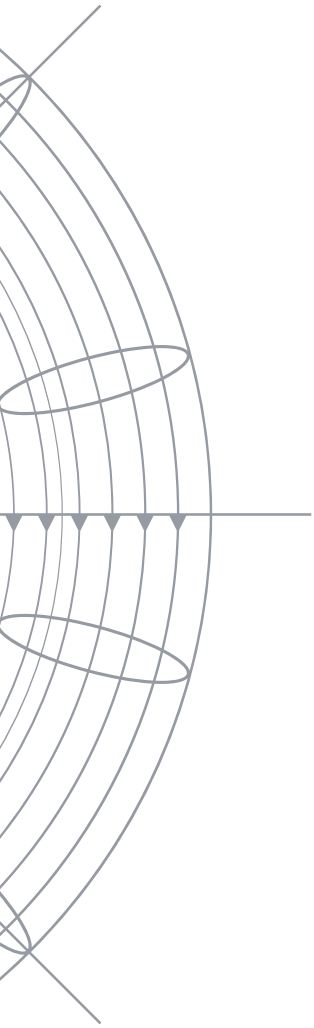
IAEA
Organismo Internacional de Energía Atómica

Elementos clave de la fusión

Una visión común para el desarrollo de la energía de fusión



Elementos clave de la fusión

Una visión común para el desarrollo de la energía de fusión

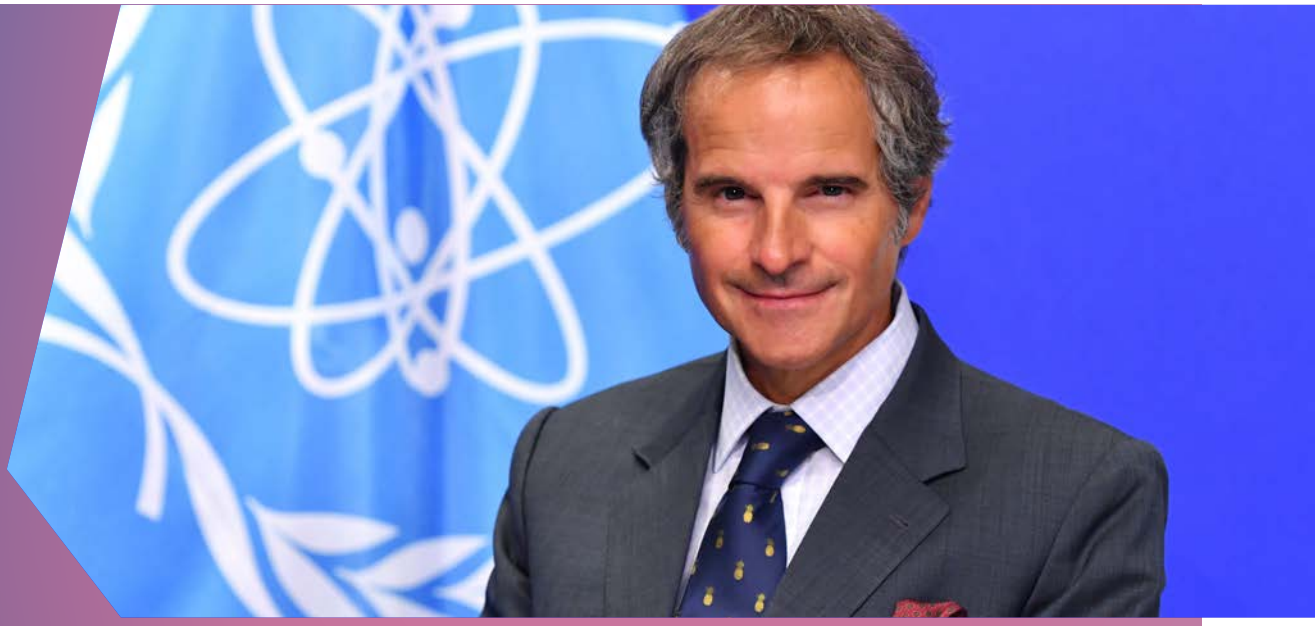
ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
VIENA, 2024

PREFACIO

La energía de fusión como posible solución sostenible de energía limpia para el mundo a largo plazo se ha divisado en el horizonte durante decenios. Pues esto ya no es así. Gracias a un nuevo impulso dado por los últimos avances del sector de la fusión, la implantación de centrales de fusión en el futuro cercano es cada vez más plausible.

El sector, potenciado por programas nacionales e internacionales como el proyecto ITER, está experimentando una transformación sin precedentes. Los avances científicos, combinados con un notable aumento de la inversión del sector privado, han catalizado esa transformación. En mis conversaciones, he notado gran entusiasmo, pasión y confianza entre los científicos e ingenieros que estudian numerosas ideas innovadoras para implantar sistemas de energía de fusión. En un mundo que se enfrenta al doble desafío planteado por el cambio climático y la seguridad energética, la aparición de una nueva fuente de energía limpia será fundamental para encontrar una solución a largo plazo.

Además, he notado el interés de los agentes clave en cooperar y poner en común experiencias, conocimientos y recursos de manera significativa con el objeto de resolver las cuestiones pendientes y establecer una base industrial para el desarrollo sostenible de la energía de fusión. Para facilitar esta labor, es importante que todas las partes interesadas que participan en el desarrollo de la energía de fusión compartan una visión y un entendimiento comunes del camino que conduce a la comercialización de esa energía. Teniendo presentes estos objetivos, esta publicación del OIEA ha determinado un conjunto de elementos clave de la fusión que seguirán proporcionando una hoja de ruta completa y una orientación inestimable a científicos, ingenieros, reguladores, empresarios y encargados de formular



políticas del mundo entero en el futuro, en que la energía de fusión desempeña un papel central en nuestro panorama energético mundial a corto y mediano plazo.

La publicación profundiza en los aspectos básicos necesarios para hacer realidad esta visión. El documento se estructura en torno a seis elementos fundamentales, cada uno de los cuales aborda facetas cruciales del paradigma de la energía de fusión. Entre ellos cabe mencionar las prioridades y métricas de investigación, desarrollo y demostración, así como los hitos en materia de comercialización; la gestión de recursos, fuerza de trabajo y conocimiento; la seguridad tecnológica, seguridad física y no proliferación; la colaboración a escala mundial; las funciones de las partes interesadas, y la participación del público. En conjunto, estos elementos constituyen la espina dorsal de una estrategia cohesiva para sortear las complejidades y aprovechar las oportunidades inherentes al desarrollo de la energía de fusión.

El OIEA agradece a todos aquellos que contribuyeron a esta publicación, comprendidos los miembros del Consejo Internacional de Investigaciones sobre la Fusión y otros expertos y examinadores del ámbito internacional, por sus valiosas aportaciones y su compromiso para preparar esta publicación en tan poco tiempo. El OIEA mantiene firme su apoyo al desarrollo de la energía de fusión e impulsa iniciativas que nos acercan a cumplir el sueño de contar con una energía limpia e ilimitada. Apostemos juntos por la promesa que alberga la energía de fusión, allanando así el camino hacia un futuro más propicio y sostenible para todos.

Rafael Mariano Grossi
Director General del OIEA

INTRODUCCIÓN

La conquista de la energía de fusión está cobrando impulso en todo el mundo, pues la tecnología de fusión promete ser una solución abundante, limpia y sostenible para nuestras necesidades energéticas del futuro. Hasta hace poco, el desarrollo de la energía de fusión se veía principalmente espoleado por programas nacionales e internacionales, como el proyecto ITER. Sin embargo, se ha producido un importante cambio, motivado por la necesidad urgente de fuentes de energía limpia para combatir el cambio climático y garantizar la seguridad energética. Los recientes avances en la ciencia y la tecnología de fusión, sumados a cuantiosas inversiones del sector privado, han transformado rápidamente el panorama de la energía de fusión. Los esfuerzos del sector público por avanzar en la aplicación práctica de la energía de fusión se ven complementados por un sector privado que ha crecido ampliamente y cuenta con más de 40 empresas activas y más de 7000 millones de dólares[1] en inversiones, y se está dando prioridad a iniciativas de comercialización.

Pese a sus diversos enfoques tecnológicos y acuerdos de financiación para el desarrollo de la energía de fusión, los sectores público y privado comparten un objetivo común: hacer de la fusión una fuente de energía viable y sostenible. Este objetivo común pone de relieve la importancia de una mayor colaboración entre Gobiernos y entidades privadas, que resulta crucial para acelerar la transición de la investigación a la comercialización.

[1] Situación a julio de 2024 [1].

Aunque estos avances han insuflado optimismo ante la idea de que la energía de fusión se haga realidad en un futuro próximo, todavía se ha de progresar más en varios ámbitos de investigación, desarrollo y demostración (ID&D). Además, para que la energía de fusión se adopte e implante de manera satisfactoria, es necesario ampliar la base industrial, desarrollar cadenas de suministro mundiales, crear una fuerza de trabajo competente, contar con directrices jurídicas y en materia de reglamentación claras y obtener el apoyo público, y para todo ello se requiere la participación y la cooperación de distintas partes interesadas.

En un sector que evoluciona tan rápidamente, es esencial cultivar un entendimiento común sobre las consideraciones clave en torno a la energía de fusión. Ese entendimiento abarca todo, desde la investigación y el desarrollo hasta la implantación y la comercialización, y sienta las bases para afrontar las complejidades y oportunidades del panorama de la energía de fusión. La presente publicación ofrece un panorama general exhaustivo de los seis elementos clave necesarios para que haya una visión común en el desarrollo de la energía de fusión, y facilita así un enfoque unificado para promover la fusión como una piedra angular de las soluciones energéticas del futuro.

Los seis elementos clave de la fusión

página 8 **1. INVESTIGACIÓN, DESARROLLO Y DEMOSTRACIÓN**

2. INDUSTRIALIZACIÓN página 14

página 22 **3. SEGURIDAD TECNOLÓGICA, SEGURIDAD FÍSICA Y NO PROLIFERACIÓN**

4. COLABORACIÓN A ESCALA MUNDIAL página 30

página 38 **5. PARTES INTERESADAS**

6. PARTICIPACIÓN DEL PÚBLICO página 48

UN OBJETIVO

hacer de la fusión una fuente de energía viable y sostenible

1.

Prioridades y métricas de **investigación, desarrollo y demostración** e hitos en materia de comercialización

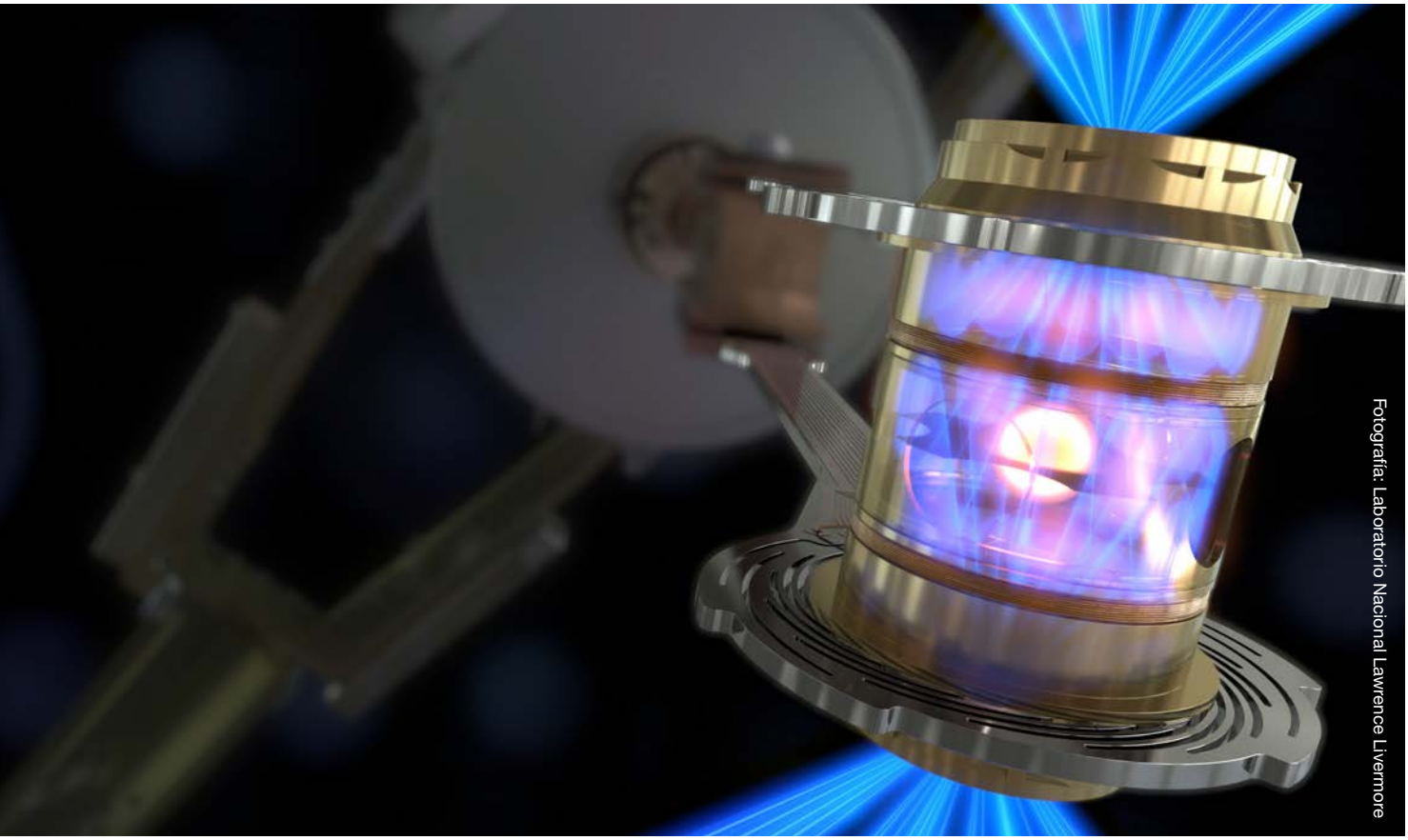
Para poder comercializar la energía de fusión hace falta lograr más avances en los ámbitos científicos y tecnológicos conexos. Por otra parte, para acelerar la demostración y la implantación de centrales de fusión y desarrollar cadenas de suministro es esencial que las actividades de investigación y desarrollo reciban apoyo de manera continuada.

Prioridades en materia de investigación, desarrollo y demostración y documentación de los avances

Al abordar las esferas en las que se ha de seguir avanzando, es crucial diferenciar los grados de madurez de los diversos componentes de una central de fusión y su integración en un sistema cohesionado capaz de producir energía de manera comercialmente viable.

A continuación se señalan las esferas esenciales de ID&D en las que se registra un menor nivel de preparación tecnológica[2] (TRL) para el establecimiento de una central de fusión. Aunque cada esfera es crucial, el desarrollo de materiales resistentes a condiciones extremas y el ciclo del combustible de tritio se perfilan como las necesidades más acuciantes para poder producir energía de fusión basada en deuterio-tritio (D-T).

[2] Los niveles de preparación tecnológica ofrecen un método normalizado y objetivo para evaluar el grado de madurez de diferentes tecnologías y sus distintos componentes.



Fotografía: Laboratorio Nacional Lawrence Livermore

Materiales resistentes a condiciones extremas

El intenso flujo de neutrones de alta energía y otras partículas generadas durante la fusión somete los materiales estructurales a condiciones extremas. Una de las prioridades principales para mejorar la viabilidad comercial de la fusión es encontrar materiales capaces de soportar mejor esas condiciones y que, al mismo tiempo, mantengan la integridad estructural y unos niveles aceptables de activación. Estos materiales también han de ser compatibles con el mantenimiento de la pureza del plasma y con las difíciles condiciones térmicas, de radiación y de vacío en el interior del dispositivo de fusión.
Con conceptos innovadores, como las primeras paredes líquidas, podrían rebajarse ciertos requisitos relacionados con los materiales estructurales. Es importante también hacer frente a los posibles efectos de estas condiciones extremas en otros diversos materiales, como los que se utilizan en mantos reproductores, actividades de diagnóstico, sistemas de calefacción, sistemas de manipulación a distancia y divertores, y tener en cuenta una serie de propiedades de los materiales más allá de las características mecánicas.

Ciclo del combustible de tritio

El tritio, un isótopo radiactivo del hidrógeno, es un combustible clave para las centrales de fusión D-T. Ahora bien, tiene una vida media relativamente corta (12 años) y no abunda en la naturaleza. El desarrollo de técnicas eficientes de reproducción y extracción de tritio es esencial para desencadenar, y luego mantener, la producción de energía de fusión en una central de fusión D-T.

Fotografía: Instituto de Física del Plasma, Academia China de Ciencias

Gestión de la descarga de energía del plasma

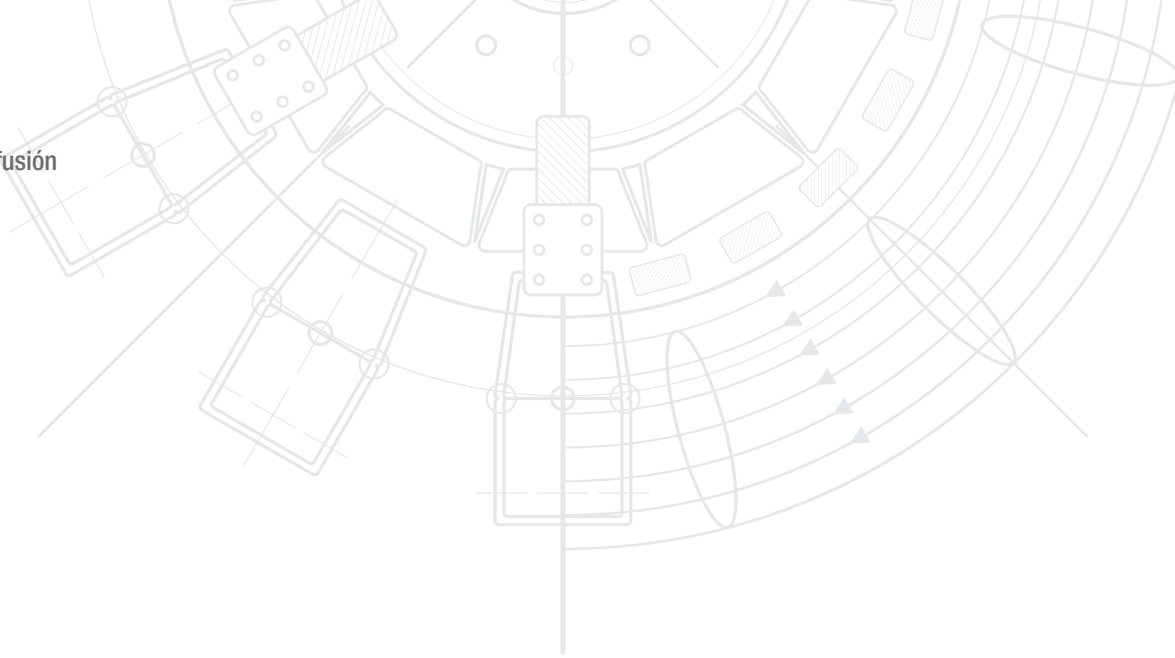
Uno de los principales desafíos en las centrales de fusión será la gestión del calor y la descarga de partículas procedentes del plasma. En enfoques de confinamiento magnético se plantea otro desafío más: las interacciones plasma-material en estado estacionario. Las condiciones extremas de densidad de potencia previstas en las centrales de fusión entrañan importantes dificultades, desde el punto de vista de la ingeniería, en cuestiones como los materiales expuestos al plasma, las técnicas de refrigeración y el diseño de componentes. El fomento de la investigación sobre regímenes de plasma adecuados se mantiene como una necesidad experimental clave.

Manipulación a distancia

Las centrales de fusión operan en entornos difíciles, inaccesibles a los operadores humanos. Por ello, las tareas de mantenimiento y reparación podrían requerir manipulación a distancia. Es preciso seguir trabajando en el desarrollo de estos sistemas de manipulación a distancia, como el uso de sistemas robóticos avanzados, para las aplicaciones comerciales de la energía de fusión.

Extracción de calor

Para lograr que la electricidad tenga un costo competitivo, la energía generada en el interior de la central de fusión ha de extraerse de manera eficiente y se ha de disponer de los componentes correspondientes en suficiente medida. En conceptos que se sirven de un ciclo de vapor, la eficiencia termodinámica de la central aumentará si el manto puede funcionar a temperaturas más elevadas, para lo cual se necesitan materiales de activación reducida.



La mayoría de los conceptos de la energía de fusión presentan las mismas consideraciones en materia de ID&D, además de algunas esferas adicionales de desarrollo necesarias que vendrán determinadas por la tecnología de confinamiento[3] y el combustible elegido[4]. Una vez incrementado el TRL de las esferas objeto de examen, el éxito de la comercialización de la energía de fusión dependerá de la optimización del diseño y la validación de los componentes (por ejemplo, materiales tolerantes a la radiación, sensores endurecidos contra la radiación) en un entorno de central de fusión, teniendo en cuenta desde las primeras etapas las limitaciones económicas y relacionadas con la seguridad. Esto incluye el desarrollo de soluciones integradas que combinen la ciencia del plasma en combustión, la tecnología de confinamiento, la gestión del calor y el blindaje.

Es esencial aunar esfuerzos en todas las esferas de ID&D e integración anteriormente señaladas. El aprovechamiento de los avances tecnológicos —como la computación de alto rendimiento, la inteligencia artificial y la fabricación avanzada— puede acelerar el progreso de la energía de fusión, y allanar el camino hacia una comercialización más amplia. Además, desarrollar la infraestructura necesaria (como instalaciones, sistemas y marcos) para apoyar todo el ciclo de vida de la energía de fusión es vital para el éxito de su comercialización.

Por último, a medida que la energía de fusión pasa del desarrollo a la demostración y la implantación, es importante que las partes interesadas del sector de la energía de fusión tanto actuales como emergentes documenten y pongan en común nuevos resultados de manera adecuada. Seguir métodos tradicionales como llevar a cabo procesos de examen por homólogos, garantizar la transparencia en las comunicaciones relativas a avances, proteger la propiedad intelectual cuando corresponda y colaborar eficazmente con Gobiernos, inversores y el público mediante una comunicación estratégica son, todos ellos, pasos esenciales.

---

[3] Por ejemplo, en el caso de la fusión por confinamiento inercial, entre las esferas clave de ID&D también figura la ampliación, de forma económica, de las tecnologías de accionadores y blancos.

[4] La elección del combustible viene determinada por el tipo de proceso de fusión que se considere; por ejemplo, deuterio-tritio, deuterio-deuterio, deuterio-helio 3 o protón-boro 11.

Métricas de investigación, desarrollo y demostración e hitos en materia de comercialización

Las siguientes métricas de desarrollo pueden servir para evaluar los avances en ID&D de la energía de fusión:

- demostrar un alto rendimiento y un funcionamiento continuo (o un funcionamiento pulsado con alta tasa de repetición en el caso de la fusión por confinamiento inercial y la fusión magnetoinercial) al tiempo que se logran condiciones en la interacción plasma-material que garanticen una vida útil aceptable para los componentes de la vasija;
- para conceptos de energía de fusión basados en D-T:
  - conseguir una tasa de reproducción de tritio[5] superior a 1, posiblemente con enriquecimiento de litio-6;
  - demostrar la eficiencia de la extracción y la recirculación de tritio;
  - desarrollar las cadenas de suministro adecuadas para la producción de combustible de tritio, y
- mostrar la ganancia neta de energía que puede extraerse de una central de fusión.

Para comercializar la energía de fusión es necesario alcanzar los siguientes hitos fundamentales:

- demostrar simultáneamente la suficiencia de combustible[6] y una ganancia neta de energía en una única central de fusión;
- asegurar el emplazamiento de la central de fusión y obtener licencias/permisos para la construcción, la operación y la clausura;
- establecer vías de estrategias y de reglamentación adecuadas para la gestión de desechos, y
- conectar la central de fusión a una red o sistema de consumo energético a un precio competitivo.

[5] La relación entre la tasa global de producción de tritio y la tasa de consumo total en un dispositivo de fusión.
[6] Por autosuficiencia o mediante suministro externo de combustible.

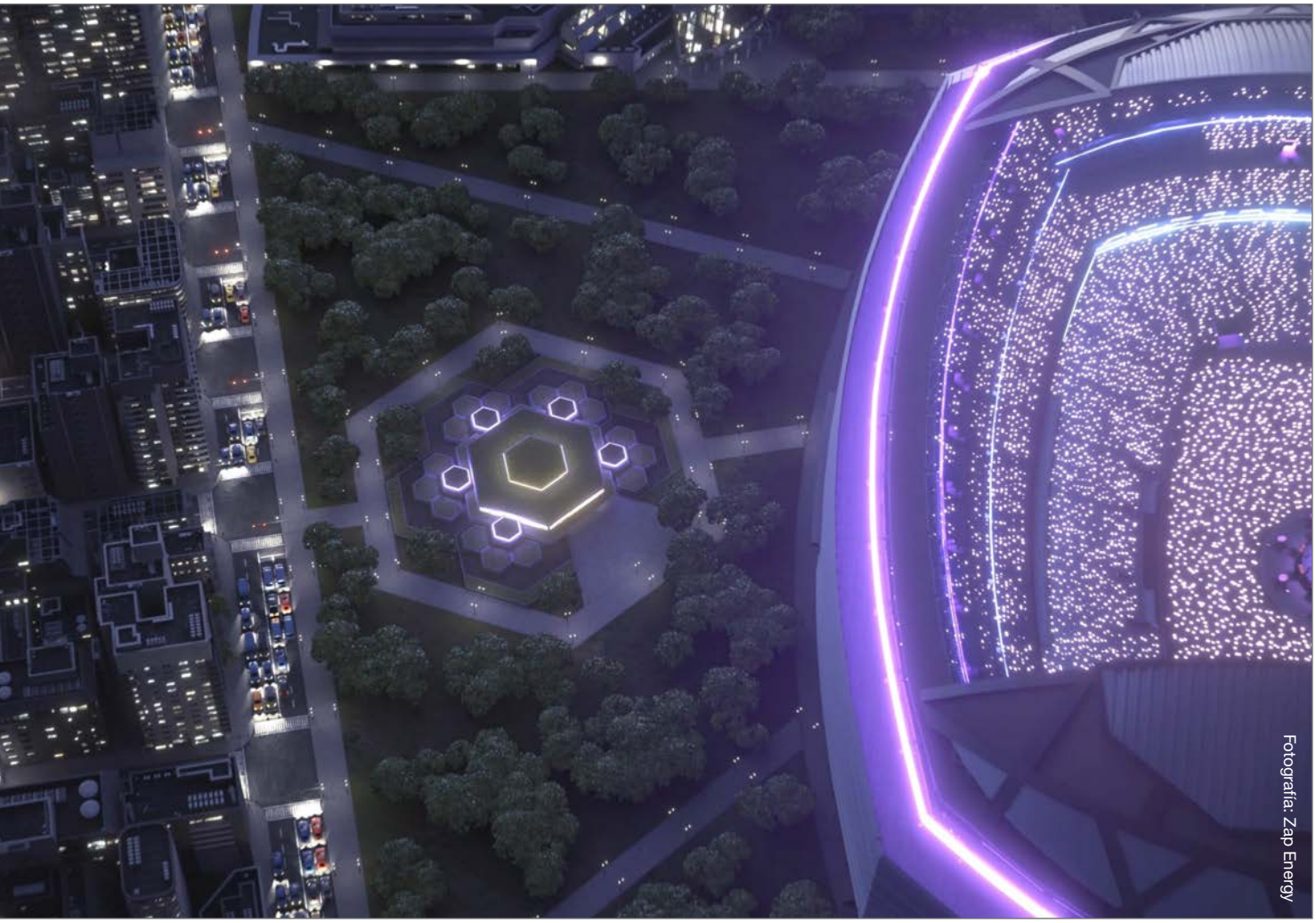
2.

Recursos, fuerza de trabajo y gestión del conocimiento para **la industrialización**

Para establecer una industria en sentido pleno, capaz de aprovechar el potencial de la fusión, hacen falta recursos adecuados, fuentes de ingresos paralelas, una fuerza de trabajo competente, estrategias eficaces de gestión del conocimiento, así como marcos jurídicos, reguladores y de propiedad intelectual claros.

Recursos financieros y mecanismos de financiación

No cabe subestimar la magnitud de la inversión, tanto pública como privada, ni los plazos durante los cuales habrá que mantener el esfuerzo inversor. Esto obedece a la complejidad técnica que entraña el dominio de la fusión, a las exigentes condiciones que deberá mantener cualquier central que produzca energía, así como a la escala de las instalaciones científicas e industriales que serán necesarias para la investigación, el desarrollo, los ensayos, la fabricación y, finalmente, la producción de energía.



Fotografía: Zap Energy

Los recursos públicos y privados cumplirán funciones diferentes pero complementarias. La inversión de los Gobiernos será clave en los siguientes aspectos:

Financiación de la investigación y el desarrollo temprano

La energía de fusión sigue necesitando importantes esfuerzos de ID&D. Los institutos de investigación y entidades públicas similares desempeñan un papel importante por lo que respecta a las esferas de ID&D con un bajo TRL, y, para desarrollar una industria, esas instituciones y sus programas deberán contar con una financiación continua. Si bien menos comprometidas con la investigación fundamental, las entidades privadas también son importantes agentes en las fases tempranas de desarrollo, y suelen recibir apoyo público mediante distintos mecanismos, como subvenciones, exenciones fiscales y alianzas público-privadas. La financiación y el apoyo públicos para acelerar la ID&D son esenciales, especialmente en esta fase de una industria emergente. Sin embargo, se ha de prestar una atención especial a la estrategia propiamente dicha de este apoyo, ya que disposiciones excesivamente engorrosas (como la fragmentación de mecanismos de apoyo, el volumen de cada subvención, las disposiciones relativas a la propiedad intelectual creada, la contabilidad de costos o las cargas relacionadas con la presentación de informes) pueden hacer que estos mecanismos de apoyo resulten poco atractivos para entidades tanto públicas como privadas.

Financiación de proyectos de demostración

Los proyectos que actúan como demostrador tecnológico y/o instalaciones de ensayo son cruciales para establecer y sostener la industria, pero si no constituyen activos comerciales podrían requerir financiación pública. Gracias a proyectos de esa índole (por ejemplo, el **ITER**), es posible desarrollar una cadena de suministro, pues las empresas públicas y privadas compiten por participar y desarrollar así sus competencias y su base industrial. Esos proyectos han de seguir financiándose aun cuando se produzcan dificultades o demoras, y deberán tener suficiente relevancia comercial y duración, así como ser suficientes en número, para que se pueda establecer y mantener una cadena de suministro industrial.

El ITER, que se encuentra en proceso de construcción en Francia, es el mayor experimento de fusión en desarrollo. Se trata de una iniciativa internacional conjunta de China, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, la India, el Japón, la República de Corea y la Unión Europea. El objetivo del ITER es demostrar que la producción de energía de fusión es viable desde un punto de vista científico y tecnológico.

Fotografía: Organización ITER

Apoyo a proyectos de centrales piloto y/o primeros proyectos de una serie

Algunas estrategias nacionales de fusión, basadas en prácticas comerciales y políticas nacionales, parten de la base de que serán las entidades privadas —más que las públicas— las que encabezarán la demostración y la implantación de las centrales de fusión a escala comercial. Para lograr esto, los Gobiernos tendrían que hacer posible una transición del sector público al privado sirviéndose de mecanismos adecuados de riesgo compartido para las primeras centrales comerciales (centrales piloto y/o proyectos primeros de una serie), en que el equilibrio riesgo-recompensa sea tal que siga haciendo falta cierto apoyo gubernamental para que el sector privado pueda reunir el capital necesario. Esto puede darse de diferentes maneras, como se ha demostrado en otras industrias de complejidad comparable con proyectos encabezados por el sector público o el privado y respaldados por mecanismos de riesgo compartido[7].

La financiación (capital y deuda) procedente de inversiones privadas puede incluir, entre otros, los siguientes aspectos:

- desarrollo e industrialización de la tecnología mediante programas de fusión específicos y sus centrales y componentes conexos;
- desarrollo de la capacidad industrial en forma de competencias, procesos (por ejemplo, procesos de fabricación) e instrumentos necesarios para la ejecución de esos programas, y
- desarrollo de instalaciones con fines de ensayo (por ejemplo, relacionadas con el ciclo de combustible) y proyectos de centrales (por ejemplo, centrales piloto o centrales que son las primeras o las enésimas de una serie).

[7] Entre los ejemplos de estos mecanismos de riesgo compartido figuran los programas de desarrollo basados en hitos, los contratos por diferencias o los contratos de base de activos regulados.

Fuerza de trabajo

Para el desarrollo de una robusta fuerza de trabajo que se adapte a la comercialización de la energía de fusión se necesita un enfoque amplio que integre iniciativas nacionales tanto públicas como privadas, posiblemente respaldadas por programas de intercambio de conocimientos y colaboración a escala internacional.

Dado el limitado tamaño actual de la comunidad dedicada a la fusión, es necesario un esfuerzo conjunto para atraer, educar, capacitar y desarrollar una fuerza de trabajo especializada y competente integrada por científicos, ingenieros, gestores de proyectos, operadores, técnicos y reguladores capaces de hacer frente a los diversos desafíos inherentes a la implantación de la tecnología de fusión, haciendo hincapié en el desarrollo de una fuerza de trabajo amplia más allá del enfoque actual de capacitar a futuros investigadores.

La creación de una fuerza de trabajo así se beneficiaría enormemente del talento, las competencias y la experiencia de otras industrias que ya está atrayendo la industria de fusión. Esto podría acelerarse mediante programas específicos de conversión de competencias. Sin embargo, no hay que subestimar hasta qué punto compiten las industrias y las instituciones públicas de investigación por talento de alto nivel en el ámbito de la ciencia y la ingeniería.

Hay que hacer hincapié en el desarrollo de especialistas con una mentalidad orientada a la industria, amplios conocimientos técnicos especializados, capacidad para tender puentes entre disciplinas técnicas, y experiencia en las distintas fases del ciclo de vida de un proyecto. De esta manera se aspira a evitar que determinadas especialidades o las fases de desarrollo, diseño e implementación se queden aisladas, y ayudar a la industria a satisfacer las demandas de expansión y comercialización previstas. Además, dado que el funcionamiento de las centrales de fusión dependerá de una sólida cadena de suministro que abarque tanto tecnologías de fusión muy específicas como elementos comunes a otras industrias, es vital fomentar esa aptitud interdisciplinar.

Gestión del conocimiento

Para el desarrollo de la industria de fusión y la comercialización de la energía de fusión es preciso crear y divulgar ampliamente conocimientos sobre ciencia, ingeniería, fabricación y de carácter operacional. Hoy en día, una parte importante del desarrollo y el intercambio de esos conocimientos proviene de proyectos financiados con fondos públicos, por lo que esos proyectos deben tratar de maximizar la creación, la documentación y la difusión (conforme a los protocolos adecuados) de dichos conocimientos. La participación de los sectores público y privado en la gestión y el intercambio de conocimientos puede facilitarse mediante marcos de propiedad intelectual claros y sólidos. Los foros industriales también pueden desempeñar un papel importante, al fomentar el intercambio de información esencial para aspectos como la seguridad tecnológica, la seguridad física y la excelencia operacional en beneficio de todos.

Dado que la industria de fusión es una industria emergente y, además, sigue varios enfoques técnicos diferentes, es importante también poner en común los conocimientos con industrias que, en comparación, son complejas y están más establecidas, así como entre los proyectos dedicados a investigar los distintos enfoques de confinamiento en relación con la fusión. En ese sentido, órganos profesionales, organizaciones comerciales y programas de intercambio entre reguladores pueden desempeñar un papel relevante.

Por último, la adquisición y organización de conocimientos mediante normas, códigos y estándares nacionales e internacionales, así como la puesta en común de orientaciones y/o prácticas óptimas, también pueden contribuir en gran medida al desarrollo de la industria.

Fotografía: Organización ITER

El camino hacia la industrialización

Si bien la fusión sigue siendo un campo incipiente, que se nutre de la evolución del sector energético actual, es probable que haya grandes empresas integradoras, empresas de segundo nivel especializadas en sistemas o subsistemas de una central de fusión y un número muy elevado de empresas pequeñas a medianas que tengan la propiedad intelectual de determinados componentes o piezas. Para crear un sector dinámico se necesitarán intervenciones con las que todos estos tipos de empresas puedan ampliar su competencia y experiencia en fusión.

El éxito en la transición de las tecnologías de fusión de la investigación y el desarrollo temprano a las aplicaciones comerciales será crucial para establecer una próspera industria de fusión. Tradicionalmente, los proyectos nacionales e internacionales de gran envergadura han servido, *de facto*, como cabeza de puente[8] y contribuido notablemente a mantener los recursos humanos y la cadena de suministro de la fusión. Para desarrollar aún más la industria de fusión, es necesario que el sector público siga desempeñando un papel activo sosteniendo la cadena de suministro mediante sus programas públicos, por ejemplo, estableciendo nuevas instalaciones de investigación, a fin de garantizar que los conocimientos generales y especializados acumulados en los programas públicos se transfieran sin fisuras a la industria en el marco de unas disposiciones adecuadas. Estos programas públicos complementarán las inversiones del sector privado, que podrían incluir las actividades descritas en la página 17. Además, seguirán siendo necesarios varios instrumentos facilitadores clave, entre ellos, los siguientes:

[8] Se dice que un Gobierno es “cabeza de puente” cuando adquiere un compromiso a largo plazo para proporcionar una base de ingresos estable y reducir el riesgo financiero de las empresas privadas.

Un marco jurídico y regulador claro y estable

Una parte importante para atraer financiación privada y elaborar planes de desarrollo creíbles es la claridad con respecto al marco jurídico y regulador, que se logra, por ejemplo, estableciendo procesos para la obtención de permisos relativos a la selección de un emplazamiento, la construcción y las operaciones.

Un sólido marco de propiedad intelectual

Un sólido marco de propiedad intelectual es esencial para facilitar la colaboración entre las partes durante la transición de la investigación a la comercialización de la tecnología.

Tecnologías pertinentes tanto para la energía de fusión como para otros mercados

Uno de los desafíos fundamentales que se plantean en la creación de una industria privada de fusión es que, dados los plazos asociados al desarrollo de esta industria, los inversores suelen exigir fuentes de ingresos a corto y mediano plazo. Esas fuentes pueden provenir de aplicarse a otros mercados tecnologías desarrolladas para la fusión (por ejemplo, materiales innovadores, robótica o aplicaciones médicas). Se podrían diseñar programas de desarrollo, públicos o privados, para facilitar esta cuestión.

Un ecosistema de colaboración más amplio

Con la creación de centros de capacidades en este ámbito (a menudo regionales, que invitan a participar a los gobiernos estatales y locales y sus comunidades), a menudo pueden acelerarse la creación y el intercambio de conocimientos, así como el desarrollo de tecnologías, mediante un entorno dinámico en el que múltiples organizaciones pueden colaborar, compartir costos de desarrollo y poner en común conocimientos especializados y competencias.

3.

Seguridad tecnológica, seguridad física y no proliferación

La reglamentación de la seguridad tecnológica y la seguridad física de las centrales de fusión debe ser acorde a sus riesgos, teniendo en cuenta sus características únicas, como la ausencia de una reacción en cadena y su capacidad de entrar inmediatamente en régimen de parada. Igualmente importante es garantizar un bajo riesgo de proliferación mediante el diseño y la supervisión reglamentaria a medida que se desarrolla la energía de fusión.

Nociones fundamentales de seguridad radiológica

Para poder implantar con éxito la energía de fusión es esencial contar con diseños tecnológica y físicamente seguros. El enfoque de seguridad respecto de las centrales de fusión debe ser coherente con el volumen Nº SF-1 de la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA*, titulado *Principios fundamentales de seguridad* [2], que se aplica a todas las circunstancias que dan lugar a riesgos asociados a las radiaciones, como los usos en el ámbito médico, la generación eléctrica y las aplicaciones industriales. El objetivo fundamental en este marco es proteger a las personas y al medio ambiente de los efectos nocivos de la radiación ionizante.

Los principios fundamentales de seguridad dispuestos en SF-1 [2] son aplicables a todas las instalaciones y actividades que tienen fines pacíficos, a lo largo de toda su vida útil, y a las medidas protectoras para reducir los riesgos existentes asociados a las radiaciones. Esas instalaciones y actividades incluyen cualquier lugar en que se produzcan, procesen, utilicen, manipulen, almacenen o eliminen materiales radiactivos en escala tal que sea necesario tomar en consideración la protección y la seguridad [2]. Esos principios se pueden aplicar, pues, a las centrales de fusión, que utilizan y producen materiales radiactivos a una escala tal que queda justificado tomar en consideración la seguridad.

En las publicaciones Part 1 a Part 7 [3-9] de los *Requisitos de Seguridad Generales* del OIEA se tratan temas como la evaluación de la seguridad y los marcos reguladores. Los *Requisitos de Seguridad Generales* son aplicables a todos los usos de la radiación, incluidos los dispositivos de fusión.

Las organizaciones responsables de la evaluación y el control de los riesgos radiológicos deben evaluar y controlar los riesgos para las personas y el medio ambiente asociados a las radiaciones como resultado de un funcionamiento normal y de incidentes/accidentes. Esto se aplica a todo el ciclo de vida de la instalación, incluidos el diseño, la operación, la gestión del combustible y de los desechos, y el desmantelamiento/la clausura. Para respaldar la justificación de la seguridad harán falta modelización y actividades de diagnóstico. Es esencial tener en cuenta las medidas de seguridad nada más comenzar el proceso de diseño de todos los sistemas que intervienen. Las centrales de fusión son novedosas y, por ello, en el análisis de la seguridad hay que examinar detenidamente las incertidumbres en el funcionamiento de diversos sistemas. Según la tecnología en cuestión, se prevén diferentes interacciones de materiales (por ejemplo, litio, agua), radioisótopos y energías de partículas, lo cual entraña diversos peligros potenciales que han de tenerse en cuenta. Los diseñadores de centrales de fusión deben estudiar estos principios para limitar los peligros potenciales y reducir al mínimo los desechos radiactivos, en la medida de lo factible.

Enfoques para regular la energía de fusión

En algunos Estados Miembros del OIEA ya se han autorizado mediante la concesión de licencias y llevado a cabo experimentos de fusión para actividades de investigación y desarrollo (I+D). Se prevé que, en los próximos años, los diseñadores ejecutarán los primeros proyectos piloto y de demostración. Si estos proyectos prosperan, podrían ir seguidos de la adopción comercial generalizada de las centrales de fusión.

En relación con los diseños que se contemplan para la adopción comercial generalizada, actualmente los Estados Miembros están evaluando enfoques para regular las centrales de fusión que sean proporcionales a los riesgos que estas plantean. Estas evaluaciones tienen en cuenta las características inherentes a la fusión (por ejemplo, ausencia de reacción en cadena, parada inmediata en caso de pérdida del suministro eléctrico), las características de los materiales radiactivos presentes y la gestión de los materiales radiactivos en el emplazamiento. Este enfoque responde al enfoque graduado del OIEA en la reglamentación [10].

Ya existen o se están elaborando en los Estados Miembros requisitos y orientaciones para las centrales de fusión y la gestión segura de los desechos radiactivos en consonancia con los marcos nacionales y los peligros conexos. Estos requisitos y orientaciones abarcan la seguridad tecnológica y la seguridad física. El OIEA puede prestar apoyo a los órganos reguladores en la elaboración de requisitos de seguridad tecnológica y orientaciones de seguridad física para la energía de fusión que sean apropiados según la tecnología y los peligros

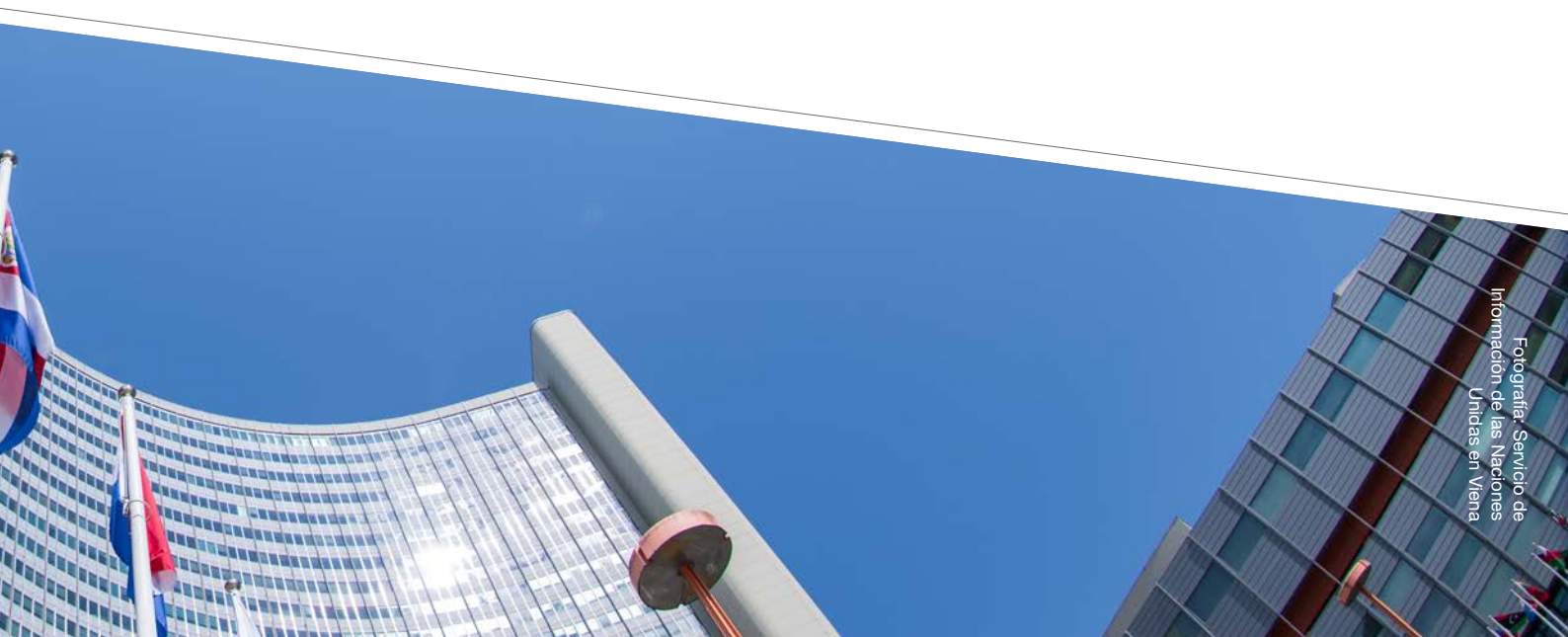
y que permitan incorporar las enseñanzas extraídas a medida que vayan madurando los diseños, como se ha hecho en otros regímenes de reglamentación.

La cooperación entre reguladores es ventajosa. La existencia de enfoques comunes y una toma de decisiones uniforme entre los Estados Miembros, cuando sea factible, racionalizarán el proceso de solicitud, ya que no será tan necesario que los diseñadores revisen sus solicitudes, soluciones técnicas y justificaciones en las distintas jurisdicciones.

Utilizar los mismos términos y mantener posiciones comunes con respecto a cuestiones técnicas puede ayudar a todos los reguladores aunque se apliquen enfoques de reglamentación diferentes. La colaboración continua en materia de reglamentación para nuevos desafíos técnicos, así como para temas de seguridad física como la ciberseguridad, puede ayudar a poner en común conocimientos y experiencias de forma que los reglamentos para las centrales de fusión traten estas esferas de forma adecuada.

Las organizaciones internacionales como el OIEA pueden facilitar debates bilaterales y multilaterales entre los Estados Miembros que estén elaborando marcos reguladores similares. La coordinación en el OIEA en aras de la uniformidad y la coherencia de los esfuerzos ayudará a todos los Estados Miembros a avanzar en sus estructuras reguladoras de la fusión. Es posible que, hasta que hayan madurado las centrales de fusión, no se justifique decidir si es necesario o no que el OIEA elabore normas de seguridad para la fusión.

Las organizaciones de normalización de la industria podrían participar en la elaboración de enfoques de diseño comunes que ayuden a racionalizar los exámenes reglamentarios.



Fotografía: Servicio de Información de las Naciones Unidas en Viena

Transición hacia la comercialización generalizada de las centrales de fusión

Hasta la fecha, la experiencia en la esfera de la energía de fusión se ha limitado a proyectos de I+D. En un futuro se prevé producir y comercializar este tipo de energía, lo que implicará la construcción de centrales de fusión (centrales prototipo, de demostración y/o comerciales).

A medida que siga evolucionando la tecnología de fusión, los órganos reguladores podrían adoptar procesos apropiados según la fase de desarrollo. Por ejemplo, podría utilizarse el enfoque graduado para establecer diferentes requisitos de licenciamiento y supervisión en cada fase. Entre las diferencias que motivan la toma de decisiones en materia de seguridad pueden encontrarse mayores inventarios de materiales radiactivos; el transporte, almacenamiento y procesamiento de combustible; las categorías y volúmenes de disposición final de desechos; y la necesidad de enfriamiento activo de algunos componentes. Los reguladores probablemente adviertan que sus exámenes y procesos se vuelven más eficientes en relación con centrales enésimas de una serie. Concretamente, podrían necesitarse nuevos paradigmas de licenciamiento que permitan la fabricación en masa y la implantación generalizada en un plazo breve.

Otras consideraciones relacionadas con los peligros

El OIEA y muchos reguladores de los Estados Miembros que coordinan proyectos en materia de energía de fusión se centran en la seguridad radiológica y la seguridad física. Las centrales de fusión, debido a la elevada energía del sistema y a los materiales potencialmente tóxicos, presentan posibles peligros adicionales de índole industrial y ocupacional. Un análisis detallado de estos peligros queda fuera del alcance de esta publicación. No obstante, en sus comunicaciones con el público, la comunidad de la energía de fusión puede debatir cómo detectar y mitigar estos peligros para proteger a los trabajadores y el público.

Fotografía: Organización ITER

Consideraciones relativas a la no proliferación

Es importante que los diseñadores tengan en cuenta los regímenes de control de las exportaciones de material nuclear vigentes relativos a los materiales asociados a la energía de fusión, como el tritio y el litio 6, y a determinadas tecnologías, como los códigos de análisis. En el caso de diseños de fusión en que no se procesa, utiliza o produce material nuclear[9], el OIEA no aplica actualmente ninguna medida de salvaguardias aparte de las necesarias para resolver interrogantes, cuando procede, en relación con la exactitud y la exhaustividad de la información facilitada por los Estados Miembros.

Los acuerdos internacionales de salvaguardias existentes se aplican a los diseños en que se procesa, utiliza o produce material nuclear. A medida que se disponga de más información sobre los diseños de las centrales de fusión, deberá seguir considerándose si el alcance de las salvaguardias del OIEA se podría aplicar más ampliamente a las centrales de fusión.

[9] Las salvaguardias del OIEA se aplican al material básico o material fisionable especial según se define en **el artículo XX del Estatuto del OIEA.**

DGO

4.

Colaboración a escala mundial

El ecosistema de la energía de fusión está experimentando una rápida evolución impulsada por la colaboración internacional y la creciente participación del sector privado. La cooperación a escala mundial es primordial para abordar las esferas en las que se ha de seguir avanzando, establecer cadenas de suministro internacionales y desarrollar la fuerza de trabajo cualificada necesaria para comercializar la energía de fusión.

La energía de fusión, un ecosistema en evolución

La conquista de la energía de fusión es intrínsecamente internacional, pues exige una cooperación a escala mundial para abordar las esferas de ID&D pendientes, establecer cadenas de suministro internacionales y desarrollar una fuerza de trabajo cualificada. Esta participación mundial es vital para que la comercialización de la energía de fusión sea parte integrante en las transiciones energéticas sostenibles.

En los últimos 60 años se ha logrado avanzar en el desarrollo de la energía de fusión gracias a la gran labor colaborativa llevada a cabo entre diferentes naciones en la esfera de la ciencia y la tecnología de fusión. El proyecto ITER es el mayor ejemplo de este espíritu de colaboración. Aunar esta labor colaborativa fundacional con la industria es un paso decisivo para integrar el floreciente sector privado en el ecosistema establecido de desarrollo de la energía de fusión.

Iniciativas nacionales como **Fusion 2040** (Alemania), **Fusion Energy Innovation Strategy** (Japón), **Towards Fusion Energy** (estrategia del Reino Unido) y **Fusion Energy Strategy 2024** (Estados Unidos de América) son ejemplos de políticas que aprovechan las infraestructuras existentes y fomentan la colaboración entre países, instituciones públicas y entidades privadas, e ilustran estrategias de éxito que permiten reunir a un conjunto diverso de participantes de la industria con los desarrolladores de la fusión. Recientes alianzas público-privadas, como **China Fusion Energy Consortium** (China), el **Consorcio DTT** (Italia) y **UK Industrial Fusion Solutions Ltd** (Reino Unido), son pioneras en apostar por este tipo de colaboraciones.

Fusion 2040 es un programa de financiación puesto en marcha por el Gobierno de Alemania para elaborar el diseño de una central de fusión.

Fusion Energy Innovation Strategy es la primera estrategia nacional del Japón en materia de energía de fusión, que incluye el establecimiento de un grupo industrial, el Consejo de Energía de Fusión del Japón (J-Fusion) para acelerar el desarrollo de la energía de fusión.

Towards Fusion Energy es la estrategia del Reino Unido para hacer realidad la energía de fusión. Incluye un programa de diseño, desarrollo y construcción del prototipo de central de fusión Tokamak Esférico para la Producción de Energía (STEP), y Fusion Futures, el nuevo programa de I+D del Gobierno del Reino Unido.

Fusion Energy Strategy 2024 es la estrategia de los Estados Unidos de América para agilizar la viabilidad de la energía de fusión comercial en colaboración con el sector privado. Incluye una propuesta de marco de consorcio público-privado en la esfera de la energía de fusión.

China Fusion Energy Consortium es un consorcio industrial creado por el Gobierno de China para desarrollar e impulsar la tecnología de fusión.

El **Consorcio DTT** es una alianza público-privada para la construcción y operación de la instalación experimental de fusión DTT (Divertor Tokamak Test).

UK Industrial Fusion Solutions Ltd es una alianza público-privada para desarrollar el prototipo de central de fusión STEP.

Además, modelos de alianza público-privada como el **Programa de Desarrollo de la Fusión Basado en Hitos** y la iniciativa **INFUSE** de los Estados Unidos de América son ejemplos de mecanismos eficaces para facilitar a la industria de fusión el acceso a recursos técnicos y financieros, y catalizan aún más las inversiones privadas en el ámbito de la fusión, lo que acelera el proceso desde la investigación básica hasta la viabilidad comercial. Estos programas subrayan la importancia de asumir riesgos de forma colaborativa, lograr hitos y contar con el apoyo del Gobierno en el fomento de un ecosistema de la energía de fusión dinámico e inclusivo para la transferencia de tecnología desde las primeras fases de desarrollo hasta la implantación comercial, haciendo hincapié en la protección de la propiedad intelectual y la diversificación de los enfoques tecnológicos.

El **Programa de Desarrollo de la Fusión Basado en Hitos** es el programa quinquenal del Departamento de Energía de los Estados Unidos de América para promover diseños y actividades de I+D para centrales de fusión piloto dirigidas por el sector privado.

INFUSE (Red de Innovación para la Energía de Fusión) es una iniciativa del Departamento de Energía de los Estados Unidos de América para brindar a la industria de fusión acceso a apoyo técnico y financiero con la ayuda de sus instituciones de fusión financiadas.

Aprovechamiento de la cooperación internacional y las alianzas público-privadas

Colaboración a escala mundial en un entorno competitivo saludable

La colaboración internacional es fundamental para el intercambio de conocimientos en materia de ciencia y tecnología de fusión y el avance de posibles opciones de desarrollo, así como para acelerar la comercialización de la energía de fusión. La colaboración mundial permite poner en común conocimientos especializados y compartir el costo de los proyectos de ID&D, agilizar el progreso mutuo mediante el intercambio de información y conocimientos, y ayudar a los países a crear la infraestructura relacionada con las tecnologías de fusión. La demanda de tiempo y recursos ha aumentado proporcionalmente a las complejidades tecnológicas a la hora de abordar las esferas de ID&D en las que existen lagunas, lo que subraya la necesidad de una colaboración internacional para alcanzar rápidamente el objetivo de la implantación y la comercialización de la fusión compartiendo riesgos e inversiones. Un ejemplo de este aspecto son el diseño, las actividades de I+D y la construcción del proyecto ITER. Un ecosistema que promueva una competencia saludable entre los diferentes enfoques de desarrollo de la energía de fusión puede permitir que las estrategias nacionales y las del sector privado avancen en paralelo en el contexto de una colaboración mundial.

Uso eficaz de instalaciones de gran intensidad de capital

Numerosos países han establecido una infraestructura de I+D para desarrollar la energía de fusión por conducto de programas nacionales. Esta infraestructura incluye instalaciones experimentales, sistemas de recuperación del combustible, sistemas de almacenamiento, instalaciones con circuitos de metal líquido e instalaciones de irradiación, ensayo y fabricación de materiales. El establecimiento de instalaciones de ensayo, debido al gran capital que estas exigen, tendrá un costo prohibitivo para los países que inician programas de energía de fusión. Compartir infraestructuras a escala internacional, así como con el amplio sector privado de la industria de la fusión, puede dar más celeridad a la implantación de centrales de fusión y evitar la

duplicación de esfuerzos. Al distribuir el costo entre dos o más países, no será necesario duplicar infraestructuras, y ambas partes, además de la industria internacional de fusión, saldrán beneficiadas. Pueden utilizarse acuerdos de colaboración bilaterales para poner en práctica este tipo de arreglos.

Uso compartido y mantenimiento de bases de datos

Es importante que la comunidad dedicada a la fusión reconozca la importancia vital de mejorar el acceso de los investigadores, los encargados de formular políticas y el público a datos científicos, lo que promoverá la transparencia y la reproducibilidad y fomentará el intercambio internacional de conocimientos. Es fundamental crear una plataforma de bases de datos centralizada para los grupos de I+D dedicados a la ciencia y la tecnología de fusión. Esta plataforma también proporcionaría a todas las partes interesadas acceso a datos en distintos formatos y aplicaciones pertinentes para la energía de fusión.

Intercambios de personal, desarrollo de la fuerza de trabajo

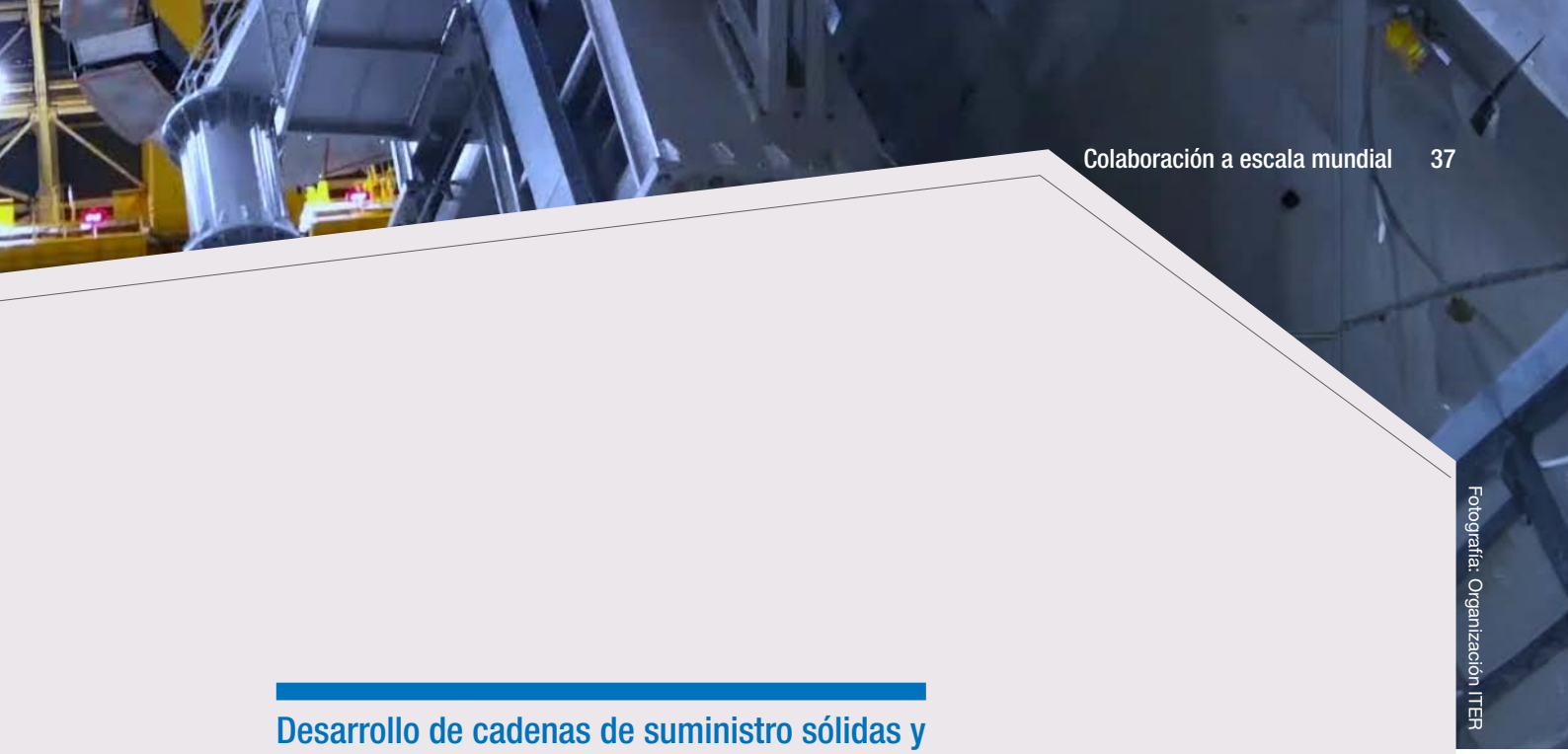
La cooperación internacional ofrece la oportunidad de aprovechar el intercambio de recursos y la diversidad intelectual de la comunidad de fusión. Las naciones pueden agilizar su progreso tecnológico estableciendo alianzas con otras naciones que tengan programas de fusión más avanzados y más experiencia, lo que les permitirá mejorar sus programas internos. Una mayor participación internacional también aumenta la diversidad y la reserva de talento que dará lugar a los líderes científicos del futuro. Si se ofrecen incentivos adecuados y se garantiza una gestión eficaz de los derechos de propiedad intelectual, los programas de intercambio de personal entre las partes colaboradoras en esferas específicas de la tecnología de fusión permitirán a las partes conocer las instalaciones de las otras partes. Por ejemplo, estos programas pueden ofrecer capacitación al personal encargado de operar las instalaciones, lo que beneficiará a ambas partes.

Validación del código de diseño

El diseño y el análisis de seguridad pueden depender en gran medida de códigos y métodos analíticos. Los expertos en diseño de la comunidad dedicada a la fusión pueden determinar conjuntamente el enfoque que deben seguir los diseñadores para cumplir los requisitos reglamentarios. Las bases de datos y los códigos pueden intercambiarse para su validación y verificación a través de marcos internacionales de colaboración.

Colaboración en materia de reglamentación

Las tecnologías relacionadas con la energía de fusión trascenderán las fronteras nacionales y se irán integrando a escala mundial a medida que vayan demostrando buenos resultados. Una reglamentación apropiada, armonizada internacionalmente y adaptada a los riesgos asociados a las centrales de fusión será beneficiosa de cara a la adopción y la aceptación generalizada de la energía de fusión. La colaboración a escala mundial permitirá mejorar los controles y las prácticas de reglamentación.



Fotografía: Organización ITER

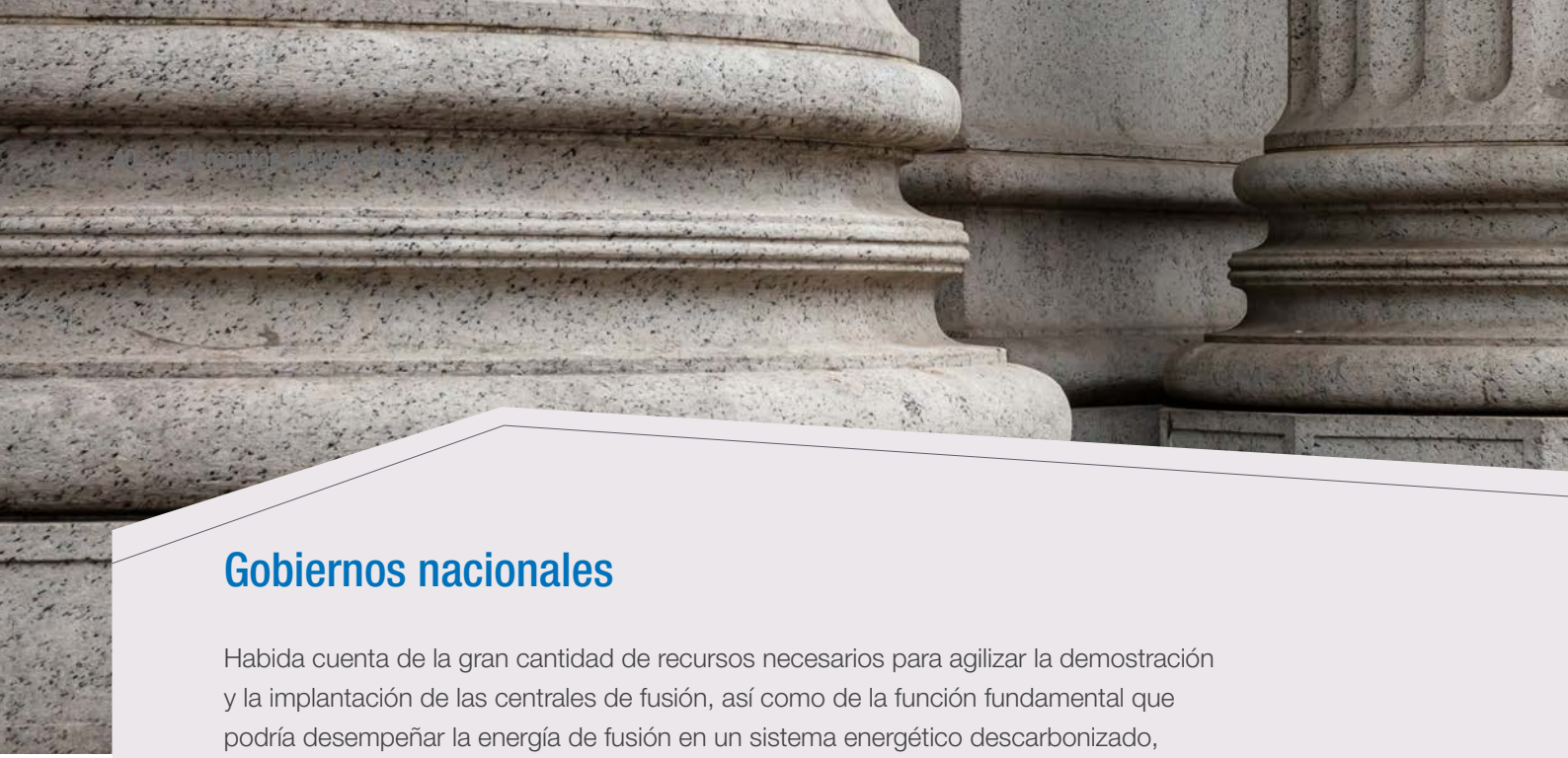
Desarrollo de cadenas de suministro sólidas y disponibilidad de materiales clave

Se prevé que, a medida que el planeta dé un giro hacia tecnologías energéticas limpias, aumentará exponencialmente la necesidad de recursos clave (por ejemplo, deuterio, tritio, helio, materiales estructurales, litio, berilio, tungsteno, cobre, compuestos de carburo de silicio) para aplicaciones energéticas sostenibles en todo el mundo. Habrá una fuerte competencia a escala mundial para adquirir los recursos esenciales necesarios para construir y operar centrales de fusión. Las preguntas clave que cabe considerar son: a) cómo puede aumentarse la producción para satisfacer la creciente demanda y b) cuáles son las posibles fuentes para el suministro de materiales clave. Los marcos de colaboración en la comunidad dedicada a la fusión permiten a las partes interesadas determinar de forma conjunta las prioridades en materia de I+D en toda la cadena de suministro. Este enfoque proactivo no solo fomenta la innovación, sino que también mitiga los efectos que tiene la disponibilidad de material en el logro de los objetivos de la comunidad de fusión y, por ende, garantiza un camino más eficiente y sostenible hacia el aprovechamiento de la energía de fusión. Es fundamental una estrecha cooperación en el seno de la comunidad dedicada a la fusión para lograr resultados mutuamente beneficiosos y garantizar una cadena de suministro sin fisuras de materiales esenciales, manteniendo así la seguridad y la resiliencia de los sistemas energéticos.

5.

Funciones de las **partes interesadas**

Los Gobiernos nacionales, los órganos reguladores, las instituciones de investigación, el mundo académico, las empresas privadas, las organizaciones internacionales y las entidades sin fines de lucro han de trabajar conjuntamente para acelerar la adopción y la implantación de la energía de fusión.



Gobiernos nacionales

Habida cuenta de la gran cantidad de recursos necesarios para agilizar la demostración y la implantación de las centrales de fusión, así como de la función fundamental que podría desempeñar la energía de fusión en un sistema energético descarbonizado, los Gobiernos nacionales serán necesariamente agentes y partes interesadas clave. Por ello, es probable que su intervención incluya las siguientes medidas:

Publicación de una política y una hoja de ruta nacionales para apoyar el establecimiento de una industria de la fusión

Las medidas que adopte el Gobierno nacional deben estar muy claras para todas las partes interesadas, deben estar armonizadas entre sus diferentes órganos de ejecución y deben ser sostenidas, pero, sobre todo, deben estar dirigidas a un objetivo y una visión generales claramente definidos. Los países están elaborando políticas y hojas de ruta nacionales en las que fijan sus objetivos relacionados con la energía de fusión y establecen metas, plazos y métodos. Es fundamental que estas políticas reconozcan la importante contribución que puede hacer la energía de fusión en la lucha contra el cambio climático y la mejora de la seguridad energética, y que aborden los elementos facilitadores, las interfaces y las dependencias esenciales, como la financiación y las subvenciones, a fin de apoyar la entrada en el mercado y la competitividad de la energía de fusión. Estas estrategias pueden abarcar un período más amplio que el del despliegue inicial y pormenorizar los pasos hacia la implementación a gran escala dentro de un marco temporal pertinente.

Definición de la función del Gobierno y sus expectativas respecto a otras partes interesadas

Los Gobiernos nacionales tomarán decisiones cruciales en relación con las actividades que financiarán o gestionarán a través de entidades públicas y con las actividades en las cuales actuarán principalmente como catalizadores o facilitadores a la espera de que el sector privado invierta y cumpla su cometido. Es necesario establecer de forma clara y transparente estas funciones, las actividades específicas que abarcan y las expectativas y normas por las que se ha de regir la participación del sector privado. Estos elementos serán parte integrante de las políticas nacionales.

Establecimiento de un marco jurídico y regulador

Una función clave de los Gobiernos nacionales es establecer rápidamente marcos jurídicos y reguladores adecuados. Igualmente importante es establecer criterios para la selección de emplazamientos y la obtención de la autorización para el desarrollo. Estos marcos son vitales para orientar el desarrollo tecnológico conforme a las prioridades correctas, como la seguridad tecnológica, la seguridad física y la no proliferación. También permiten a los desarrolladores elaborar diseños iniciales y estimaciones de costos fiables y garantizan a los inversores que los riesgos jurídicos y los riesgos en materia de reglamentación están bien definidos y son estables y asumibles.

Establecimiento de un debate saludable y objetivo a escala nacional y local

La aceptación social es importante para el desarrollo y la implantación de nuevas tecnologías. Por este motivo, los Gobiernos nacionales pueden desempeñar una función en la educación y la participación del público, promoviendo un discurso bidireccional, abierto, fundamentado y con base científica sobre la energía de fusión, el papel que esta desempeña en el sistema energético y la economía nacionales, la cuantía y los plazos de la inversión necesaria, así como los beneficios que esta tecnología podría reportar.

Órganos reguladores

Los órganos reguladores son a la vez agentes y partes interesadas clave en el establecimiento de una industria de la fusión. Estos deberán ir desarrollando sus propias capacidades y competencias según vaya avanzando la tecnología, por ejemplo, mediante colaboraciones con la industria y los institutos de investigación.

También es importante que haya una colaboración entre los órganos reguladores nacionales a fin de garantizar el intercambio de conocimientos entre jurisdicciones, apoyar el establecimiento de nuevos reguladores y acelerar la armonización de los enfoques de reglamentación. Todos estos son elementos esenciales para el desarrollo de un mercado internacional de tamaño considerable.

Institutos de investigación e instituciones académicas

Las actividades de investigación sobre fusión en el sector académico existen, fundamentalmente, para hacer descubrimientos. Los institutos de investigación y las instituciones académicas (entre los que se encuentran las universidades y la enseñanza técnica superior), ya sean públicos o privados, desempeñan una función clave al ejecutar programas de investigación para aumentar el TRL y las posibilidades de comercialización de tecnologías facilitadoras instrumentales hasta el punto en que pueda seguir desarrollándolas el sector privado. Estas actividades y, de forma más general, la cooperación con el sector privado (por ejemplo, para facilitar a este el acceso a las instalaciones de investigación) han de fomentarse y centrarse en el desarrollo de tecnologías adaptadas a una posible comercialización. Las colaboraciones entre entidades privadas y públicas deben sustentarse en un marco sólido para el intercambio de conocimientos y la producción y la protección de la propiedad intelectual y deben girar en torno a programas de investigación interdisciplinarios.

Los institutos de investigación y las instituciones académicas también pueden desempeñar una función clave en la oferta de capacitación y desarrollo de competencias, ya sea de forma aislada o a través de programas de desarrollo de asociados. Esto permitirá retener y renovar la fuerza de trabajo del futuro y facilitará los conocimientos de física indispensables para realizar una central de fusión. Los institutos de investigación y las instituciones académicas también pueden establecer alianzas a través de programas conjuntos con la industria y los reguladores, lo que ayudaría a desarrollar la fuerza de trabajo. También pueden prestar apoyo técnico directo a los reguladores en forma de competencias, instalaciones y conocimientos actualizados.

Por último, los institutos de investigación y las instituciones académicas también pueden contribuir al desarrollo y la aceptación de la industria por parte de la sociedad a través del campo de las ciencias sociales.

Proveedores de tecnología de fusión

Los proveedores de tecnología de fusión son una parte importante del desarrollo de la industria de la fusión. Estas organizaciones toman como punto de partida la investigación y la labor temprana de desarrollo para crear productos industriales que se puedan vender, construir, poner en servicio y operar. A medida que evolucione la industria, irán surgiendo diversas entidades que asumirán funciones de diseño, construcción, puesta en servicio y operación de las instalaciones productoras de energía. En esta fase inicial es difícil delimitar las responsabilidades específicas de los proveedores de tecnología y otras entidades.

La aparición de proveedores privados de tecnología de fusión y la inversión en ellos representan posibles intereses de mercado que son muy importantes para sustentar y justificar la creciente atención que se concede a nivel internacional al desarrollo, la demostración y la implantación oportunos de la fusión. En la actualidad hay más de 40 empresas privadas dedicadas a la fusión en todo el mundo, respaldadas por una inversión de más de 7000 millones de dólares de los Estados Unidos. Estas empresas están desarrollando una gran variedad de tecnologías de energía de fusión en confinamiento magnético[10], confinamiento inercial[11] y confinamiento magnetoinercial[12]. También están examinando diferentes y variadas opciones de combustibles de fusión, como deuterio-tritio, deuterio-deuterio, deuterio-helio 3 y protón-boro 11. Si bien cada uno de los sistemas de tecnología de fusión tiene diferentes necesidades de I+D, hay algunas esferas de I+D de utilidad general que podrían beneficiar a la mayoría de las empresas privadas de tecnología de fusión, como materiales de la primera pared más resistentes a la radiación y el desarrollo de la tecnología relativa al manto.

[10] Las tecnologías de confinamiento magnético incluyen el tokamak, el tokamak esférico, el estelarator y el heliotrón, la configuración de campo invertido, el espejo magnético, el dipolo levitado, la cúspide y sistemas electrostáticos híbridos.
[11] Las tecnologías de confinamiento inercial incluyen sistemas de compresión mediante láser y proyectil.
[12] Las tecnologías de confinamiento magnetoinercial incluyen, entre otros, sistemas de compresión de líquido, configuración de campo invertido, estricción lineal longitudinal (Z-pinch), chorro de plasma y fusión inercial con revestimiento magnetizado.

Cadenas de suministro

La planificación, el diseño, la construcción, la puesta en servicio y la operación de una central de fusión requerirán, además de proveedores de tecnología de fusión, una sólida cadena de suministro que abarque muchos ámbitos. Aunque algunos de estos ámbitos son muy específicos de la fusión, muchos se solapan con otros sectores, como la energía nuclear, el petróleo y el gas, y la tecnología aeroespacial y espacial. Este solapamiento introduce un elemento competitivo en relación con la fuerza de trabajo cualificada y los recursos, ya que estas industrias también exigen conocimientos especializados y capacidades tecnológicas similares. Entre los posibles agentes de la cadena de suministro de la fusión se encuentran proveedores de materiales clave, fabricantes de componentes, empresas de ingeniería de centrales, empresas generales de construcción, proveedores de equipos y proveedores de servicios especializados y no especializados. Dada la naturaleza amplia y diversa de esta cadena de suministro, es probable que su alcance sea internacional.

La competencia por la fuerza de trabajo es un factor crucial que podría influir en el desarrollo de la industria de la fusión. A medida que la tecnología de fusión confluya cada vez más con otros sectores de alta demanda, será primordial garantizar y retener una fuerza de trabajo cualificada. Para hacer frente a este desafío será necesaria una planificación estratégica de la fuerza de trabajo y la colaboración entre industrias para garantizar que el desarrollo de la energía de fusión no se vea afectado por la escasez de competencias y conocimientos especializados esenciales.

Fotografía: Organización ITER

Organizaciones internacionales

La función de las organizaciones internacionales en el desarrollo de la energía de fusión es primordial y abarca las siguientes esferas clave:

- Pueden respaldar el desarrollo de la infraestructura de I+D necesaria para la energía de fusión, como instalaciones de investigación, así como la futura infraestructura necesaria para las centrales de fusión comerciales. Estas organizaciones a menudo ayudan a poner la financiación y los recursos esenciales a disposición de los proyectos de ID&D en la esfera de la energía de fusión. Habida cuenta de los elevados costos y los largos plazos asociados al desarrollo de la fusión, la colaboración internacional puede aunar recursos de múltiples países y, con ello, hacer viables proyectos ambiciosos.
- Facilitan la colaboración entre países, científicos e investigadores para la puesta en común de conocimientos generales y especializados, además de resultados de las investigaciones. Estas iniciativas de colaboración pueden ayudar a colmar la brecha de conocimientos, agilizar los avances tecnológicos y superar los desafíos técnicos con mayor eficiencia. Además, una mayor participación de las organizaciones internacionales en la labor de divulgación pública y educación aumentará el conocimiento y la comprensión en materia de energía de fusión. Esto puede ayudar a conseguir un mayor apoyo del público para los proyectos de energía de fusión.
- Podrían ayudar a recomendar políticas que apoyen el desarrollo, la implantación y la adopción de la energía de fusión, incluidos, por ejemplo, políticas de cooperación internacional, mecanismos de financiación e incentivos para la ID&D.

Organizaciones sin fines de lucro

Las organizaciones sin fines de lucro pueden desempeñar múltiples funciones a la hora de vigilar el interés público y facilitar el discurso público como parte del desarrollo y la implantación de la tecnología de fusión. Además de la labor general de promoción, las organizaciones sin fines de lucro pueden contribuir de manera decisiva a los debates a escala internacional, nacional y local en torno a temas como el cambio climático, la justicia energética y el impacto ambiental, así como hacer que se escuche la voz de grupos y comunidades.

Las organizaciones comerciales tienen un poder de convocatoria que permite a las empresas del sector privado compartir conocimientos con el fin de establecer normas comunes de desempeño y, cuando proceda, actuar como voz colectiva ante el Gobierno y los reguladores sobre cuestiones clave. Estas organizaciones también pueden contribuir proporcionando información objetiva, de base científica y actualizada a las principales partes interesadas, como el Gobierno, los reguladores y el público.

6.

Participación del público, divulgación y comunicación

Comunicar eficazmente las posibilidades que ofrece la energía de fusión como solución a largo plazo al cambio climático y la seguridad energética es crucial para garantizar el apoyo público a su desarrollo.

Participación eficaz a través de una comunicación bidireccional

La participación bidireccional permite promover de forma más eficaz la aceptación de la energía de fusión por parte del público. Mediante este enfoque, los diseñadores, gobiernos y otros agentes pueden comprender y tener en cuenta las necesidades, los intereses y los plazos locales, incluidas opiniones sobre temas como la justicia energética, la justicia ambiental y el impacto en el medio ambiente. Además, el público puede adquirir conocimientos sobre los riesgos de la radiación, las tecnologías y los plazos realistas para la implantación. Estas conversaciones deben adaptarse a las necesidades y los intereses de la audiencia y en ellas han de participar con interés genuino expertos acreditados, entre ellos representantes del Gobierno, la industria y los órganos reguladores. Gracias a conversaciones iterativas y bidireccionales, se pueden realizar, en una etapa temprana, modificaciones que den respuesta a las preocupaciones del público y faciliten la aceptación social. Las comunicaciones que se entablan en una etapa posterior o cuyo objetivo parezca ser únicamente informar o explicar pueden parecer poco sinceras si no hay oportunidad de tener presente la respuesta del público.

En los últimos años ha sido extensa la labor centrada en desarrollar el concepto de fomento de la aceptación pública, e incluso del entusiasmo, a través de esta conversación bidireccional [11-13]. A partir de esta labor, la comunidad dedicada a la fusión puede extraer enseñanzas de enfoques utilizados con éxito en otras industrias y proceder a aplicarlos, como la “licencia social” [14], aplicada a las minas o a las tecnologías

biomédicas; la “revisión bioética” [15-17], aplicada a las tecnologías biomédicas innovadoras; el enfoque de “investigación e innovación responsable” [18-20], que incorpora la opinión pública en las fases iniciales del diseño, y los métodos de “codiseño” [21], que reúnen al público y a los tecnólogos para diseñar colectivamente una tecnología.

En todas estas fórmulas, los debates sobre la energía de fusión deben ser transparentes y objetivos en lo que se refiere al progreso y el calendario para la adopción comercial generalizada, los posibles beneficios y desafíos, así como los recursos necesarios para desarrollar e implantar la energía de fusión. Entre los beneficios de interés para el público cabe mencionar el apoyo a la transición hacia una energía limpia, el desarrollo económico y las comunidades desatendidas, la satisfacción de la creciente demanda energética y los avances en otros campos gracias a las tecnologías desarrolladas mediante las actividades de I+D emprendidas en la esfera de la fusión (por ejemplo, materiales, imanes, tecnologías relacionadas con el plasma).

Entre los desafíos de interés para el público cabe mencionar la gestión de los desechos en comparación con otras industrias y los posibles peligros y emisiones fuera de los emplazamientos. Es importante comunicar con claridad los riesgos potenciales que se hayan determinado en relación con las operaciones normales y con posibles incidentes y accidentes, y cómo pueden mitigarse para limitar las consecuencias fuera de los emplazamientos o evitar que las haya. La transparencia de la planificación para casos de emergencia y su inclusión, cuando sea necesario, en las medidas de protección del público podrían tranquilizar y fomentar la confianza y la aceptación del público. Al mismo tiempo, es preciso tener cuidado al diferenciar la fusión de otras tecnologías, así como al diferenciar entre tecnologías de fusión. Es importante que los comunicadores eviten menospreciar involuntariamente cualquier tecnología y tengan en cuenta las posturas y enfoques preferidos de su audiencia. Seleccionar el lenguaje más adecuado en función del contexto puede evitar consecuencias no deseadas y dar a conocer con exactitud la fase de desarrollo (por ejemplo, experimentos, demostración, prototipos, centrales comerciales).

REFERENCIAS

[1] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, The Global Fusion Industry in 2024, FIA, Washington, D. C. (2024), https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2024/07/2024-annual-global-fusion-industry-report.pdf

[2] AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, COMUNIDAD EUROPEA DE LA ENERGÍA ATÓMICA, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE, *Principios fundamentales de seguridad*, *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* Nº SF-1, OIEA, Viena, 2007, https://www.iaea.org/es/publications/7830/principios-fundamentales-de-seguridad

[3] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Marco gubernamental, jurídico y regulador para la seguridad*, *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* Nº GSR Part 1 (Rev. 1), OIEA, Viena, 2017.

[4] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Liderazgo y gestión en pro de la seguridad*, *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* Nº GSR Part 2, OIEA, Viena, 2017, https://www.iaea.org/es/publications/11112/liderazgo-y-gestion-en-pro-de-la-seguridad

[5] AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, COMISIÓN EUROPEA, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE, *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad*, *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* Nº GSR Part 3, OIEA, Viena, 2016, https://www.iaea.org/es/publications/10812/proteccion-radiologica-y-seguridad-de-las-fuentes-de-radiacion-normas-basicas-internacionales-de-seguridad

[6] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Evaluación de la seguridad de las instalaciones y actividades*, *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* Nº GSR Part 4 (Rev. 1), OIEA, Viena, 2018.

[7] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Gestión previa a la disposición final de desechos radiactivos, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* Nº GSR Part 5, OIEA, Viena, 2010.

[8] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Clausura de instalaciones, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* Nº GSR Part 6, OIEA, Viena, 2017.

[9] AGENCIA PARA LA ENERGÍA NUCLEAR DE LA OCDE, COMISIÓN PREPARATORIA DE LA ORGANIZACIÓN DEL TRATADO DE PROHIBICIÓN COMPLETA DE LOS ENSAYOS NUCLEARES, OFICINA DE COORDINACIÓN DE ASUNTOS HUMANITARIOS DE LAS NACIONES UNIDAS, ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL, ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE POLICÍA CRIMINAL (INTERPOL),

ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL, ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL, ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE, *Preparación y respuesta para casos de emergencia nuclear o radiológica, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* Nº GSR Part 7, OIEA, Viena, 2018, https://www.iaea.org/es/publications/11004/preparacion-y-respuesta-para-casos-de-emergencia-nuclear-o-radiologica

[10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of a Graded Approach in Regulating the Safety of Radiation Sources, IAEA-TECDOC-1974, IAEA, Vienna (2021).

[11] HOEDL, S.A., Achieving a social license for fusion energy, Phys. Plasmas **29**(9) (2022) 092506, https://doi.org/10.1063/5.0091054

[12] HOEDL, S. Social acceptance is as important as low costs and net energy production for climate and energy poverty impact, J. Fusion Energ. **42** (2023) 22, https://doi.org/10.1007/s10894-023-00355-x

[13] GUPTA, K., et al. Americans' views of fusion energy: Implications for sustainable public support, Fusion Sci. and Technol. **2024** (2024) 1–17, https://doi.org/10.1080/15361055.2024.2328457

[14] GUNNINGHAM, N., KAGAN, R.A., THORNTON, D., Social license and environmental protection: Why businesses go beyond compliance, Law & Social Inquiry, **29**(2) (2004), 307-341, https://doi.org/10.1111/j.1747-4469.2004.tb00338.x

[15] UNESCO, National Bioethics Committees in Action, UNESCO, Paris (2010), https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000189548?posInSet=1&queryId=a17553d7-2780-4e51-b9d3-a495cecdab90

[16] NUFFIELD COUNCIL ON BIOETHICS, Novel Techniques for the Prevention of Mitochondrial DNA Disorders: An Ethical Review, Nuffield Council on Bioethics, London (2012).

[17] WARNOCK M., et al., Report of the Committee of Inquiry into Human Fertilisation and Embryology, U.K. Department of Health & Social Security, London (1984), https://www.hfea.gov.uk/media/2608/warnock-report- of-the-committee-of-inquiry-into-human-fertilisation-and-embryology-1984.pdf

[18] STILGOE, J., OWEN, R., MACNAGHTEN, P., Developing a framework for responsible innovation, Res. Policy **42**(9) (2013) 1568–1580, https://doi.org/10.1016/j.respol.2013.05.008

[19] OWEN, R., MACNAGHTEN, P., STILGOE, J., Responsible research and innovation: From science in society to science for society, with society. Sci. Publ. Policy **39**(6) (2012) 751–760, https://doi.org/10.1093/scipol/scs093

[20] BRAND, T., BLOK, V., Responsible innovation in business: a critical reflection on deliberative engagement as a central governance mechanism, J. Responsible Innov. **6**(1) (2019) 4–24, https://doi.org/10.1080/23299460.2019.1575681

[21] SMITH J.M., Extracting Accountability: Engineers and Corporate Social Responsibility, MIT Press, Cambridge, MA (2021).

COLABORADORES EN LA REDACCIÓN Y LA REVISIÓN

Abdullah, M.S.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Allain, J.P.	Departamento de Energía de los Estados Unidos (Estados Unidos de América)
Anikeev, A.	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
Becoulet, A.	Organización ITER
Budaev, V.	Centro Nacional de Investigaciones Instituto Kurchatov (Federación de Rusia)
Chapman, I.	Autoridad de Energía Atómica del Reino Unido (Reino Unido)
Clark, T.	Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos (Estados Unidos de América)
De Caires Watson, D.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Desai, S.	Helion Energy (Estados Unidos de América)
Ellis, T.	Commonwealth Fusion Systems (Estados Unidos de América)
Federici, G.	EUROfusion (Alemania)
Hoedl, S.	Post Road Foundation (Estados Unidos de América)
Hole, M.	Universidad Nacional de Australia (Australia)
Hsu, S.	Departamento de Energía de los Estados Unidos (Estados Unidos de América)
Jenko, F.	Instituto Max Planck de Física del Plasma (Alemania)
Junillon, C.	First Light Fusion (Reino Unido)
Ibarra, A.	IFMIF-DONES (España)
Kaneko, T.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Kumar Ellapan, R.	Institute for Plasma Research (India)
Li, P.	Southwestern Institute of Physics (China)
Matsumoto, T.	Institutos Nacionales de Ciencia y Tecnología Cuánticas y Radiológicas (Japón)
Milnes, J.	Autoridad de la Energía Atómica del Reino Unido (Reino Unido)
Oh, Y.	Instituto de Energía de Fusión de Corea (República de Corea)
Osakabe, M.	Instituto Nacional de Ciencia de la Fusión (Japón)
Poli, E.	Instituto Max Planck de Física del Plasma (Alemania)
Pussieux, T.	Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (Francia)
Rance, P.J.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Romanelli, F.	Consorcio DTT (Italia)
Shannon, M.	Autoridad de la Energía Atómica del Reino Unido (Reino Unido)
Tadjer, D.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Takeda, S.	Kyoto Fusioneering (Japón)
Wagner, R.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Yokoyama, M.	Instituto Nacional de Ciencia de la Fusión (Japón)

Reuniones de consultoría

Viena (Austria): 25 a 29 de enero de 2024, 27 a 29 de febrero de 2024, 16 a 18 de abril de 2024

Los siguientes Estados son Miembros del Organismo Internacional de Energía Atómica:

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

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 (Nueva York); entró en vigor el 29 de julio de 1957. El Organismo tiene la Sede en Viena. Su principal objetivo es "acelerar y aumentar la contribución de la energía atómica a la paz, la salud y la prosperidad en el mundo entero".

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
PO Box 100
1400 Viena, Austria
Teléfono: +43 1 2600 22529 o 22530
Correo electrónico: sales.publications@iaea.org
www.iaea.org/es/publicaciones

© IAEA, 2024
Impreso por el OIEA en Austria
Noviembre de 2024
STI/PUB/2099
https://doi.org/10.61092/iaea.rjb6-m9r0

ELEMENTOS CLAVE DE LA FUSIÓN
OIEA, VIENA, 2024
ISBN 978-92-0-329824-7 (papel)
ISBN 978-92-0-329924-4 (PDF)

24-02765S

NOTA EDITORIAL

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.

Esta publicación no aborda cuestiones de responsabilidad, jurídica o de otra índole, por actos u omisiones por parte de persona alguna.

Las orientaciones y las recomendaciones que se ofrecen en este documento en relación con las buenas prácticas señaladas representan la opinión de expertos, pero no son 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 el trazado 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 este libro y no garantiza que el contenido de dichos sitios web sea o siga siendo exacto o adecuado.

Elementos clave de la fusión presenta una visión común para el desarrollo de la energía de fusión. Con esta publicación se genera un entendimiento común del camino que va de la investigación, el desarrollo y la demostración a la comercialización de la energía de fusión y se traza un marco de colaboración que ayuda a sustentar y hacer avanzar las iniciativas sobre energía de fusión a escala mundial. Esta publicación está dirigida a investigadores e ingenieros dedicados a la investigación y el desarrollo en materia de fusión, reguladores, empresarios o partes interesadas que participan en el desarrollo de la tecnología de fusión, además de encargados de formular políticas.

Organismo Internacional de Energía Atómica
Viena, 2024
www.iaea.org