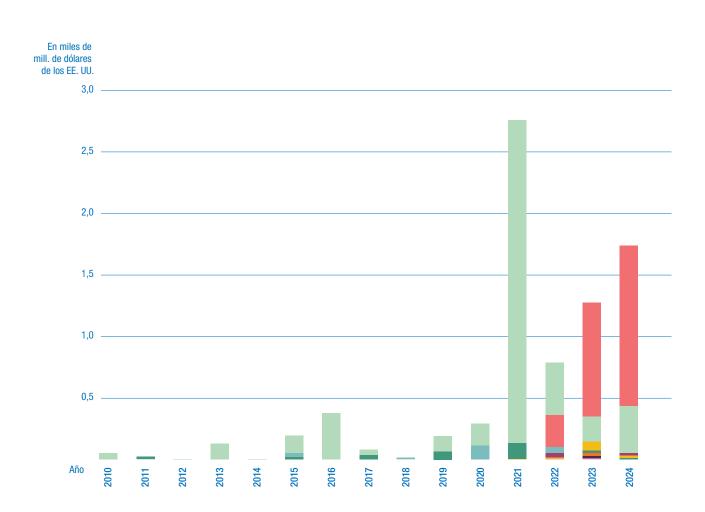








Inversiones en el capital social de empresas de energía de fusión entre 2010 y 2024 por Estado Miembro [54]



Australia Canadá China Francia Alemania Israel Japón Suecia Reino Unido EE. UU.

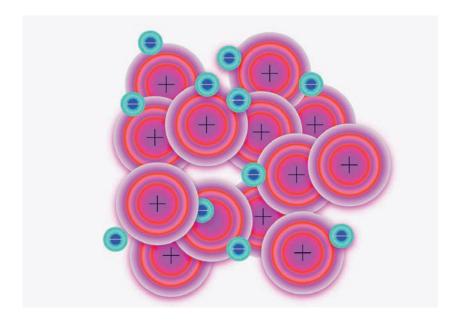


Establecer enfoques reguladores

Los órganos reguladores y los legisladores conceden cada vez más atención a los desafíos y las oportunidades que presenta la energía de fusión. En julio de 2024, el Presidente de los Estados Unidos, Sr. Biden, promulgó con su firma la ley que acelera el despliegue de tecnologías versátiles y avanzadas en favor de una energía limpia o Ley ADVANCE de 2023 [55], cuyo texto incorpora disposiciones de la ley sobre la energía de fusión, que contó con el respaldo de ambos partidos políticos [56]. Esta legislación procura facilitar el desarrollo de la energía de fusión comercial disponiendo incentivos y una competencia reguladora claros en lo que respecta a la inversión. Estas disposiciones respaldan la decisión adoptada con anterioridad por la Comisión Reguladora Nuclear, consistente en separar el reglamento de la energía de fusión del relativo a la energía de fisión y regular los sistemas de energía de fusión a corto plazo en el mismo marco que regula los materiales de subproducto, de forma similar a los aceleradores de partículas. En 2023, California fue el primer estado de los Estados Unidos que reconoció la energía de fusión como una tecnología separada y distinta de la energía de fisión. La Comisión Reguladora Nuclear está redactando directrices de licenciamiento para los sistemas de fusión [57].

El Gobierno del Reino Unido confirmó que todas las instalaciones de prototipo de energía de fusión planificadas en el país seguirían siendo reguladas por la Agencia de Medio Ambiente y la Dirección de Sanidad y Seguridad, a diferencia de las centrales nucleares, que son reguladas por la Oficina de Reglamentación Nuclear.

Asimismo, el grupo de trabajo sobre energía de fusión de la red Agile Nations, conformado por el Canadá, el Japón y el Reino Unido en calidad de miembros, junto con Bahrein y Singapur en calidad de observadores, elaboró recomendaciones conjuntas [58] que



reconocen la importante contribución que podría hacer la energía de fusión respecto de los desafíos mundiales del cambio climático y la seguridad energética. El documento de política también destaca las ventajas que supondría la adopción por varios países de un enfoque armonizado de la reglamentación de la energía de fusión, que abogue por la claridad de un marco regulador que se aplicaría a las instalaciones de energía de fusión con independencia de la tecnología de fusión y que mantenga protecciones adecuadas para las personas y el medio ambiente, proporcionales a los peligros de la energía de fusión, y que sea, a su vez, transparente y favorezca la innovación.

Alemania sigue un camino similar. En una audiencia pública del Comité de Educación, Investigación y Evaluación Tecnológica celebrada en 2024 se destacó la necesidad de un marco jurídico para la energía de fusión que sea pragmático, favorable a la innovación e independiente [59]. Con un marco de este tipo se procura fomentar la inversión privada y apoyar el desarrollo de mercados para las tecnologías de fusión.

Pers

bectivas

Análisis de las tendencias en determinados sectores y desglose de la energía de fusión en diferentes regiones del mundo

Perspectivas sectoriales

Resumen de algunos de los principales ejemplos de colaboraciones entre desarrolladores y usuarios finales de la fusión para lograr avances en la comercialización de este tipo de energía

Industrias del petróleo y el gas

Las industrias del petróleo y el gas, aludiendo a la necesidad de diversificar sus carteras en el contexto de la acción mundial por disminuir progresivamente el uso sin tregua de combustibles fósiles para alcanzar emisiones netas cero para 2050, han estado haciendo importantes inversiones en empresas de energía de fusión. Además de Chevron y Shell, entre las grandes empresas de combustibles fósiles que invierten en compañías de energía de fusión se encuentran Occidental, Eni y la refinería de petróleo noruega Equinor [60].

TAE Technologies, una empresa emergente con sede en California, está considerando la posibilidad de utilizar su tecnología de la energía de fusión para proporcionar energía a las instalaciones de captura directa de aire que está desarrollando Oxy Low Carbon Ventures, filial de la petrolera Occidental. Las empresas firmaron en junio de 2024 un memorando de entendimiento para encontrar oportunidades de comercializar la tecnología de fusión de TAE Technologies con el objetivo de proporcionar electricidad y calor sin emisiones para dispositivos de captura directa de aire. Establecida en 1998, TAE Technologies cuenta con 1200 millones de dólares de los Estados Unidos en inversiones procedentes de empresas como el gigante tecnológico Google, el banco de inversiones Goldman Sachs y las petroleras Shell y Chevron [61]. El objetivo de la empresa es tener una central de fusión conectada a la red a principios de la década de 2030.

Aunque todavía no está demostrado, algunos expertos consideran que la captura directa de aire puede ser vital para lograr emisiones netas cero, ya que elimina el CO2 del aire y revierte décadas de daños en la atmósfera. No obstante, para ser viable a nivel técnico y económico, la captura directa de aire necesitaría una fuente continua de energía asequible y de emisión cero del tipo que podría ofrecer la fusión. Además de sus inversiones en TAE Technologies, Shell, Chevron y Equinor han invertido en Zap Energy. Esta empresa, cuya sede se encuentra en Seattle (Estados Unidos de América), aspira a tener su primera central de fusión conectada a la red en el plazo de diez años.

Eni, Equinor y Shell han invertido en CFS. Eni y CFS firmaron en 2023 un acuerdo de colaboración para apoyar la industrialización de la tecnología de CFS. Según las previsiones, la central de fusión de CFS estará en funcionamiento a principios de la década de 2030. Hasta el momento, CFS ha obtenido 2000 millones de dólares de los Estados Unidos en inversiones. Eni también tiene una participación del 25 % en la instalación DTT de Italia que está en desarrollo cerca de Roma, centrada en la investigación de soluciones que permitan extraer el calor generado por el proceso de fusión [62].

Sector tecnológico

Empresas tecnológicas de todo el mundo han expresado abiertamente su deseo de utilizar la energía de fusión para satisfacer el súbito aumento de la demanda de electricidad de sus centros de datos, necesarios para sus sistemas de IA, que están experimentando un rápido desarrollo. Según se dice, Sam Altman, Director General de OpenAI, declaró en enero de 2024 que el futuro desarrollo de la IA necesitará una revolución como la que puede desencadenar la energía de fusión [63].

Al parecer, el propio Sr. Altman ha invertido más de 375 millones de dólares de los Estados Unidos en Helion Energy, un desarrollador de tecnología de fusión con sede en los Estados Unidos de América que también cuenta entre sus inversores con Reid Hoffman, cofundador de LinkedIn, Peter Thiel, fundador de eBay, y Dustin Moskovitz, cofundador de Facebook. Microsoft, que invierte en OpenAI, está estudiando la fusión, entre otras fuentes de energía limpia, para lograr su objetivo de ser neutro en CO2 para 2030.

En marzo de 2023 firmó un acuerdo para adquirir electricidad de la primera central de energía de fusión de Helion Energy, que, según se prevé en este momento, empezará a funcionar en 2028 con una potencia de salida de 50 MW(e). Se ha informado de que Helion Energy, que cuenta con un total de 600 millones de dólares de los Estados Unidos en inversiones, está trabajando en su séptimo prototipo de máquina, que, según la empresa, demostrará la capacidad de producir electricidad [64].



Bill Gates, cofundador de Microsoft, y Jeff Bezos, fundador del minorista en línea Amazon, han hecho importantes inversiones en empresas emergentes de energía de fusión, por ejemplo a través del fondo Breakthrough Energy Ventures de Bill Gates, al que también han hecho contribuciones el empresario británico Richard Branson, el magnate de los medios de comunicación Michael Bloomberg y Jack Ma, cofundador del minorista en línea chino Alibaba. En 2019, el fondo, junto con otros inversores, hizo una inversión inicial de 115 millones de dólares de los Estados Unidos en CFS [65]. El interés comercial del Sr. Bezos por la fusión se remonta al menos a 2011, cuando se unió a un grupo que invirtió unos 20 millones de dólares de los Estados Unidos en la empresa emergente de fusión General Fusion (Canadá), que en la actualidad cuenta con un total de 300 millones de dólares de los Estados Unidos en inversiones y está desarrollando la fusión de blanco magnetizado.

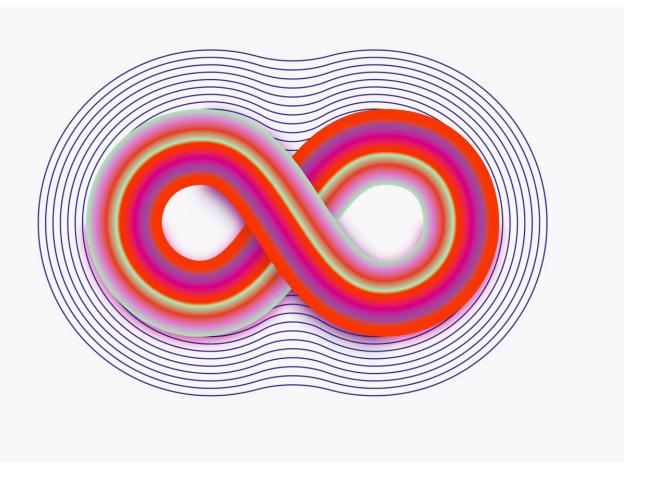
Industria del vehículo eléctrico

La empresa emergente israelí de fusión nT-Tao, respaldada por Honda Motor (Japón), declaró en enero de 2024 que tenía planes de desarrollar minicentrales de fusión para utilizarlas como estaciones de carga de vehículos eléctricos, con el objetivo de comercializar esta tecnología en la década de 2030.

Cada estación de carga tendría una potencia de salida de entre 10 000 y 20 000 kW y sería lo bastante pequeña para caber en un contenedor de carga, según la empresa, que hasta ahora ha recaudado 28 millones de dólares de los Estados Unidos en financiación de inversores como las compañías japonesas Mitsui Sumitomo Insurance y Honda Motor [66]. El fabricante de automóviles cree que la energía de fusión podría

ser revolucionaria para los vehículos eléctricos [67].

En China, el fabricante de vehículos eléctricos Nio adquirió una participación del 20 % en la empresa emergente de tecnología de fusión Neo Fusion, controlada al 50 % por empresas públicas y órganos de inversión de la provincia de Anhui. La empresa, que cuenta con un capital autorizado equivalente a más de 700 millones de dólares de los Estados Unidos, llevará a cabo actividades de investigación y desarrollo con el objetivo de comercializar la tecnología de fusión a escala mundial en un plazo de dos décadas [68].



Cadenas de suministro

El proyecto ITER ha sentado una sólida base para el establecimiento de una cadena de suministro para la energía de fusión a escala mundial. Cada uno de los respectivos organismos de los miembros del ITER tiene sus propios contratos con empresas y organizaciones de investigación y desarrollo, y aporta contribuciones en especie a través de una gran variedad de acuerdos de adquisición. Estos organismos, que suministran desde sectores de la cámara de vacío hasta girotrones y alimentación de alta tensión, crean una cadena de suministro que actualmente está a disposición del emergente sector privado de la fusión.

Según Fusion Industry Association [69], el gasto de las empresas de energía de fusión relacionado con la cadena de suministro aumentó a

más de 612 millones de dólares de los Estados Unidos en 2023, frente a aproximadamente 489 millones de dólares de los Estados Unidos en 2022.

Estas cifras, basadas en una encuesta realizada a empresas, probablemente sean conservadoras, ya que no todas las empresas respondieron. El mayor gasto se destinó a artículos especializados, no específicos de la fusión, como bombas de vacío, además de materias primas, contratos de ingeniería y combustibles. Las empresas prevén gastar un 24 % más en la cadena de suministro en 2024 en comparación con 2023, y el 77 % de ellas están invirtiendo en la ampliación de la capacidad en apoyo de la industria de fusión.

Un ejemplo del aumento de la actividad relacionada con la cadena de suministro es el acuerdo alcanzado en julio de 2023

entre la empresa de fusión Tokamak Energy (Reino Unido) y Sumitomo Corporation (Japón) para colaborar en la ampliación de la energía de fusión comercial en el Japón y a escala mundial. En el marco de ese acuerdo, Sumitomo Corporation pondrá sus conocimientos especializados e inversión a disposición de proyectos conjuntos con Tokamak Energy destinados a fortalecer la cadena de suministro de la fusión en todo el mundo. Sumitomo Corporation aspira a convertirse en líder mundial en financiación, construcción y operación de centrales de fusión, y Tokamak Energy tiene por objetivo acelerar la comercialización e industrialización de sus dispositivos de tokamak esféricos a finales de la década de 2030 [70]. Tokamak Energy ha obtenido hasta la fecha 300 millones de dólares de los Estados Unidos en inversiones.



49

La empresa británica, que también está desarrollando tecnología de imanes HTS para aplicaciones que no se limitan a la energía de fusión, declaró en enero de 2023 que había firmado un acuerdo con Furukawa Electric (Japón) para suministrar cientos de kilómetros de cinta HTS para su prototipo de dispositivo de fusión. La cinta HTS ha sido desarrollada y suministrada por Furukawa Electric, y su producción se está llevando a cabo en una instalación de Nueva York (Estados Unidos de América) [71].

Nucor Corporation, el mayor fabricante y reciclador de acero de América del Norte, firmó un acuerdo con Helion Energy en 2023 para construir una central de fusión de 500 MW(e) en una planta de fabricación de acero de Nucor situada en los Estados Unidos de América. Es, según la empresa, el primer acuerdo de esta envergadura en el ámbito de la energía de fusión y está previsto que allane el camino hacia la descarbonización mundial de la fabricación industrial [72].

El objetivo de Longview Fusion Energy Systems es ampliar la fusión por confinamiento inercial basada en el láser para producir electricidad comercial. En abril de 2024, la empresa contrató a Fluor Corporation para diseñar y construir una central modular mediante láseres avanzados y eficientes y la optimización de la IA. El diseño inicial de la central producirá entre 1 GW y 1,6 GW de energía, para lo cual se empezará con el diseño antes de 2027 de una central inicial de 440 MW que se pondrá en servicio antes de 2032. Entre los principales desafíos cabe mencionar la gestión del tritio radiactivo y la adaptación del vapor generado por fusión a la red. Longview Fusion Energy Systems está estudiando varias opciones respecto de la ubicación, entre las que se encuentran las que contemplan la reconversión de centrales de carbón para preservar puestos de trabajo e infraestructuras.

Entretanto, la UKAEA y la organización de investigación checa Research Centre Řež firmaron en mayo de 2024 un acuerdo plurianual para ensayar cintas HTS para el prototipo de central de fusión STEP del Reino Unido. Estas organizaciones desarrollarán un banco de pruebas único para estudiar el impacto de los espectros de neutrones de importancia para la fusión en las cintas HTS, que confinarán el plasma a temperaturas de hasta 150 millones de grados Celsius. El banco,

cuya entrada en funcionamiento está prevista para 2026, proporcionará datos sobre la durabilidad de la cinta HTS, lo que ayudará al diseño y la vida útil de los imanes HTS de STEP.

Compañías eléctricas

La compañía eléctrica estadounidense Constellation Energy, que ya opera 21 reactores nucleares en todo el país y aspira a ser neutra en emisiones de CO₂ para 2030, gestionará la comercialización y la transmisión de la electricidad para la primera central de fusión de Helion Energy [73], que previsiblemente se pondrá en funcionamiento en 2028 y suministrará electricidad a Microsoft.

Ontario Power Generation, una de las mayores compañías eléctricas del Canadá, también quiere contribuir al despliegue de una central de fusión. En junio de 2024, la empresa anunció que había firmado un memorando de entendimiento para estudiar la opción de desarrollar e implantar la energía de fusión en la provincia de Ontario con Stellarex [74], una empresa de fusión con sede en los Estados Unidos de América. Ontario Power Generation y Stellarex declararon que estudiarán el establecimiento de un centro de excelencia dedicado a la energía de fusión y determinarán el posible emplazamiento y despliegue en el futuro de una central de fusión basada en un estelarátor en Ontario.

Otra empresa eléctrica canadiense, Bruce Power, anunció en 2022 que había firmado un acuerdo con General Fusion y la organización Nuclear Innovation Institute del Canadá para colaborar en la labor de facilitar la implantación de la energía de fusión en Ontario. Dado que la energía nuclear ya genera casi dos tercios de la producción eléctrica de la provincia, las tres organizaciones declararon que tratarán de aprovechar las tecnologías, las competencias y los conocimientos especializados que ya existen en la región en materia de energía limpia. Partiendo de un enfoque centrado en la participación de las partes interesadas, dijeron que tratarían de sensibilizar a los residentes, las empresas y las industrias sobre las posibilidades que ofrece la energía de fusión para transformar la generación de energía limpia en Ontario [75].

Se ha informado de que Anhui Province Energy Group Company Limited, una importante compañía eléctrica de China, ha invertido en la empresa de fusión Neo Fusion [76].



Perspectivas regionales

África

Argelia, Egipto, Libia, Marruecos y Túnez

En África son limitadas las actividades de investigación v desarrollo que se centran específicamente en la energía de fusión en la actualidad. No obstante, la región cuenta con conocimientos especializados y profesionales cualificados en diversos ámbitos relacionados con la fusión. La investigación en ciencia del plasma en materia de fusión está a cargo de diferentes científicos y grupos diseminados en múltiples países. Por ejemplo, Argelia, Egipto, Libia, Marruecos y Túnez están logrando avances en lo que se refiere a la enseñanza en el campo de la ciencia del plasma. Las universidades de estos países participan activamente en actividades de investigación, centradas en ámbitos como el del plasma de radiofrecuencia y su aplicación, la ciencia de los materiales, la química del plasma, y la teoría y la modelización del plasma. Además, Egipto y Libia también albergan dos tokamaks, que aumentan las contribuciones de estos países a la comunidad científica mundial. Estas iniciativas ponen de relieve el creciente compromiso de África con la enseñanza y la investigación en ciencia del plasma y ciencia de fusión.

Asia y el Pacífico

Australia y Nueva Zelandia

En Australia, la investigación en materia de fusión está coordinada por el ITER Forum de este país, una red de científicos e ingenieros de diferentes disciplinas. Las actividades de investigación giran en torno al diagnóstico de plasmas, la teoría y la modelización del plasma, y los estudios de materiales para aplicaciones de fusión. En Australia también se encuentra HB11 Energy, una empresa privada del ámbito de la fusión que se centra en la fusión por láser.

En Nueva Zelandia, la empresa privada Openstar Technologies ha recaudado 12 millones de dólares de los Estados Unidos para desarrollar tecnologías de fusión basadas en el método del dipolo levitado.

China

China alberga más de una docena de dispositivos experimentales de fusión, ya sea en funcionamiento, en construcción o en fase de planificación. Estos proyectos cuentan con el apoyo de empresas industriales estatales, universidades e institutos de investigación. Máquinas de fusión clave como EAST y HL-3 han logrado excelentes resultados experimentales y China, tomando como base estos éxitos, está invirtiendo en los siguientes proyectos sobre fusión, como BEST y CFETR, allanando el camino que culminará con el despliegue de centrales de fusión. Además, el país, que

se está centrando en desarrollar una fuerza de trabajo específica del ámbito de la fusión, tiene el objetivo de capacitar a 1000 nuevos físicos del plasma. China también está construyendo un centro de investigación llamado Comprehensive Research Facility for Fusion Technology, conocido como CRAFT, que sirve de plataforma para desarrollar y ensayar componentes de centrales de energía de fusión. Está previsto terminar la construcción en 2025 [77].

Varias empresas también están realizando importantes inversiones en investigación sobre la fusión y planean numerosos proyectos [78]. En 2024, el Gobierno anunció una nueva empresa nacional [79] que tiene ambiciosos planes de construir una central piloto de investigación en ingeniería, actualmente en fase de diseño conceptual. El objetivo de esta central es alcanzar 300 MW de potencia de fusión en el régimen de operación en estado estacionario y 600 MW en el régimen de operación pulsada, si bien se ofrece flexibilidad para realizar ajustes durante la fase de diseño. Está previsto que la construcción comience en 2030 y que todos los equipos informáticos estén listos en 2035. A fin de apoyar esta labor, se está actualizando el tokamak HL-3 para poder realizar experimentos con deuterio-tritio. Está previsto que esta actualización esté terminada en 2027, aunque el inicio de las operaciones con deuterio-tritio dependerá del licenciamiento y de la puesta en servicio del dispositivo.

India

En la India, las actividades de investigación y desarrollo, la financiación y las contribuciones en el ámbito de la fusión y el plasma se centran principalmente en el proyecto ITER. El país opera varios dispositivos de investigación experimental y está perfilando su hoja de ruta en materia de fusión para los próximos 25 años, que incluye planes para dos nuevas máquinas antes de la puesta en marcha de su DEMO a finales de la década de 2040. La primera máquina sería una fuente de neutrones por fusión basada en un tokamak esférico y la segunda sería un tokamak convencional diseñado para un régimen de operación en estado estacionario, que tendría aproximadamente dos tercios del tamaño del ITER.

República Islámica del Irán

Actualmente, la República Islámica del Irán opera tres tokamaks: Alvand, Damavand e IR-T1, dedicados al estudio de plasmas en diferentes condiciones experimentales.

Israe

Israel alberga desde 2019 la empresa privada de fusión nT-Tao, que, según ha comunicado esta, ha obtenido 32 millones de dólares de los Estados Unidos en financiación y está desarrollando activamente tecnología relacionada con el estelarátor para producir energía.

Japón

Con más de 20 dispositivos de fusión experimentales en funcionamiento, el Japón está a la vanguardia en lo que se refiere al fomento de las actividades de investigación y desarrollo en materia de fusión. La estrategia de fusión de este país prevé un enfoque gradual que culminará en la aplicación práctica de la energía de fusión. Las fases incluyen el diseño conceptual de JA-DEMO y el desarrollo de la tecnología elemental hasta 2025, el diseño



de ingeniería y el desarrollo tecnológico a escala completa de 2025 a 2035 y la toma de una decisión acerca de la transición a la construcción de JA-DEMO después de 2035, que se basará en los avances habidos en el proyecto ITER.

Además, la colaboración bilateral entre el Japón y la UE por conducto del Acuerdo para la Ejecución Conjunta de las Actividades del Planteamiento más Amplio se centra en i) el diseño de centrales y actividades de investigación y desarrollo, ii) un proyecto² de validación y diseño de ingeniería para instalaciones de irradiación de materiales de fusión, y iii) la operación de JT-60SA, que comenzó a funcionar a finales de 2023. También se están llevando a cabo en universidades e institutos especializados diversas actividades de investigación académica que utilizan dispositivos de investigación e instalaciones con láseres de alta potencia.

² El objetivo de este proyecto, también llamado IFMIF Engineering Validation and Engineering Design Activities (IFMIF/EVEDgA), es proporcionar una prueba del concepto de IFMIF DEMO Oriented Neutron Source (IFMIF-DONES) que se está construyendo en España. Como parte de las actividades de IFMIF/EVEDA, se construyeron tres instalaciones de prototipo para validar cada uno de los tres componentes clave de IFMIF-DONES. En la instalación de ensayo, situada en Karlsruhe (Alemania), se prueban conceptos para el módulo de ensayo de alto flujo de IFMIF-DONES. La instalación de blancos de litio, situada en Ōarai (Japón), ensaya conceptos para la cortina de litio líquido de IFMIF-DONES. Finalmente, en la instalación del acelerador, situada en Rokkasho (Japón), se ensayan conceptos para el acelerador de partículas de haces de deuterones de IFMIF-DONES.

Representación de una vista aérea del centro Comprehensive Research Facility for Fusion Technology en Hefei, en la provincia de Anhui (China) (cortesía de los Institutos de Ciencias Físicas de Hefei, de la Academia China de Ciencias, China).



Líbano

La investigación académica del Líbano se centra en lograr avances en relación con los aspectos cruciales de la ciencia de fusión, como la turbulencia del plasma, el confinamiento, el desarrollo de diagnósticos y conceptos de divertores.

Pakistán

El Pakistán opera en la actualidad dos tokamaks, GLAST-III y MT-I, y está construyendo el tercero, MT-2, y planificando el cuarto, PST [80]. Esta labor conjunta aspira a mejorar las capacidades del país en energía de fusión.

República de Corea

La República de Corea sigue adelante con su hoja de ruta en materia de fusión, cuyo objetivo es construir una central de demostración de la fusión para 2050: K-DEMO. La hoja de ruta del país para K-DEMO consta de actividades de diseño del concepto hasta 2030, seguidas del diseño de ingeniería, de 2031 a 2035. Esta labor se apoya en las actividades de investigación y desarrollo de vanguardia llevadas a cabo en los tokamaks KSTAR y VEST, que sientan las bases de la ciencia y la tecnología fundamentales que se necesitan para 2035.

Además, la República de Corea está examinando un nuevo proyecto titulado Korea Fusion Engineering Advanced Test Complex. Esta instalación está diseñada para cumplir los requisitos para la evaluación del rendimiento del manto reproductor de las centrales de fusión; entre ellos, la operación continua a largo plazo, un alto flujo neutrónico de fusión y blancos de gran tamaño para irradiar la unidad de producción de tritio [81]. El complejo contará con:

- una instalación integrada de ensayo de la reproducción, que utiliza un sistema accionado por un acelerador de deuterones de 40 MeV con un máximo de 10 mA para una generación neutrónica similar a la de la fusión, fundamental para ensayar los componentes del manto;
- una instalación de ensayo del sistema de manto, diseñada para demostrar la fiabilidad y la seguridad del manto y de sus sistemas auxiliares;
- una instalación piloto del ciclo del combustible, diseñada para verificar el funcionamiento continuo del ciclo del combustible utilizando H2/D2 a escala piloto 1:10.





Arabia Saudita

La Arabia Saudita está invirtiendo en investigación y desarrollo de tecnologías energéticas avanzadas, entre las que se encuentra la fusión. Como parte de esta estrategia, JIMCO Technology Fund ha invertido en General Fusion y en CFS.

Singapur

Se ha sabido que Temasek Holdings Limited, una empresa de inversión de Singapur propiedad del Gobierno de este país, ha invertido en CFS [82].

Tailandia

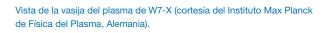
En 2023, Tailandia, en colaboración con China, encendió su primer tokamak, el TT-1 [83]. Dado que se trata del primer tokamak de Asia Sudoriental, TT-1 es una instalación fundamental para promover la investigación sobre la fusión en Tailandia y en los países vecinos. Promete ser una herramienta de aprendizaje de gran utilidad para el desarrollo del plasma y la ingeniería de fusión [84].

Varios países encabezan una iniciativa que prevé la creación del organismo árabe de la energía de fusión, que servirá de eje central para coordinar la investigación y las colaboraciones en materia de fusión que se lleven a cabo en la región, obtener la financiación para futuros proyectos de energía de fusión y asegurar la participación activa de estos países en las iniciativas mundiales en este campo.



¹ Presentación oficial del TT-1 en Tailandia (cortesía de los Institutos de Ciencias Físicas de Hefei, de la Academia China de Ciencias, China).







Europa

EUROfusion, FuseNet, Fusion for Energy e IFMIF-DONES

EUROfusion es el consorcio³ europeo de investigación y desarrollo creado para coordinar y financiar actividades de investigación y desarrollo a nivel europeo en el ámbito de la fusión. La hoja de ruta de EUROfusion se rige por un enfoque de los hitos y contiene objetivos a corto, mediano y largo plazo [85]. En un primer momento, el objetivo de la hoja de ruta es contribuir al proyecto ITER y, posteriormente, la atención se centra en EU-DEMO, que está previsto que entre en funcionamiento antes de 2050.

Los objetivos a corto plazo giran en torno a la investigación, el desarrollo y la construcción del ITER y de instalaciones de ensayo de materiales como IFMIF-DONES, además de la labor de diseño conceptual de EU-DEMO. A mediano plazo, la atención se centra en la explotación científica y tecnológica del ITER y de IFMIF-DONES, así como en el inicio de la fase de diseño de ingeniería de EU-DEMO con la participación de la industria. La visión a largo plazo incluye el diseño, la construcción y la operación de EU-DEMO, junto con el aumento de la colaboración de la industria.

FuseNet es la red europea de enseñanza sobre fusión, que actúa como punto nodal en lo que se refiere a la enseñanza en esta materia a través de sus programas de desarrollo y movilidad educativos. Como organización afiliada a EUROfusion, FuseNet se encarga de fomentar y coordinar las actividades de enseñanza que apoyan la hoja de ruta de EUROfusion. Las iniciativas de FuseNet incluyen planes de financiación para estudiantes de maestría, actividades de creación de redes dirigidas a estudiantes de doctorado, la elaboración de materiales didácticos y la organización de eventos para los niveles de enseñanza más jóvenes. Además, FuseNet trata de fortalecer las relaciones con la industria, ajustando las iniciativas de enseñanza a las necesidades y los avances habidos en el sector de la fusión.

Fusion for Energy es la organización de la Unión Europea que gestiona la contribución de Europa al ITER. Europa es responsable de casi la mitad del proyecto, mientras que los otros seis miembros (China, Estados Unidos de América, Federación de Rusia, India, Japón y República de Corea) contribuyen al resto a partes iguales. Fusion for Energy colabora con la industria y organizaciones de investigación europeas para desarrollar y fabricar los componentes de alta tecnología que Europa aportará al ITER.

En los últimos años, varias empresas privadas de Alemania, Francia, Italia y Suecia, entre otros países, han llevado a cabo una importante labor de desarrollo de tecnologías de fusión. Para garantizar el suministro energético de Europa a largo plazo, en junio de 2024, diez empresas europeas acordaron establecer la European Fusion Association [86]. Este organismo unificado reunirá a diversas partes interesadas de la industria de la fusión y a Gobiernos nacionales, lo que acelerará la industrialización de la energía de fusión.

³ Los países participantes en EUROfusion son: Alemania, Austria, Bélgica, Bulgaria, Croacia, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Irlanda, Italia, Letonia, Lituania, Malta, Noruega, Países Bajos, Polonia, Portugal, Reino Unido, República Checa, Rumanía, Suecia, Suiza y Ucrania.





Alemania

Alemania es líder en varios ámbitos del desarrollo de la energía de fusión, como la investigación sobre estelarátores, la física del tokamak, las tecnologías y materiales de fusión y las interacciones plasma-pared. El W7-X, que se encuentra en Alemania, es el mayor estelarátor del mundo. Contiene bobinas superconductoras modulares que permiten el funcionamiento del plasma en estado estacionario para estudiar los regímenes de importancia para las centrales.

El Gobierno de Alemania ha acelerado sus acciones encaminadas a la comercialización de la fusión, reconociendo el auge de las empresas privadas del país y tratando de aprovechar sus contribuciones y su compromiso. Las empresas alemanas activas en el sector de la energía de fusión han creado la asociación industrial Pro-Fusion [87], que servirá de punto de entrada para contribuir al desarrollo del ecosistema económico de la fusión y, a largo plazo, conformará la opinión pública sobre la energía de fusión.

Italia

Italia tiene un programa de fusión que irradia vitalidad. La instalación DTT es un nuevo proyecto de fusión italiano que, según se prevé, comenzará a funcionar después de 2025. El Consorcio DTT, que está formado por numerosas instituciones de investigación italianas, asociados gubernamentales y regionales, partes interesadas internacionales y empresas privadas, ha recaudado cerca de 500 millones de euros para construir

la instalación. Italia también acoge varias instalaciones de investigación experimental sobre la fusión y participa activamente en los preparativos para las operaciones del ITER y en el diseño de EU-DEMO. Las industrias italianas han conseguido más de 1800 millones de euros en contratos para el desarrollo de las tecnologías de fusión.■

Francia

En Francia se encuentran el ITER y otros dispositivos de investigación sobre la fusión, como el tokamak WEST y varias instalaciones láser. Además, la empresa emergente Renaissance Fusion, que está desarrollando un concepto de estelarátor con imanes HTS y paredes líquidas, tiene su sede en Francia. Con el objetivo de apoyar las actividades de investigación y desarrollo en este ámbito, el Gobierno de Francia está examinando fórmulas para estimular la colaboración público-privada.

Kazajstán

Las actividades de investigación sobre la fusión en Kazajstán abarcan una serie de iniciativas, desde pequeños bancos de ensayos centrados en plasmas de baja temperatura hasta experimentos de investigación sobre la fusión a gran escala como el tokamak KTM, además de aplicaciones de aceleradores para la investigación sobre la fusión. Kazajstán tiene un acuerdo de cooperación con el ITER para estudiar la resistencia a la radiación de los diagnósticos de plasmas y la calidad de los materiales estructurales. Además, este país se ha asociado con Belarús,



la Federación de Rusia, Kirguistán y Tayikistán para el uso conjunto del tokamak KTM a fin de fortalecer aún más la labor de investigación y desarrollo en la región.

Federación de Rusia

En la Federación de Rusia, el desarrollo de la energía de fusión se rige por la Estrategia Nacional de Energía Atómica, que se centra en máquinas de energía de fusión puras y reactores híbridos de fusión-fisión. Entre los principales participantes en esta iniciativa figuran la Corporación Estatal de Energía Atómica Rosatom, el Ministerio de Ciencias y Enseñanza Superior (incluida la Academia de Ciencias de Rusia) y el Centro Nacional de Investigaciones Instituto Kurchatov. Las actividades de investigación giran en torno a los tokamaks, los sistemas láser y los sistemas híbridos de fusión-fisión. Se considera que los sistemas híbridos son importantes desde el punto de vista estratégico para la operación de los futuros reactores nucleares y centrales de fusión de la Federación de Rusia.



- 1 IFMIF-DONES es una instalación de ensayo de materiales que se está construyendo en Granada (España). El proyecto está dirigido por Croacia y España: España financia el 50 % de todos los costos de construcción y el 10 % de los costos de operación, y Croacia es responsable del 5 % de cada uno de ellos. IFMIF-DONES utilizará un acelerador de partículas para producir un haz de deuterones de onda continua dirigido a un blanco constituido por una cortina de litio líquido. La interacción entre el deuterio y el litio generará suficientes neutrones libres para simular el flujo de neutrones previsto a lo largo del tiempo en EU-DEMO. Justo detrás del blanco de litio se encontrará el módulo de ensayo de flujo alto, que contendrá cápsulas de muestras de materiales para ensayos de irradiación neutrónica [88].
- 2 El Director General del OIEA, Rafael Mariano Grossi, visita la instalación de ensayo de manipulación a distancia y robótica en Culham (Reino Unido).



Reino Unido

La UKAEA es la organización nacional del Reino Unido encargada de investigar sobre la energía de fusión y de hacerla realidad. También supervisa a UK Industrial Fusion Solutions, cuyo cometido es desarrollar el prototipo de central de fusión STEP. Además, la UKAEA está ejecutando el programa del país denominado Fusion Futures Programme para apoyar su estrategia nacional de fusión. Este programa incluye el establecimiento de nuevas instalaciones en el Campus Culham de la UKAEA, en el sur de Inglaterra, para propiciar el avance de nuevas tecnologías y ampliar las capacidades con respecto al ciclo del combustible de fusión. El objetivo del programa es fomentar una innovación líder a nivel mundial y estimular la capacidad general de la industria mediante la colaboración internacional y el desarrollo de futuras centrales de fusión. Además, se pretende implantar un conjunto de competencias en materia de fusión para crear conocimientos especializados en un amplio abanico de disciplinas y niveles.

En 2021, la UKAEA inauguró su instalación Fusion Technology Facility [89] cerca de Rotherham (Yorkshire del Sur) para el desarrollo y ensayo de materiales y componentes para futuras centrales de fusión. La UKAEA también colabora con el sector académico, otras organizaciones de investigación y la cadena de

suministro industrial en diversos ámbitos, como la robótica y los materiales.

Las máquinas de fusión de la UKAEA incluyen los tokamaks MAST Upgrade y JET. En diciembre de 2023 se concluyeron las operaciones relacionadas con el plasma en el JET y, en la actualidad, la UKAEA supervisa el proyecto de clausura y reutilización de este reactor [90]. El proyecto es un programa pionero en el mundo que aportará conocimientos científicos y de ingeniería para desarrollar futuras máquinas y centrales de fusión. Estas actividades incluyen el desmontaje robótico del tokamak JET, investigación sobre la recuperación de tritio para su reutilización como combustible de fusión y nuevos avances en el Campus Culham de la UKAEA.



1 El Director General del OIEA, Rafael Mariano Grossi, visita el tokamak MAST Upgrade.

2 El acuerdo entre el OIEA y el Gobierno de Chile fue suscrito por L. Huerta, de la Comisión Chilena de Energía Nuclear, y participó como testigo en la firma L. F. Ramos, Subsecretario de Energía de Chile.







América Latina y el Caribe

Argentina, Brasil, Chile, Costa Rica, México y Perú

La tendencia mundial al aumento de las actividades de fusión se observa en varios países de América Latina, como la Argentina, el Brasil, Chile, Costa Rica, México y el Perú. Con el objetivo de fortalecer las capacidades regionales en materia de fusión y física del plasma, los esfuerzos se están centrando en promover la investigación, estableciendo para ello colaboraciones mediante experimentos conjuntos, pasantías con fines de investigación, programas coordinados y cursos de verano dedicados a la física del plasma y a la ciencia y la tecnología de fusión.

En colaboración con el Laboratorio de Física del Plasma de Princeton, el OIEA presentó en 2024 una nueva serie de seminarios web para poner de relieve novedades y avances actuales en las actividades relacionadas con la ciencia de la fusión y del plasma en América Latina.

En mayo de 2024, el OIEA y el Gobierno de Chile firmaron un acuerdo para fortalecer la cooperación por lo que respecta a la tecnología nuclear y el litio [91]. Este acuerdo tiene por objeto aprovechar la tecnología nuclear en favor de una mejor extracción

3 El Director General del OIEA, Rafael Mariano Grossi, firma un acuerdo con J. González-Olaechea, Ministro de Relaciones Exteriores del Perú, durante su visita oficial a este país en junio de 2024.

de litio y allana el camino hacia un apoyo regional más amplio por parte del OIEA. El litio tiene aplicaciones en la fusión y otros sectores energéticos.

En junio de 2024, el OIEA y el Gobierno del Perú firmaron una declaración conjunta sobre cooperación en el ámbito de las aplicaciones de la tecnología nuclear en la industria minera para ayudar al Perú a proteger el medio ambiente, propiciando que este lleve a cabo actividades de extracción y prospección de litio de manera sostenible [92].



Seminarios web del OIEA sobre actividades de fusión en América Latina



América del Norte

Estados Unidos

El Departamento de Energía de los Estados Unidos lleva décadas invirtiendo en investigación sobre fusión por conducto del programa de ciencias de la energía de fusión de la Oficina de Ciencia. En el marco de esos esfuerzos se presta apoyo a colaboraciones internacionales como el ITER, así como al programa de fusión por confinamiento inercial de la Administración Nacional de Seguridad Nuclear. De manera más reciente, la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada-Energía (conocida como ARPA-E) se ha orientado a esferas potencialmente transformadoras de la investigación y el desarrollo en materia de fusión, centrándose en hacer posible la comercialización oportuna de la fusión. Actualmente, el programa de fusión del Departamento de Energía de los Estados Unidos está centrando su atención en tender un puente entre la investigación fundamental sobre fusión y la investigación aplicada para satisfacer las necesidades de la creciente industria de fusión de los Estados Unidos. Este país alberga el mayor número de empresas de energía de fusión (25 en total), entre las que figuran muchas de las más grandes. Asimismo, reúne la cifra más elevada de máquinas de fusión, ya sea en funcionamiento, en construcción o en desarrollo (más de 40). En este contexto, el Departamento

de Energía de los Estados Unidos coordina actualmente un amplio conjunto de nuevas actividades en apoyo de la posterior comercialización de la fusión. Entre ellas figuran el Programa de Desarrollo de la Fusión Basado en Hitos [93], los compromisos internacionales para reforzar la seguridad energética y el liderazgo tecnológico [94] y diversos esfuerzos gubernamentales interinstitucionales [95] para evaluar el panorama de competencia a escala internacional y el desarrollo de mercado, desarrollar marcos reguladores adecuados, ampliar las cadenas de suministro, garantizar el desarrollo de una fuerza de trabajo inclusiva, garantizar la justicia energética y medioambiental y velar por que haya métodos viables de disposición final y reciclado de desechos, así como participación del público.

Canadá

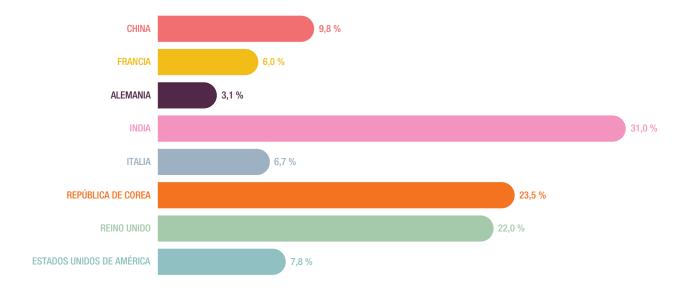
El Canadá cuenta con notables conocimientos especializados en ámbitos clave que resultan esenciales para que la industria de fusión se desarrolle hasta estar bien consolidada, como la producción y la manipulación de deuterio y tritio, la robótica, la manipulación a distancia y la ciencia de los materiales. Estas capacidades se pueden aprovechar en apoyo del desarrollo de la fusión y se ajustan bien a las necesidades de las tecnologías de fusión. A pesar de estos puntos fuertes, el apoyo gubernamental a la investigación y el desarrollo de la fusión en el Canadá



es moderado, y las actividades actuales están impulsadas principalmente por instituciones académicas y empresas privadas.

En el informe titulado *Fusion Energy for Canada* [48], al frente del cual se encuentran los CNL, se insta al Gobierno del Canadá a crear una política y un mandato claros para movilizar un ecosistema de fusión. En respuesta, los CNL anunciaron que abrirán su proceso de invitación a pequeños reactores modulares para incluir prototipos de centrales de fusión [50]. Asimismo, ampliaron su programa conocido como Iniciativa de Investigación Nuclear en el Canadá para centrarse más en la investigación y el desarrollo basados en la fusión, promoviendo proyectos en colaboración con proveedores de reactores nucleares avanzados.

Fusion Cifras



Tasa de crecimiento compuesto positivo de artículos de primera autoría presentados en la Conferencia sobre Energía de Fusión por país (2006-2023) En los últimos 17 años, la India, el Reino Unido y la República de Corea han sido los países donde más rápido ha aumentado

el total de artículos de primera autoría, lo que refleja su creciente compromiso con la cooperación internacional. Este aumento de las contribuciones pone de relieve el papel fundamental que desempeña la colaboración mundial para acelerar el progreso hacia la energía de fusión, pues la puesta en común de conocimientos especializados y los esfuerzos colectivos impulsan la innovación y los avances científicos.

Energía de fusión en 2024: una instantánea

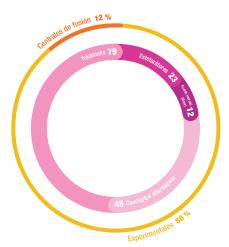
De 2021 a 2024, el sector de la energía de fusión experimentó un importante crecimiento y diversificación. El número total de proyectos de fusión se disparó, con un notable aumento de los diseños alternativos y de confinamiento inercial y estelarátor, lo cual pone de relieve que se están pasando a estudiar tecnologías variadas más allá de los tokamaks tradicionales.

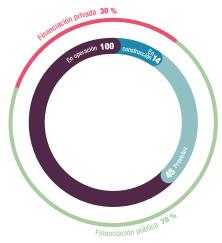
En 2024 existe una distribución más equitativa entre proyectos experimentales y centrales de fusión, que muestra que este ámbito va ganando madurez. Asimismo, se registró un incremento notable de los proyectos previstos en este sector, lo cual es reflejo de la planificación estratégica a largo plazo. Además, la participación del sector privado prácticamente se duplicó, lo que demuestra un mayor interés comercial e inversión, que complementa el apoyo firme y constante del sector público.

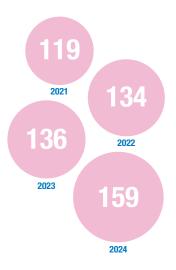
El año 2024 marca una fase dinámica en la energía de fusión, caracterizada por la diversidad tecnológica, la planificación estratégica y un mayor fomento de la colaboración público-privada.

Mayor inversión y una variedad de planteamientos tecnológicos

Las tendencias recientes del sector de la energía de fusión parecen sugerir un futuro prometedor caracterizado por avances tecnológicos acelerados, una mayor inversión y una adopción más amplia. La diversificación hacia diseños de fusión alternativos y el notable aumento de los proyectos de láser y estelarátor indican que se están estudiando diversas vías tecnológicas para lograr una energía de fusión sostenible. Este enfoque diversificado podría aumentar la posibilidad de que se produzcan avances.





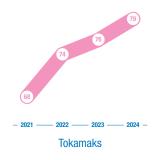


En 2024, la mayoría de las máquinas de fusión eran diseños experimentales (139 dispositivos). Si bien los tokamaks siguen siendo el dispositivo predominante en 2024, en los últimos años han ido ganando popularidad otros diseños de máquinas.

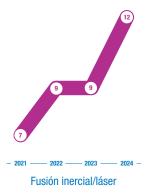
La financiación pública destinada a máquinas de fusión se mantiene estable en 2024, mientras que la financiación privada destinada a proyectos de fusión se ha duplicado con creces desde 2021. En 2024 hay más máquinas de fusión en funcionamiento que nunca (cinco más que en 2023), y se prevén muchas más.

A medida que el número de proyectos de energía de fusión crece año tras año, también lo hacen el interés y la inversión en el sector de la energía de fusión por parte de entidades públicas y privadas, que cada vez son más amplios.

La colaboración continua entre los sectores público y privado será crucial para acelerar el desarrollo tecnológico y ampliar los modelos experimentales que han obtenido resultados satisfactorios, a fin de lograr centrales de fusión operativas.









Número de dispositivos de fusión por año.

Tendencias en la investigación sobre energía de fusión (2014-2023)

En los últimos diez años, países de todo el mundo han realizado importantes contribuciones al ámbito de la investigación sobre energía de fusión. El número total de artículos aceptados en la revista Nuclear Fusion entre 2014 y 2023 pone de relieve el creciente interés y los avances habidos en esta esfera.

Las tendencias aquí observadas reflejan los datos relacionados directamente con el contenido de la revista Nuclear Fusion y no necesariamente las tendencias globales en investigación y desarrollo en materia de fusión.

El país con el mayor número de contribuciones a lo largo de los años es China (858 artículos aceptados), lo que demuestra el gran interés que ha concedido este país a la fusión en los últimos diez años. Otros países como los Estados Unidos de América (762 artículos) y Alemania (447 artículos) también

están realizando importantes contribuciones, impulsadas por cuantiosas inversiones en el ámbito de la ciencia y la tecnología. Asimismo, países como el Japón (346 artículos), Francia (200 artículos), el Reino Unido (196 artículos), Italia (174 artículos) y España (129 artículos) también eiecutan desde hace tiempo programas de investigación y son agentes fundamentales en la investigación internacional. Además de China y el Japón, otro país de Asia que ha hecho importantes contribuciones es la República de Corea (129 artículos), lo que subraya aún más el creciente protagonismo de esta región en la esfera de la investigación sobre la fusión. La India (57 artículos) también ha hecho grandes avances en este campo. La Federación de Rusia (115 artículos) sigue teniendo una marcada presencia en el panorama de la investigación en materia de fusión. Países como los Países Bajos (47 artículos), Suecia (43 artículos), Bélgica (38 artículos),

la República Checa (36 artículos) y Australia (13 artículos) han mantenido sistemáticamente un flujo constante de contribuciones, especialmente a través de alianzas internacionales y en esferas de investigación especializada en materia de energía de fusión.■





Artículo más citado publicado desde 2014



Artículo más descargado publicado en 2024



Artículo más descargado publicado desde 2014



Referencias

- [1] DEPARTMENT OF ENERGY, DOE National Laboratory Makes History by Achieving Fusion Ignition (2022), https://www.energy.gov/articles/doe-national-laboratory-makes-historyachieving-fusion-ignition
- [2] EUROfusion, Breaking New Ground: JET Tokamak's Latest Fusion Energy Record Shows Mastery of Fusion Processes (2024), https://euro-fusion.org/eurofusion-news/dte3record/
- [3] NORMILE, D., First plasma fired up at world's largest fusion reactor (2023), https://www.science.org/content/article/first-plasma-fired-world-slargest-fusion-reactor3
- [4] INSTITUTE OF PLASMA PHYSICS CHINESE ACADEMY OF SCIENCES, Reliable 403 Seconds Stationary H-mode Plasmas Demonstrated on EAST (2023), english.ipp.cas.cn/syxw/202304/t20230417_329393.html
- KREMEN, R., Fusion record set for tungsten tokamak WEST (2024),
 https://phys.org/news/2024-05-fusion-tungsten-tokamak-west.html
- [6] DING, S., et al., A high-density and high-confinement tokamak plasma regime for fusion energy, Nature 629 (2024) 555–560 https:// doi.org/10.1038/s41586-024-07313-3
- [7] SEO, J., et al., Avoiding fusion plasma tearing instability with deep reinforcement learning, Nature 626 (2024) 746–751 https://doi.org/10.1038/s41586-024-07024-9
- [8] LEVITT, B. et al., Elevated Electron Temperature Coincident with Observed Fusion Reactions in a Sheared-Flow-Stabilized Z Pinch, Phys. Rev. Lett. 132 (2024), https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.155101
- [9] KYOTO FUSIONEERING, [New Report] Advancing Fusion Technology: [9] KYOTO FUSIONEERING, [New Report] Advancing Fusion Technology: Insights and Collaboration Opportunities (2024), https://kyotofusioneering.com/en/news/2024/06/26/2421
- [10] NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCE, ENGINEERING, AND MEDICINE, Bringing Fusion to the U.S. Grid, The National Academies Press, Washington, D.C. (2021), https://doi.org/10.17226/25991
- [11] CHAPMAN, I., COWLEY, S., WILSON, H., Delivering fusion energy – The Spherical Tokamak for Energy Production (STEP), Phil. Trans. R. Soc. A 382 (2024), https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0416
- [12] MIT ENERGY INITIATIVE, The Role of Fusion Energy in a Decarbonized Electricity System (2024), https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2024/09/MITEI_Fusion-Report_091124_final_COMPLETE-REPORT_fordistribution.pdf

- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Opens Fusion Energy Discussion at COP28 as Momentum Keeps Growing (2023), https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-opens-fusion-energy-discussion-at-cop28-as-momentum-keeps-growing
- [14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA World Fusion Outlook 2023, Outlooks, IAEA, Vienna (2023), https://doi.org/10.61092/iaea.ehyw-jq1g
- [15] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, The global fusion industry in 2024 (2024), https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/ uploads/2024/07/2024-annual-global-fusion-industry-report.pdf
- [16] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, The Fusion Industry Supply Chain: Opportunities and Challenges (2023), https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2023/08/FIA-Supply-Chain-2023-FINAL.pdf
- [17] EUROPEAN COMMISSION DIRECTORATE-GENERAL FOR RESEARCH AND INNOVATION, The European High-Level Roundtable on Fusion energy calls for closer collaboration between the public and the private sector (2024), https://research-and-innovation.ec.europa.eu/news/all-research-and-innovation-news/european-high-level-roundtable-fusion-energy-calls-closer-collaboration-between-public-and-private-2024-03-14_en
- [18] WORLD BANK, How Can Public-Private Partnerships (PPPs) be Successful? (2023), https://www.worldbank.org/en/region/mena/brief/how-can-public-private-partnerships-ppps-be-successful
- [19] WORLD BANK, Climate-Smart PPPs (2024), https://ppp.worldbank.org/public-private-partnership/energy-and-power/climate-smart-ppps-1
- [20] WORLD BANK, Climate-Smart PPPs: Further Reading and Resources (2024), https://ppp.worldbank.org/public-private-partnership/climate-smart-ppps-further-reading-and-resources
- [21] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, FIA Launches Commercializing Fusion Energy Paper (2024), https://www.fusionindustryassociation.org/fia-launches-commercializing-fusion-energy-paper/
- [22] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Sistema de Información de Dispositivos de Fusión (2024), https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/FusDIS.aspx
- [23] DIRECTORATE-GENERAL FOR ENERGY (EUROPEAN COM-MISSION), et al., Analysis on a strategic public-private partnership approach to foster innovation in fusion energy, Luxembourg, European Union (2024), https://data.europa.eu/doi/10.2833/323326
- [24] US DEPARTMENT OF ENERGY, Fact Sheet: [24] US DEPARTMENT OF ENERGY, Fact Sheet: Inflation Reduction Act Supporting the Future of DOE Science (2022), https://www.energy.gov/science/articles/fact-sheet-inflation-reduction-act-supporting-future-doe-science

- [25] US DEPARTMENT OF THE TREASURY, U.S. Department of the Treasury, IRS Release Proposed Guidance to Continue Investment Boom in Clean Energy Production (2024), https://home.treasury.gov/news/press-releases/jy2376
- Consultation on a new National Policy Statement for Fusion Energy (2024), https://assets.publishing.service.gov.uk/media/667d5af197ea0c79ab-fe4d1a/new-nps-for-fusion-energy-consultation-document-1.pdf

DEPARTMENT FOR ENERGY SECURITY AND NET ZERO,

- [27] COMISIÓN EUROPEA, Propuesta de REGLAMENTO DEL PAR-LAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO por el que se establece un marco de medidas para reforzar el ecosistema europeo de fabricación de productos de tecnologías de cero emisiones netas (Ley sobre la industria de cero emisiones netas), COM/2023/161 final (2023), https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CE-
- [28] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, New IAEA Initiative to Enhance Fusion Energy Collaboration (2023), https://www.iaea.org/newscenter/news/new-iaea-initiative-to-enhance-fusion-energy-collaboration

LEX:52023PC0161

- [29] DEPARTMENT FOR ENERGY SECURITY AND NET ZERO,
 Towards fusion energy: the UK fusion strategy: The next stage of the
 UK's fusion energy strategy (2023),
 https://assets.publishing.service.gov.uk/media/65301b78d06662000d1b7d0f/towards-fusion-energy-strategy-2023-update.pdf
- [30] UK ATOMIC ENERGY AUTHORITY, UK launches search for industry partners to develop fusion plant (2024), https://www.gov.uk/government/news/uk-launches-search-for-industry-partners-to-develop-fusion-plant
- [31] US DEPARTMENT OF ENERGY, Joint Statement Between DOE and the UK Department for Energy Security and Net Zero Concerning a Strategic Partnership to Accelerate Fusion (2023), https://www.energy.gov/articles/joint-statement-between-doe-and-uk-department-energy-security-and-net-zero-concerning
- [32] THE WHITE HOUSE, International Partnerships in a New Era of Fusion Energy Development (2023), https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2023/12/02/international-partnerships-in-a-new-era-of-fusion-energy-development/
- [33] US DEPARTMENT OF ENERGY, Joint Statement between DOE and the Japan Ministry of Education, Sports, Science and Technology Concerning a Strategic Partnership to Accelerate Fusion Energy Demonstration and Commercialization (2024), https://www.energy.gov/articles/joint-statement-between-doe-and-japan-ministry-education-sports-science-and-technology
- [34] US DEPARTMENT OF ENERGY, Fusion Energy Strategy 2024 (2024), https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-06/fusion-energy-strategy-2024.pdf
- [35] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, Congress Increases U.S. Funding for Fusion Energy Sciences Research (2024), https://www.fusionindustryassociation.org/congress-increases-u-sfunding-for-fusion-energy-sciences-research/

- [36] REUTERS, Biden administration expands tax credits beyond wind, solar (2024), https://www.reuters.com/business/energy/biden-administration-expands-tax-credits-beyond-wind-solar-2024-05-29/
- [37] FEDERAL REGISTER, Department of Energy, Fusion Energy Public-Private Consortium Framework, 2024-12539 (2024).
- [38] COUNCIL FOR SCIENCE, TECHNOLOGY AND INNOVATION JAPAN, Fusion Energy Innovation Strategy (Provisional translation) (2024), https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/230426_strategy.pdf
- [39] MOONSHOT RESEARCH AND DEVELOPMENT PROGRAM, Announcing Call for Proposals for Project Managers in Moonshot Goal 10 (2024), https://www.jst.go.jp/moonshot/en/application/202403/index.html
- [40] THE WALL STREET JOURNAL, China Outspends the U.S. on Fusion in the Race for Energy's Holy Grail (2024), https://www.wsj.com/world/china/china-us-fusion-race-4452d3be
- [41] BLOOMBERG, China Seeks Nuclear Fusion Leap Through New R&D Company (2024), https://www.bloomberg.com/news/articles/2024-01-02/china-seeks-nuclear-fusion-leap-through-new-r-d-company
- [42] KOREA JOONGANG DAILY, Gov't to chase 'artificial sun' with \$866 million investment in nuclear fusion reactor development (2024), https://koreajoongangdaily.joins.com/news/2024-07-24/business/economy/Govt-to-chase-artificial-sun-with-866-million-investment-in-nuclear-fusion-reactor-development/2097463
- [43] FUSION FOR ENERGY, Discussing the European fusion strategy (2024), https://fusionforenergy.europa.eu/news/discussing-the-european-fusion-strategy/
- [44] MINISTERIO FEDERAL DE EDUCACIÓN E INVESTIGACIÓN DE ALEMANIA, Förderprogramm Fusion 2040, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn (2024).
- [45] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE DE ITALIA, Al MASE la prima riunione della Piattaforma Nazionale per un Nucleare Sostenibile (2023), https://www.mase.gov.it/comunicati/al-mase-la-prima-riunione-della-piattaforma-nazionale-un-nucleare-sostenibile
- [46] G7 ITALIA 2024, Apulia G7 Leaders' Communiqué (2024), https://www.g7italy.it/wp-content/uploads/Apulia-G7-Leaders-Communique.pdf
- [47] REUTERS, Britain, Canada sign deal to collaborate on fusion energy (2024), https://www.reuters.com/business/energy/britain-canada-sign-deal-collaborate-fusion-energy-2024-02-14/
- [48] CANADIAN NUCLEAR LABORATORIES, It's Time for a Canadian Fusion Strategy (2024), https://www.cnl.ca/clean-energy/hydrogen-research/fusion-day-2024/

- [49] UK ATOMIC ENERGY AUTHORITY, UKAEA and CNL partner to accelerate fusion energy development (2024), https://www.gov.uk/government/news/ukaea-and-cnl-partner-to-accelerate-fusion-energy-development
- [50] WORLD NUCLEAR NEWS, CNL announces programmes to speed fusion deployment (2024), https://world-nuclear-news.org/Articles/CNL-announces-programmes-to-speed-fusion-deploymen
- [51] GENERAL FUSION, General fusion partners with Canadian Nuclear Laboratories to advance commercial power plant design (2024), https://generalfusion.com/post/general-fusion-partners-with-canadian-nuclear-laboratories-to-advance-commercial-power-plant-design/
- [52] KYOTO FUSIONEERING, Kyoto Fusioneering and Canadian Nuclear Laboratories Launch Joint Venture, Fusion Fuel Cycles Inc. (2024), https://kyotofusioneering.com/en/news/2024/05/22/2337
- [53] FUSION ENERGY BASE, Equity Investments to Fusion Energy Companies 2010-2023 by Country (2024), https://www.fusionenergybase.com/article/equity-investments-to-fusion-energy-companies-2010-2023-by-country
- [54] FUSION ENERGY BASE, Fusion Energy Base (2024), https://www.fusionenergybase.com/
- [55] US CONGRESS, S.870 A bill to authorize appropriations for the United States Fire Administration and firefighter assistance grant programs, to advance the benefits of nuclear energy, and for other purposes, https://www.congress.gov/bill/118th-congress/senate-bill/870/all-info
- [56] PADILLA, A. The Fusion Energy Act of 2024, One pager (2024), https://www.padilla.senate.gov/wp-content/uploads/One-Pager-Fusion-Act.pdf
- [57] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Consolidated Guidance About Materials Licenses, Preliminary Draft Report, Rep. NUREG-1556, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, Washington, DC (2024).
- [58] DEPARTMENT FOR ENERGY SECURITY AND NET ZERO,
 Agile Nations working group on fusion energy regulation: initial
 recommendations, Policy Paper (2023),
 https://www.gov.uk/government/publications/agile-nations-uk-japan-and-canada-joint-recommendations-on-fusion-energy/agile-nations-working-group-on-fusion-energy-regulation-initial-recommendations
- [59] DEUTSCHER BUNDESTAG, Anhörung zum Rechtsrahmen für Fusionskraftwerke in Deutschland und Europa (2024), https://www.bundestag.de/ausschuesse/a18_bildung_forschung/oeffentliche_anhoerungen/1010504-1010504
- [60] MEXICO BUSINESS NEWS, Oil Industry Explores Viability of Nuclear Fusion (2023), https://mexicobusiness.news/oilandgas/news/oil-industry-explores-viability-nuclear-fusion

- [61] RECHARGE, Can a fusion energy pioneer backed by Google and Goldman Sachs help oil giant Occidental suck carbon from the air? (2024), https://www.rechargenews.com/energy-transition/can-a-fusion-energy-pioneer-backed-by-google-and-goldman-sachs-help-oil-giant-occidental-suck-carbon-from-the-air-/2-1-1661407
- [62] ENI, Eni signs a new collaboration agreement with CFS to support development of fusion energy (2023), https://www.eni.com/en-IT/media/press-release/2023/03/eni-signs-new-collaboration-agreement-with-cfs-development-fusion-energy.html
- [63] REUTERS, OpenAI CEO Altman says at Davos future AI depends on energy breakthrough (2024), https://www.reuters.com/technology/openai-ceo-altman-says-davos-future-ai-depends-energy-breakthrough-2024-01-16/
- [64] HELION ENERGY, Helion announces world's first fusion energy purchase agreement with Microsoft (2024), https://www.helionenergy.com/articles/helion-announces-worlds-first-fusion-ppa-with-microsoft/
- [65] COMMONWEALTH FUSION SYSTEMS, Commonwealth Fusion Systems Raises \$115 Million and Closes Series A Round to Commercialize Fusion Energy (2024), https://cfs.energy/news-and-media/close-series-a-round
- [66] NIKKIEI ASIA, Honda-backed Israeli startup to use nuclear fusion to power EVs (2024), https://asia.nikkei.com/Business/Energy/Honda-backed-Israeli-startup-to-use-nuclear-fusion-to-power-EVs
- [67] PR NEWSWIRE, NT-Tao Raises \$22M Series A to Ensure a Secure, Clean Energy Future with a Compact and Scalable Nuclear Fusion Solution (2023), https://www.prnewswire.com/il/news-releases/nt-tao-raises-22m-series-a-to-ensure-a-secure-clean-energy-future-with-a-compact-and-scalable-nuclear-fusion-solution-301735890.html
- [68] REUTERS, Chinese EV maker Nio invests in nuclear fusion startup (2023),
 https://www.reuters.com/business/energy/chinese-ev-maker-nio-invests-nuclear-fusion-startup-2023-05-19/
- [69] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, FIA Launches 2024 Supply Chain Report (2024), https://www.fusionindustryassociation.org/fia-launches-2024-supply-chain-report/
- [70] WORLD NUCLEAR NEWS, British-Japanese partnership for fusion development (2023), https://world-nuclear-news.org/Articles/British-Japanese-partnership-for-fusion-developmen
- [71] TOKAMAK ENERGY, Tokamak Energy and Furukawa Electric Group strengthen relationship to progress commercial fusion energy (2024), https://tokamakenergy.com/2023/01/11/tokamak-energy-and-furukawa-electric-group-strengthen-relationship-to-progress-commercial-fusion-energy/

- [72] HELION, Helion and Nucor announce collaboration to deploy 500 MWe fusion power plant (2023), https://www.helionenergy.com/articles/helion-nucor-collaboration-to-deploy-500-mw-fusion-power-plant/
- [73] RECHARGE, 'Fusion in five years' | AI and Facebook billionaire-backed pioneer signs Microsoft up for 'star power' (2023), https://www.rechargenews.com/energy-transition/fusion-in-fiveyears-ai-and-facebook-billionaire-backed-pioneer-signs-microsoftup-for-star-power/2-1-1450880
- [74] WORLD NUCLEAR NEWS, OPG investigates fusion as future option for Ontario (2024), https://world-nuclear-news.org/Articles/OPG-investigates-fusion-as-future-option-for-Ontar
- [75] BRUCE POWER, Bruce Power, General Fusion, and Nuclear Innovation Institute sign agreement to advance a net-zero future (2022), https://www.brucepower.com/2022/02/bruce-power-general-fusion-and-nuclear-innovation-institute-sign-agreement-to-advance-a-net-zero-future/
- [76] CHINA DAILY, Controlled nuclear fusion emerges as new frontier for China's venture capitalists (2024), https://www.chinadaily.com.cn/a/202407/23/WS669f-5ca3a31095c51c50f7ad.html
- [77] CHINESE ACADEMY OF SCIENCES, China Sets to Build Fusion Energy Research Facility (2023), https://english.cas.cn/newsroom/mutimedia_news/202309/ t20230918 376979.shtml
- [78] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, Chinese Fusion Energy
 Programs Are A Growing Competitor in the Global Race to Fusion
 Power (2024),
 https://www.fusionindustryassociation.org/chinese-fusion-energyprograms-are-a-growing-competitor-in-the-global-race-to-fusionpower/
- [79] BLOOMBERG, China Seeks Nuclear Fusion Leap Through New R&D Company (2024), https://www.bloomberg.com/news/articles/2024-01-02/china-seeks-nuclear-fusion-leap-through-new-r-d-company
- [80] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, World Survey of Fusion Devices 2022, Non-serial Publications, IAEA, Vienna (2022).
- [81] HONG, S.H., et al., Neutronics analysis for conceptual design of target system based on a deuteron accelerator-driven fusion neutron source, Fusion Eng. Des. 199 (2024) 114103 https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.114103
- [82] BUSINESS TIMES, Singapore could star in the race towards nuclear fusion energy (2024),
 https://www.businesstimes.com.sg/esg/singapore-could-star-ra-ce-towards-nuclear-fusion-energy
- [83] HEFEI INSTITUTES OF PHYSICAL SCIENCE, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES, Thailand Tokamak 1 (TT-1) Facility Officially Launched in Thailand (2023), https://english.hf.cas.cn/nr/ps/202307/t20230728 334143.html

- [84] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Fusion Research in Southeast Asia: IAEA and ITER Support School in Thailand (2020), https://www.iaea.org/newscenter/news/fusion-research-in-southeastasia-iaea-and-iter-support-school-in-thailand
- [85] EUROfusion, The EUROfusion Roadmap (2024), https://euro-fusion.org/eurofusion/roadmap/
- [86] GAUSS FUSION, Establishment of a European Fusion Association (2024), https://cdn.prod.website-files.com/6461f14c58e0282da166d83d/6669502d73c9e85f4d2af3e0_European%20Fusion%20Association PM EN%5B86%5D.pdf
- [87] NUCNET, Companies Announce Formation Of Nuclear Fusion Industrial Association (2024), https://www.nucnet.org/news/companies-announce-formation-of-nuclear-fusion-industrial-association-6-2-2024
- [88] ITER, Breaking ground at IFMIF-DONES (2023), https://www.iter.org/newsline/-/3938
- [89] UK ATOMIC ENERGY AUTHORITY, FTF Testing technology for future fusion power stations (2024), https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a820d4040f-0b62305b9237d/UKAEA_-_Fusion_Technology_Facilities.pdf
- [90] UK ATOMIC ENERGY AUTHORITY, JET's Decommissioning and Repurposing: [90] UK ATOMIC ENERGY AUTHORITY, JET's Decommissioning and Repurposing: A new chapter at UK Atomic Energy Authority (2024), https://ccfe.ukaea.uk/wp-content/uploads/files/JDR_New_Chapter_UKAEA.pdf
- [91] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Director General Visits Chile to Sign Agreements on Plastic Pollution and Lithium Mining (2024), https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-director-general-visits-chile-to-sign-agreements-on-plastic-pollution-and-lithium-mining
- [92] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Director General Grossi Visits Peru to Sign Agreements on Atoms4Food, Mining and Lithium (2024), https://www.iaea.org/newscenter/news/director-general-grossi-visits-peru-to-sign-agreements-on-atoms4food-mining-and-lithium
- [93] US DEPARTMENT OF ENERGY, DOE Announces \$46 Million for Commercial Fusion Energy Development (2023), https://www.energy.gov/articles/doe-announces-46-million-commercial-fusion-energy-development
- [94] OFFICE OF CONGRESSIONAL AND INTERGOVERNMENTAL AFFAIRS, Before the House Committee on Science, Space, and Technology Subcommittee on Energy (2023), https://www.energy. gov/congressional/articles/house-committee-science-space-and-technology-subcommittee-energy-4
- [95] THE WHITE HOUSE, Parallel Processing the Path to Commercialization of Fusion Energy (2022), https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2022/06/03/parallel-processing-the-path-to-commercialization-of-fusion-energy/

ABREVIACIONES

APP alianza público-privada ΙA inteligencia artificial **CFETR** China Fusion Engineering Test Reactor **CFS** Commonwealth Fusion Systems Laboratorios Nucleares Cana-**CNL DONES DEMO Oriented Neutron Source** DTT Divertor Tokamak Test Unión Europea **EU-DEMO** central europea de demostración **EVEDA** Engineering Validation and **Engineering Design Activities** HTS superconductor de alta temperatura **IFMIF** Instalación Internacional de Irradiación de Materiales de Fusión **JET** Toro Europeo Común **KSTAR** tokamak superconductor avanzado de investigación de Corea NIF Instalación Nacional de Ignición **UKAEA** Autoridad de Energía Atómica del Reino Unido W7-X Wendelstein 7-X WFEG Grupo Mundial sobre la Energía

de Fusión

NOTA EDITORIAL

Esta publicación ha sido editada por el personal de los servicios editoriales del OIEA en la medida en que se ha juzgado necesario para facilitar su lectura. En ella no se abordan cuestiones de responsabilidad, jurídica o de otra índole, por actos u omisiones por parte de persona alguna.

Aunque se ha puesto gran cuidado en mantener la exactitud de la información contenida en esta publicación, ni el OIEA ni sus Estados Miembros asumen responsabilidad alguna por las consecuencias que puedan derivarse de su uso.

Las orientaciones que aquí se ofrecen, en las que se describen buenas prácticas, representan la opinión de los expertos, pero no constituyen recomendaciones formuladas sobre la base de un consenso entre los Estados Miembros.

El uso de determinadas denominaciones de países o territorios no implica juicio alguno por parte de la entidad editora, el OIEA, sobre la situación jurídica de esos países o territorios, sus autoridades e instituciones o la delimitación de sus fronteras.

La mención de nombres de empresas o productos específicos (se indiquen o no como registrados) no implica ninguna intención de violar derechos de propiedad ni debe interpretarse como una aprobación o recomendación por parte del OIEA.

El OIEA no es responsable de la continuidad o exactitud de las URL de los sitios web externos o de terceros en internet a que se hace referencia en esta publicación y no garantiza que el contenido de dichos sitios web sea o siga siendo exacto o adecuado.

DERECHOS DE AUTOR

Todas las publicaciones científicas y técnicas del OIEA están protegidas conforme a lo dispuesto en la Convención Universal sobre Derecho de Autor aprobada en 1952 (Ginebra) y revisada en 1971 (París). Desde entonces, la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (Ginebra) ha ampliado la cobertura de los derechos de autor para incluir la propiedad intelectual de obras electrónicas y virtuales. Podría ser necesaria una autorización para utilizar textos completos, o parte de ellos, que figuren en publicaciones del OIEA, en formato impreso o electrónico. Para obtener más detalles a ese respecto, sírvase consultar la siguiente dirección: www.iaea.org/es/publicaciones/derechos-y-permisos. Las solicitudes de información pueden dirigirse a:

Sección Editorial
Organismo Internacional
de Energía Atómica
Vienna International Centre P.O. Box 100
A-1400 Viena (Austria)
Teléfono: +43 1 2600 22529 o 22530
Correo electrónico:
sales.publications@iaea.org
www.iaea.org/es/publicaciones

© OIEA, 2024 Impreso por el OIEA en Austria Octubre de 2024 IAEA/PAT/005

https://doi.org/10.61092/iaea.olb2-vgu6

https://www.iaea.org/es

ALBANIA FINLANDIA PAKISTÁN ALEMANIA FRANCIA PALAU ANGOLA GABÓN PANAMÁ ANTIGUA Y BARBUDA **GAMBIA** PAPUA NUEVA GUINEA ARABIA SAUDITA **GEORGIA PARAGUAY ARGELIA GHANA PERÚ ARGENTINA** GRANADA **POLONIA ARMENIA GRECIA PORTUGAL AUSTRALIA GUATEMALA QATAR AUSTRIA GUINEA** REINO UNIDO DE GRAN BRETAÑA **AZERBAIYÁN GUYANA** E IRLANDA DEL NORTE **BAHAMAS** HAITÍ REPÚBLICA ÁRABE SIRIA **BAHREIN HONDURAS** REPÚBLICA CENTROAFRICANA **BANGLADESH** HUNGRÍA **BARBADOS** REPÚBLICA CHECA **INDIA BELARÚS** INDONESIA REPÚBLICA DE MOLDOVA **BÉLGICA** IRÁN, REPÚBLICA REPÚBLICA DEMOCRÁTICA **BELICE** ISLÁMICA DEL **DEL CONGO** BENIN **IRAQ** REPÚBLICA DEMOCRÁTICA **BOLIVIA, ESTADO IRLANDA** POPULAR LAO PLURINACIONAL DE **ISLANDIA** REPÚBLICA DOMINICANA ISLAS MARSHALL **BOSNIA Y HERZEGOVINA** REPÚBLICA UNIDA DE TANZANÍA **BOTSWANA ISRAEL** RUMANIA **BRASIL ITALIA** RWANDA **BRUNEI DARUSSALAM JAMAICA** SAINT KITTS Y NEVIS JAPÓN **BULGARIA SAMOA BURKINA FASO JORDANIA SAN MARINO BURUNDI** KAZAJSTÁN SAN VICENTE Y **CABO VERDE KENYA CAMBOYA** KIRGUISTÁN LAS GRANADINAS **CAMERÚN KUWAIT** SANTA LUCÍA CANADÁ SANTA SEDE **LESOTHO COLOMBIA LETONIA SENEGAL COMORAS** LÍBANO **SERBIA CONGO LIBERIA SEYCHELLES** COREA, REPÚBLICA DE LIBIA SIERRA LEONA **COSTA RICA** LIECHTENSTEIN **SINGAPUR** CÔTE D'IVOIRE **LITUANIA** SRI LANKA **CROACIA LUXEMBURGO** SUDÁFRICA **CUBA** MACEDONIA DEL NORTE SUDÁN **CHAD** MADAGASCAR **SUECIA CHILE MALASIA SUIZA CHINA** MALAWI TAII ANDIA CHIPRE MALÍ TAYIKISTÁN **DINAMARCA MALTA TOGO** DJIBOUTI **MARRUFCOS DOMINICA MAURICIO TONGA ECUADOR MAURITANIA** TRINIDAD Y TABAGO **EGIPTO** MÉXICO **TÚNEZ EL SALVADOR** MÓNACO **TURKMENISTÁN EMIRATOS ÁRABES UNIDOS MONGOLIA** TÜRKİYE **MONTENEGRO FRITRFA UCRANIA ESLOVAQUIA** MOZAMBIQUE **UGANDA ESLOVENIA MYANMAR URUGUAY ESPAÑA NAMIBIA**

El Estatuto del Organismo fue aprobado el 23 de octubre de 1956 en la Conferencia sobre el Estatuto del OIEA celebrada en la Sede de las Naciones Unidas

PAÍSES BAJOS, REINO DE LOS

NFPAI

NÍGER

OMÁN

NIGERIA

NORUEGA

NUEVA ZELANDIA

NICARAGUA

ESTADOS UNIDOS

FEDERACIÓN DE RUSIA

DE AMÉRICA

ESTONIA

ESWATINI

FILIPINAS

ETIOPÍA

FIJI

UZBEKISTÁN

VENEZUELA, REPÚBLICA

BOLIVARIANA DE

VANUATU

VIET NAM

YEMEN

ZAMBIA

ZIMBABWE



"Conforme transitamos por las complejidades de esta revolucionaria tecnología, nuestra determinación es firme: aprovechar el poder de la energía de fusión en favor de un mundo sostenible, próspero y pacífico".

Director General del OIEA, Rafael Mariano Grossi