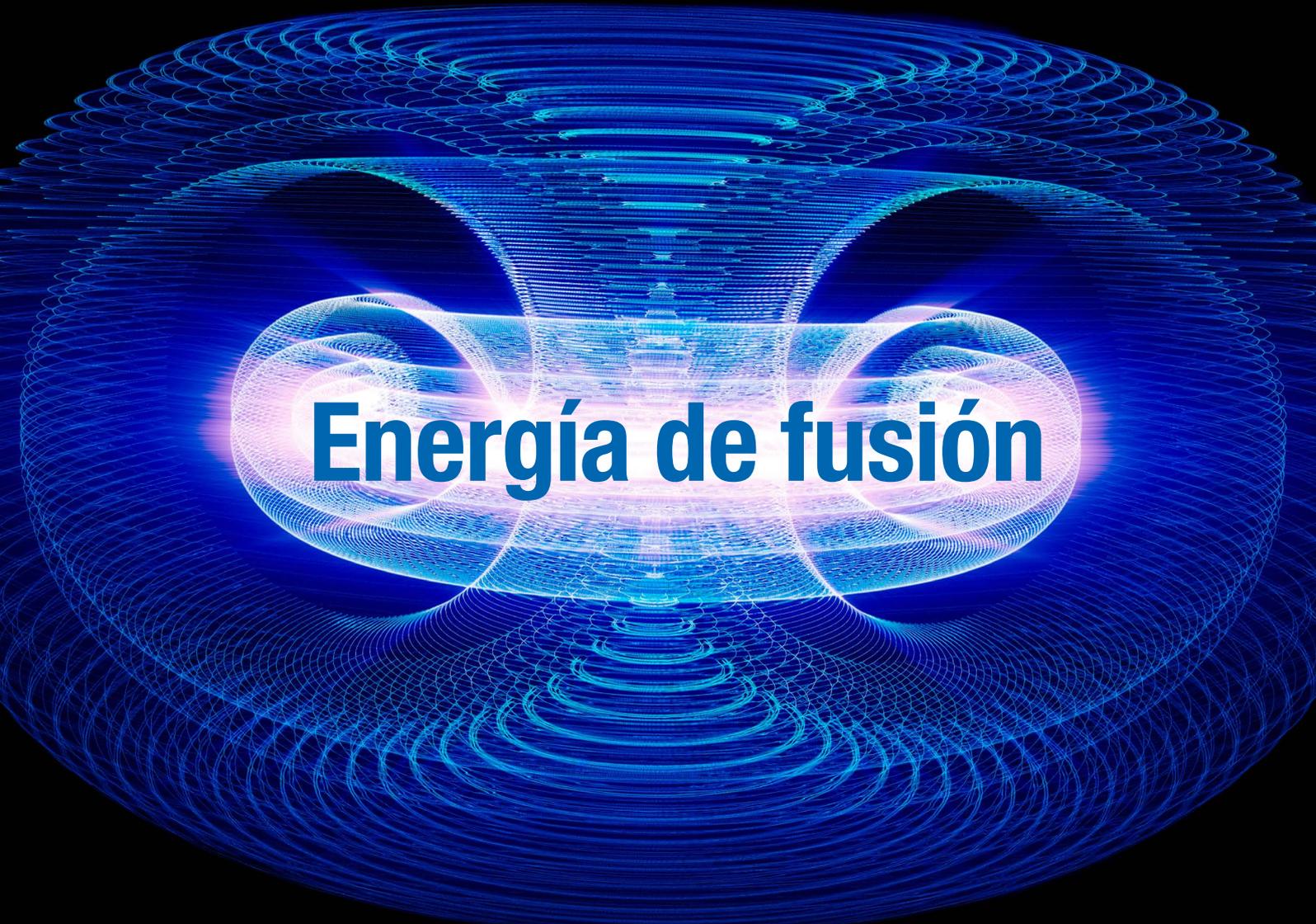


IAEA BULLETIN

ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA

La publicación emblemática del OIEA | Mayo de 2021 | www.iaea.org/es/bulletin

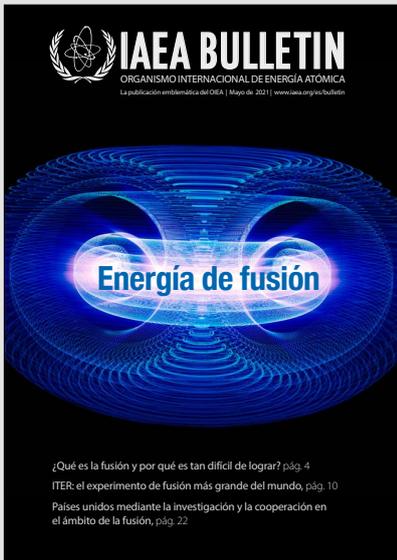


Energía de fusión

¿Qué es la fusión y por qué es tan difícil de lograr? pág. 4

ITER: el experimento de fusión más grande del mundo, pág. 10

Países unidos mediante la investigación y la cooperación en el ámbito de la fusión, pág. 22



EL BOLETÍN DEL OIEA

es una publicación de la
Oficina de Información
al Público y Comunicación (OPIC)
Organismo Internacional de Energía Atómica
Vienna International Centre
PO Box 100, 1400 Viena, Austria
Teléfono: (43-1) 2600-0
iaebulletin@iaea.org

Director editorial: Michael Amdi Madsen

Editor: Miklos Gaspar

Diseño y producción: Ritu Kenn

El BOLETÍN DEL OIEA puede consultarse en línea en
www.iaea.org/es/bulletin

Podrá reproducirse libremente parte del material del OIEA contenido en el *Boletín del OIEA* siempre que se cite su fuente. En caso de que el material que quiera volverse a publicar no sea de la autoría de un miembro del personal del OIEA, deberá solicitarse permiso al autor o a la organización que lo haya redactado, salvo cuando se trate de una reseña.

Las opiniones expresadas en los artículos firmados que figuran en el *Boletín del OIEA* no representan necesariamente las del Organismo Internacional de Energía Atómica y este declina toda responsabilidad al respecto.

Portada:

En un tokamak, las partículas del plasma — con una temperatura de cientos de millones de grados y confinadas por campos magnéticos— se fusionan y producen energía.

(Shutterstock.com)

Síguenos en:



La misión del Organismo Internacional de Energía Atómica es evitar la proliferación de las armas nucleares y ayudar a todos los países, especialmente del mundo en desarrollo, a sacar provecho de los usos de la ciencia y la tecnología nucleares con fines pacíficos y en condiciones de seguridad tecnológica y física.

El OIEA, creado en 1957 como organismo independiente de las Naciones Unidas, es la única organización del sistema de las Naciones Unidas especializada en tecnología nuclear. Por medio de sus laboratorios especializados, únicos en su clase, transfiere conocimientos y competencias técnicas a sus Estados Miembros en ámbitos como la salud humana, la alimentación, el agua, la industria y el medio ambiente.

Además de proporcionar una plataforma mundial para el fortalecimiento de la seguridad física nuclear, el OIEA ha creado la *Colección de Seguridad Física Nuclear*, cuyas publicaciones, que gozan del consenso internacional, ofrecen orientaciones sobre ese tema. La labor del OIEA se centra igualmente en ayudar a reducir al mínimo el riesgo de que los materiales nucleares y otros materiales radiactivos caigan en manos de terroristas y criminales o de que las instalaciones nucleares sean objeto de actos dolosos.

Las normas de seguridad del OIEA proporcionan un sistema de principios fundamentales de seguridad y reflejan un consenso internacional sobre lo que constituye un alto grado de seguridad para proteger a la población y el medio ambiente contra los efectos nocivos de la radiación ionizante. Estas normas han sido elaboradas pensando en que sean aplicables a cualquier tipo de instalación o actividad nuclear destinada a fines pacíficos, así como a las medidas protectoras encaminadas a reducir los riesgos radiológicos existentes.

Mediante su sistema de inspecciones, el OIEA también verifica que los Estados Miembros utilicen los materiales e instalaciones nucleares exclusivamente con fines pacíficos, conforme a los compromisos contraídos en virtud del Tratado sobre la No Proliferación de las Armas Nucleares y otros acuerdos de no proliferación.

La labor del OIEA es polifacética y se lleva adelante, con participación de muy diversos asociados, a escala nacional, regional e internacional. Los programas y presupuestos del OIEA se establecen mediante decisiones de sus órganos rectores: la Junta de Gobernadores, compuesta por 35 miembros, y la Conferencia General, que reúne a todos los Estados Miembros.

El OIEA tiene su Sede en el Centro Internacional de Viena y cuenta con oficinas sobre el terreno y de enlace en Ginebra, Nueva York, Tokio y Toronto. Además, tiene laboratorios científicos en Mónaco, Seibersdorf y Viena. Por otra parte, proporciona apoyo y financiación al Centro Internacional de Física Teórica "Abdus Salam", en Trieste (Italia).

Ayudar a lograr que la fusión sea una realidad

Rafael Mariano Grossi, Director General, OIEA

Cuando en 1958 altos funcionarios del OIEA asistieron a la segunda Conferencia Internacional de las Naciones Unidas sobre la Utilización de la Energía Atómica con Fines Pacíficos fueron testigos de la divulgación de lo que hasta entonces habían sido secretos de Estado: las tentativas de los países de aprovechar la energía proveniente de la fusión nuclear. Según esas revelaciones, la fusión prometía el suministro de energía casi ilimitada a la sociedad. Para lograr la fusión hay que unir núcleos en un proceso que, con la misma cantidad de combustible, libera mucha más energía que el de la fisión nuclear, en la que los átomos se dividen.

A finales de la década de 1950, cuando el futuro de los combustibles fósiles todavía parecía infinito y aún no se hablaba de cambio climático, la fusión se veía como algo deseable: en otras palabras, una visión de generación de energía para un futuro remoto. Cuán diferente es el mundo en que vivimos hoy, en el que la demanda de energía limpia supera la oferta. Esto ha hecho que las fuentes limpias de energía, como la fusión, susciten el interés de los encargados de la formulación de políticas, los inversores y el público en general.

La fusión genera cuatro veces más energía por kilogramo de combustible que la fisión y cerca de cuatro millones de veces más energía que la combustión de petróleo y de carbón. El actual nivel de compromiso internacional nos está acercando más que nunca a un futuro de fusión.

El ejemplo perfecto de esto es el ITER, el experimento de fusión más grande del mundo (véase el artículo de la página 10), que reúne a científicos de 35 países en busca de una reacción de fusión autosuficiente. El ITER está en construcción y, cuando esté finalizado, promete abrirnos las puertas a la próxima fase del desarrollo de la energía de fusión: centrales de demostración de la fusión, también denominadas DEMO, cuya finalidad es producir electricidad por primera vez a partir de la fusión.

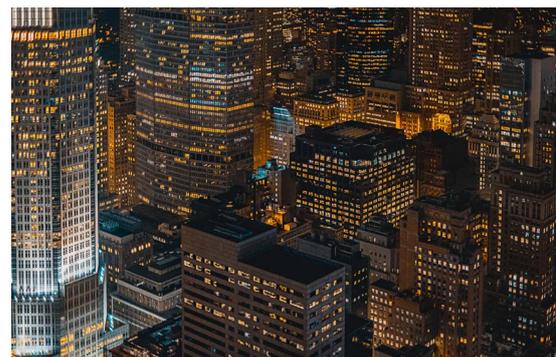
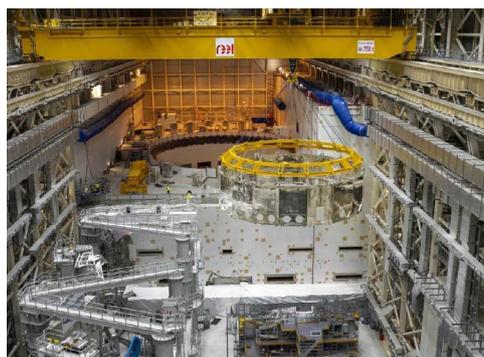
El OIEA está a la vanguardia del desarrollo de instalaciones DEMO, facilitando la coordinación internacional e intercambiando prácticas óptimas en proyectos a escala mundial (véase el artículo de la página 12). El OIEA fomenta el debate sobre las DEMO y promueve el diálogo internacional de amplio alcance a fin de superar obstáculos altamente técnicos y lograr que la energía de fusión sea una realidad.



Nuclear Fusion, una revista científica que publica el OIEA, da testimonio de nuestro compromiso con la investigación en materia de fusión. Es la revista sobre fusión de más larga data y más acreditada del mundo. Presta apoyo a los investigadores e ingenieros del ámbito de la fusión a nivel mundial, recibe medio millón de descargas de documentos de texto completos cada año y sigue siendo la revista de mayor impacto en su esfera.

En este Boletín presentamos las iniciativas de los gobiernos y la creciente participación del sector privado en el ámbito de la fusión. El interés cada vez mayor de los inversores y los principales productores de energía pone de manifiesto la aceleración de los avances técnicos necesarios para que la fusión se haga realidad.

Parafraseando a Lev Artsimovich, un famoso físico de la era soviética, “la fusión estará lista cuando la sociedad la necesite”. Ese momento es ahora. La lucha contra el cambio climático se ha convertido en una prioridad mundial y la descarbonización de nuestras fuentes de energía es una de las tareas más importantes que tenemos. La explotación de la energía de fusión ofrece a la humanidad un futuro de energía limpia que está más cerca que nunca.



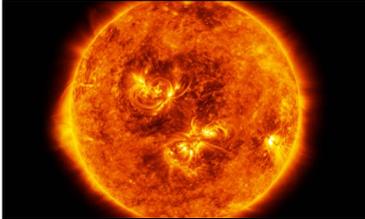
(Foto: ITER)

(Foto: ITER)

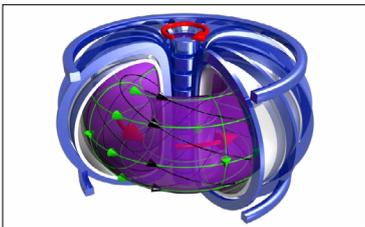
(Foto: Freepik.com)



1 Ayudar a lograr que la fusión sea una realidad



4 ¿Qué es la fusión y por qué es tan difícil de lograr?



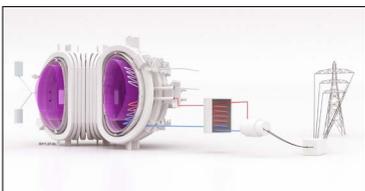
6 Fusión por confinamiento magnético con tokamaks y estelarators



8 Alternativas al confinamiento magnético



10 ITER: el experimento de fusión más grande del mundo



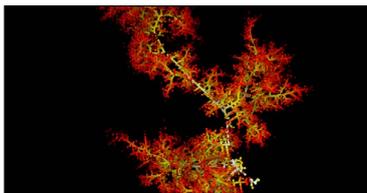
12 Centrales de demostración de la fusión

Un paso fundamental hacia la producción de electricidad comercial a gran escala



14 La seguridad en el ámbito de la fusión

Un proceso inherentemente seguro



16 Cómo las bases de datos del OIEA contribuyen a avanzar en la investigación de cara al uso comercial de la fusión



18 Plasma en condiciones de quemado
Un paso crucial hacia la energía de fusión



20 Llenar el vacío en materia de tecnología y materiales de fusión



22 Países unidos mediante la investigación y la cooperación en el ámbito de la fusión

Entrevista

24 Fusión: lista cuando la sociedad la necesite

Panorama mundial

26 Apuestas arriesgadas y apuestas seguras

Por qué la fusión necesita empresas y empresas emergentes

— *Simon Woodruff*

Noticias del OIEA

28 Noticias del OIEA

32 Publicaciones

¿Qué es la fusión y por qué es tan difícil de lograr?

Irena Chatzis y Matteo Barbarino

Hace 500 años, la civilización azteca, en el actual territorio de México, creía que el Sol y toda su energía se sustentaban con sangre procedente de sacrificios humanos. Hoy sabemos que la energía del Sol, así como la de todas las demás estrellas, proviene de una reacción denominada fusión nuclear. Si se consiguiera replicar en la Tierra, la fusión nuclear podría proporcionar una cantidad prácticamente ilimitada de energía limpia, segura y asequible para satisfacer la demanda energética mundial.

¿Cómo funciona exactamente la fusión nuclear? Dicho de manera simple, la fusión nuclear es el proceso mediante el cual dos núcleos atómicos ligeros se combinan para formar un solo núcleo más pesado y se emiten al mismo tiempo enormes cantidades de energía. Las reacciones de fusión se producen en un estado de la materia denominado plasma: un gas caliente y dotado de carga, compuesto por iones positivos y por electrones que se desplazan libremente, y con propiedades únicas que lo distinguen de los sólidos, los líquidos y los gases.

Para poder fusionarse en nuestro Sol, los núcleos necesitan colisionar unos contra otros a temperaturas altísimas, de más de 10 millones de grados Celsius, lo cual les permite vencer su repulsión eléctrica mutua. Una vez que los núcleos vencen esa repulsión y se encuentran a muy escasa distancia unos de otros, la fuerza nuclear atractiva entre ellos será mayor que la repulsión eléctrica y podrán fusionarse. Para que esto ocurra, los núcleos han de estar confinados en un espacio pequeño, donde se incrementarán las posibilidades de colisión. En el Sol, la presión extrema producida por su inmensa gravedad genera condiciones propicias para que se produzca la fusión.

Las reacciones de fusión producen una cantidad de energía muy elevada —cuatro veces superior a la de las reacciones de fisión nuclear— y pueden ser la base de los futuros reactores de

fusión. Está previsto que los de primera generación empleen una mezcla de deuterio y tritio, que son tipos pesados de hidrógeno. En teoría, con apenas unos pocos gramos de estos reaccionantes reactivos se puede producir un terajulio de energía, que más o menos equivale a las necesidades energéticas de una persona en un país desarrollado a lo largo de sesenta años.

Objetivo: alcanzar las estrellas

Si bien la enorme fuerza gravitatoria del Sol induce de manera natural la fusión, para lograrla en ausencia de dicha fuerza se precisa más temperatura. En la Tierra, necesitamos temperaturas superiores a los 100 millones de grados Celsius y una intensa presión para conseguir que el deuterio y el tritio se fusionen, así como un confinamiento suficiente para retener el plasma y mantener una reacción de fusión durante un lapso lo suficientemente prolongado como para obtener una ganancia de potencia neta, que se refiere a la relación entre la energía de fusión producida y la energía utilizada para calentar el plasma.

Aunque en los experimentos actuales se logran habitualmente condiciones muy cercanas a las necesarias en un reactor de fusión, es preciso mejorar las propiedades de confinamiento y la estabilidad del plasma. Científicos e ingenieros de todo el mundo siguen poniendo a prueba nuevos materiales y diseñando nuevas tecnologías con miras a lograr la energía de fusión.

En más de 50 países se está investigando acerca de la fusión nuclear y la física del plasma, y en muchos experimentos se han logrado con éxito reacciones de fusión, aunque sin demostrar una ganancia de potencia de fusión neta. El tiempo necesario para recrear el proceso de las estrellas dependerá de la movilización de recursos por medio de alianzas y colaboración a escala mundial.

La energía del Sol, así como la de todas las demás estrellas, proviene de una reacción denominada fusión nuclear. Si se consiguiera replicar en la Tierra, dicha fusión nuclear podría proporcionar una cantidad prácticamente ilimitada de energía limpia, segura y asequible para satisfacer la demanda energética mundial.

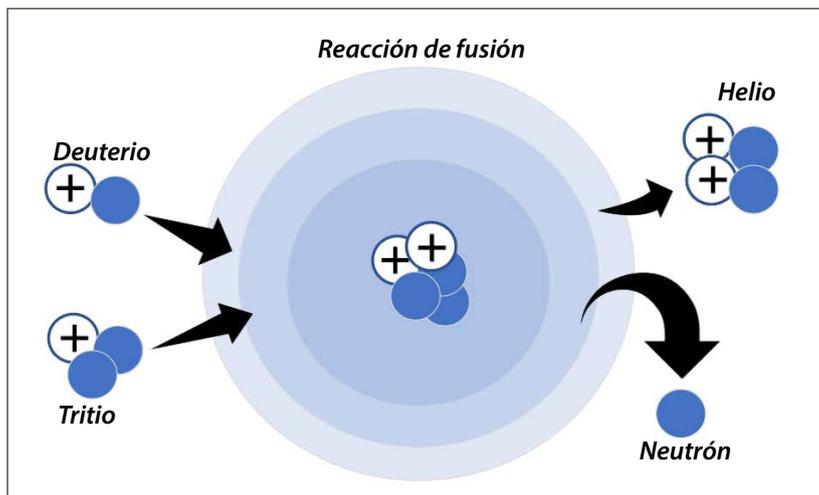
(Imagen: NASA/SDO/AIA)

Una historia de colaboración

Desde que en la década de 1930 se comprendió la fusión nuclear, los científicos se han afanado por encontrar la manera de recrearla y aprovecharla. En un primer momento, estos intentos se mantuvieron en secreto. Sin embargo, pronto quedó claro que esta compleja y costosa investigación solo podría salir adelante con esfuerzos mancomunados. En la Segunda Conferencia Internacional de las Naciones Unidas sobre la Utilización de la Energía Atómica con Fines Pacíficos, que tuvo lugar en Ginebra (Suiza) en 1958, los científicos dieron a conocer al mundo las investigaciones en materia de fusión nuclear.

El OIEA ha ocupado un lugar central en las investigaciones internacionales sobre fusión. En 1960, y con el fin de intercambiar información sobre los avances en fusión nuclear, puso en marcha la revista Nuclear Fusion, actualmente considerada la publicación periódica de referencia en la materia. La primera Conferencia del OIEA sobre Energía de Fusión de carácter internacional tuvo lugar en 1961, y desde 1974 el Organismo viene convocando una conferencia bienal para fomentar el diálogo sobre los avances y logros en dicha esfera.

Tras dos decenios de negociaciones relativas al diseño y la ubicación de la mayor instalación mundial de fusión, el ITER se estableció en Francia en 2007 con el objetivo de demostrar que era científica y tecnológicamente viable producir energía de fusión (véase el artículo de la página 10). El Director General del OIEA es el depositario del Acuerdo ITER. Después del ITER se prevé la construcción de centrales de demostración de la fusión (o DEMO) para demostrar que la fusión nuclear controlada puede generar energía eléctrica neta. El OIEA organiza talleres sobre DEMO para facilitar la colaboración en la definición y coordinación de las actividades



Las futuras centrales nucleares de fusión se alimentarán con una mezcla de deuterio y tritio, dos isótopos del hidrógeno. En el interior del reactor, los núcleos de deuterio y tritio colisionan y se fusionan, liberando helio y neutrones.

(Imagen: OIEA/M. Barbarino)

periódicas del programa DEMO en todo el mundo (véase el artículo de la página 12).

Las previsiones apuntan a que la fusión podría satisfacer las necesidades energéticas de la humanidad durante millones de años. El combustible de fusión es abundante y de fácil acceso: el deuterio se puede extraer del agua marina de manera económica, y el tritio se puede producir a partir del litio, que está presente en grandes cantidades en la naturaleza. Los futuros reactores de fusión no generarán desechos nucleares de actividad alta y período largo, y en un reactor de fusión es prácticamente imposible que se produzca un accidente de fusión del núcleo.

Un dato importante es que la fusión nuclear no emite dióxido de carbono ni otros gases de efecto invernadero a la atmósfera, por lo que, junto con la fisión nuclear, podría contribuir a mitigar el cambio climático en el futuro en su condición de fuente de energía baja en carbono.

Fusión por confinamiento magnético con tokamaks y estelarators

Wolfgang Picot

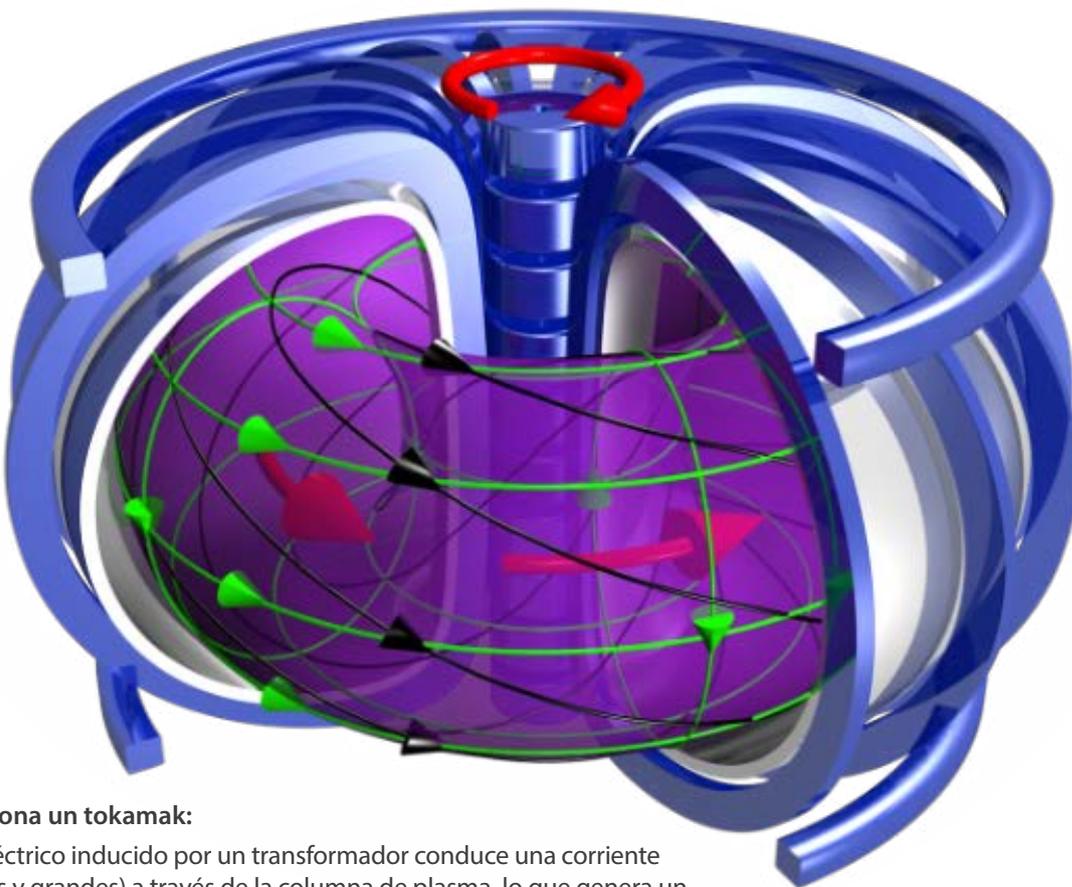
Las primeras reacciones de fusión en un laboratorio se lograron en 1934, y por entonces supusieron un gran avance. Hoy en día, sin embargo, no resulta especialmente difícil lograr una reacción de ese tipo: en 2018, un niño de doce años se incorporó al *Guinness World Records* como la persona más joven en realizar con éxito un experimento de fusión en casa.

Lamentablemente, esos experimentos producen estallidos que apenas duran unas fracciones de segundo, y conseguir y mantener dichas reacciones de fusión durante períodos prolongados sigue siendo extremadamente difícil. Solo si desarrollamos un modo estable y fiable de producir energía de fusión, la fusión podrá convertirse en una fuente de energía comercialmente viable.

Energía de fusión

La energía de fusión aprovecha la energía emitida en la “fusión” de núcleos atómicos ligeros. Cuando dos partículas de esas características se fusionan, el núcleo resultante es un poco más ligero que la suma de los originales. La diferencia no desaparece, sino que se convierte en energía. Lo asombroso es que esa mínima pérdida de masa se traduce en una inmensa cantidad de energía, de ahí que la conquista de la energía de fusión merezca tanto la pena.

Los estados de la materia son tres: sólido, líquido y gaseoso. Si un gas se somete a temperaturas muy elevadas, se convierte en plasma. En dicho estado, los electrones se separan de los átomos. Cuando un átomo carece de electrones orbitando alrededor del núcleo, se dice que está ionizado y se denomina ion. Así pues, el plasma está compuesto de iones y electrones libres. En este estado, los científicos pueden estimular los iones para que colisionen entre sí, se fusionen y liberen energía.



Cómo funciona un tokamak:

El campo eléctrico inducido por un transformador conduce una corriente (flechas rojas y grandes) a través de la columna de plasma, lo que genera un campo magnético poloidal que tuerce la corriente de plasma formando un círculo (círculo vertical verde). Con ello se evitan fugas y al hacerlo en una vasija en forma de dónut se crea un vacío. El otro campo magnético que recorre longitudinalmente el dónut recibe el nombre de toroidal (círculo horizontal verde). La combinación de estos dos campos crea una curva tridimensional, como una hélice (representada en negro), en la que el plasma se encuentra muy confinado.

Mantener estables los plasmas a fin de extraer energía es difícil. Son caóticos, están a una temperatura elevadísima y tienden a sufrir turbulencias y otras inestabilidades. Comprender, modelizar y controlar el plasma es sumamente complejo, pero los investigadores han logrado grandes avances en los últimos decenios.

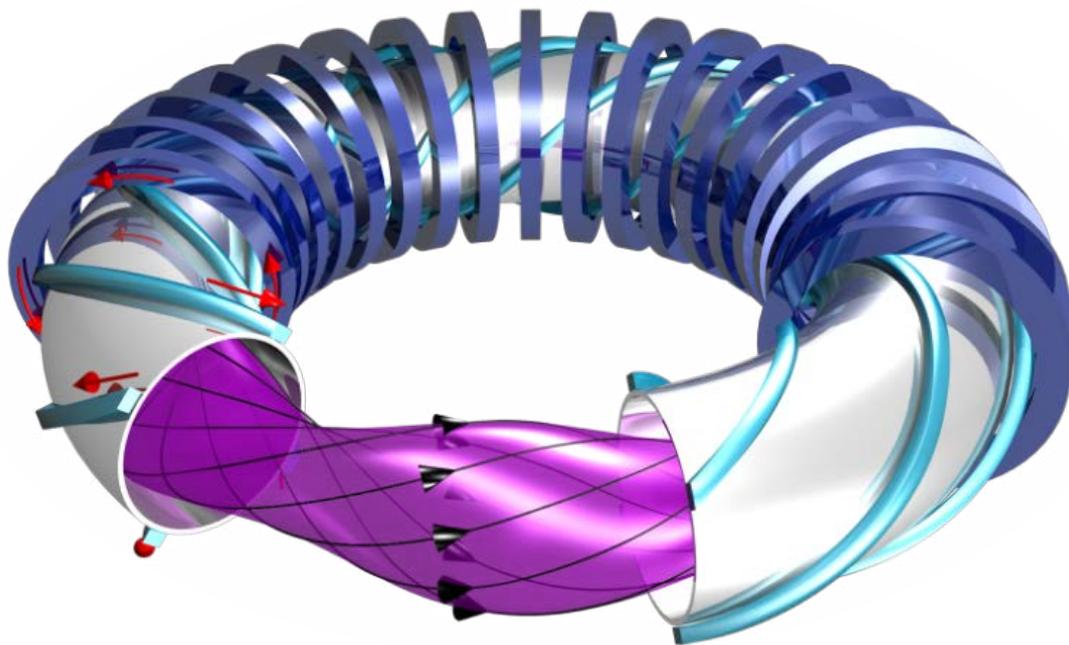
Los científicos emplean dispositivos de confinamiento magnético para manipular los plasmas. Entre los reactores de fusión de ese tipo, los más comunes son los tokamaks y los estelarators. Hoy en día, son los conceptos más prometedores de cara a futuras centrales de energía de fusión.

Ambos tipos de reactores aprovechan el hecho de que las partículas cargadas reaccionan a las fuerzas magnéticas. Los iones se mantienen confinados en los reactores gracias a unos potentes imanes. Los electrones también están limitados por las fuerzas de los reactores y desempeñan una función en las inmediaciones. Las fuerzas magnéticas hacen girar continuamente las partículas en torno a las cámaras del reactor (en forma de dónut) para evitar que se escapen del plasma.

Mismo desafío, distintas soluciones

Dado que las configuraciones de los estelarators son difíciles de construir, la mayoría de los experimentos de fusión actuales se realizan en tokamaks (acrónimo de una expresión rusa que se traduciría como “cámara toroidal con bobinas magnéticas”). En la actualidad hay en torno a 60 tokamaks y 10 estelarators en funcionamiento.

Ambos tipos de reactor presentan ciertas ventajas. Mientras que los tokamaks mantienen mejor el calor de los plasmas, los estelarators los mantienen más estables. Pese a la prevalencia



Si se retuercen los imanes, también se puede producir esa forma helicoidal sin necesidad de un transformador: este tipo de configuración se denomina estelarator.

(Imágenes: Instituto Max Planck de Física del Plasma, Alemania)

actual del tokamak, no se descarta que los estelarators lleguen a ser algún día la opción predilecta para una posible planta de energía de fusión.

Los investigadores han progresado mucho en materia de fusión por confinamiento magnético y ahora pueden lograr fácilmente plasmas de temperaturas muy elevadas. Han desarrollado poderosos imanes para manejar los plasmas y materiales innovadores capaces de soportar las difíciles condiciones que se producen en las vasijas del reactor. Los avances experimentales, teóricos, así como de modelización y de simulación, han permitido comprender mejor el comportamiento de los plasmas, y los dispositivos experimentales como el tokamak y el estelarator serán cruciales para demostrar la viabilidad científica y técnica de la producción de energía de fusión.

Alternativas al confinamiento magnético

Fusión por láser, dispositivos lineales y combustibles avanzados

Aleksandra Peeva

La fusión por láser es un método para iniciar reacciones de fusión nuclear y una posible alternativa al confinamiento magnético (véase el artículo de la página 6). Se basa en el confinamiento inercial, en el que se emplean láseres de alta potencia para calentar y comprimir diminutas cápsulas esféricas que contienen pastillas de combustible compuestas de isótopos del hidrógeno como el deuterio y el tritio.

La elevada temperatura a la que se somete la superficie de la cápsula provoca la microimplosión del combustible y, de resultados de ello, la capa superficial de la pastilla se destruye y explota. La inercia creada por este proceso mantiene el combustible confinado durante un lapso lo suficientemente prolongado como para que se produzcan reacciones de fusión.

Los experimentos en el ámbito de la fusión por láser se iniciaron en la década de 1970. En la actualidad, la Instalación Nacional de Ignición (NIF) del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, en los Estados Unidos de América, tiene 192 haces de láser y es, con diferencia, la instalación de láser más grande del mundo. En ella, los láseres calientan las paredes interiores de un contenedor de forma cilíndrica chapado en oro, llamado *hohlraum*, donde se encuentra la cápsula que contiene la pastilla de combustible de deuterio y tritio. La interacción entre el láser y el *hohlraum* genera rayos X, que calientan y comprimen la cápsula hasta crear un punto caliente en el centro de la pastilla en el que tienen lugar las reacciones de fusión.

Para alcanzar la ignición, es decir, el punto en el que la fusión pasa a ser totalmente autosostenida, las cápsulas de la instalación NIF deberían liberar unas 30 veces más energía de la que absorben.

“En los últimos cinco años hemos logrado importantes avances en la instalación y ahora mismo podemos producir entre 2,5 y 3 veces más energía de la que introducimos en el punto caliente del combustible —dice Brian Spears, Jefe

Adjunto de Modelización en Fusión por Confinamiento Inercial en la instalación NIF—. Multiplicar por 30 la energía que se consigue sigue siendo una meta importante, pero este no es un proceso lineal y ya hemos adoptado muchas medidas técnicas importantes para lograrlo.”

A fin de que la fusión sea comercialmente viable es fundamental que la presión central dentro del punto caliente del combustible sea varios miles de millones de veces superior a la atmosférica. En la instalación NIF se han conseguido importantes avances en esta esfera sustituyendo las cápsulas de plástico por cápsulas microcristalinas de carbono de alta densidad, lo que ha mejorado tanto los elementos técnicos utilizados para mantener las cápsulas como las estructuras empleadas para llenar las cápsulas con combustible de fusión. Esto permitió a los expertos aumentar considerablemente la eficiencia del acoplamiento energético entre la energía que produce el láser y la que absorbe la cápsula y, en última instancia, producir más energía.

“Todavía tenemos por delante importantes desafíos científicos, pero los avances recientes en la instalación NIF y en otras instalaciones demuestran que estamos cada vez más cerca de alcanzar el umbral de ignición por medio de la fusión por láser”, afirma el Sr. Spears.

En 2020 el OIEA puso en marcha un nuevo proyecto coordinado de investigación (PCI) titulado “Vías hacia la energía derivada de la fusión por confinamiento inercial: investigación de materiales y desarrollo de tecnologías”. El proyecto, en el que participan 24 institutos de 17 países y que es el cuarto en una serie de PCI en este ámbito, se centra en el desarrollo de diseños de cápsulas de alta ganancia que permitan lograr una fusión completamente autosostenida.

Fusión por colisión de haces

Otra alternativa a los enfoques del láser y el confinamiento magnético es utilizar haces de iones generados por



aceleradores de partículas y hacerlos colisionar entre sí, de forma que la fusión se produce en el punto en el que colisionan. Una gran desventaja de este método es la elevada probabilidad de que las partículas reboten sin llegar a fusionarse ni a producir energía.

La empresa privada estadounidense TAE Technologies utiliza un dispositivo lineal: un reactor cilíndrico de 25 metros de longitud. Para conseguir la fusión se lanzan desde cada extremo del reactor dos plasmas, que colisionan y se unen en una nube en el centro. Posteriormente se bombardea la nube con átomos de deuterio para hacerla girar, de forma que los plasmas se mantienen calientes y estables.

Del confinamiento alternativo a los combustibles avanzados

Otra ventaja de la fusión mediante láseres o dispositivos lineales es que estos métodos podrían adaptarse más fácilmente para usar combustibles distintos del deuterio y el tritio. Tradicionalmente se ha utilizado una mezcla de estos isótopos del hidrógeno para lograr la fusión, ya que la temperatura que necesitan para alcanzar la tasa de reacción más elevada es menor que en el caso de otros combustibles.

Sin embargo, el tritio es radiactivo y no se encuentra de forma natural en cantidades significativas, sino que hay que producirlo a partir de una reacción nuclear entre los neutrones generados en la fusión y el litio que rodea la pared del reactor. La energía de estos neutrones presenta también importantes desafíos en lo que respecta a los materiales utilizados en la cámara de vacío del reactor, puesto que, cuando los neutrones chocan con las paredes del reactor, las estructuras y componentes de este se vuelven radiactivos. Esto obliga a plantearse consideraciones adicionales en materia de seguridad radiológica y disposición final (véase el artículo de la página 14).

Para sortear los desafíos que implica el uso de tritio se están llevando a cabo experimentos con combustibles de fusión alternativos o avanzados, como la fusión protón boro 11 (p B 11). El boro 11 no es radiactivo y constituye aproximadamente el 80 % de todo el boro presente en la naturaleza, por lo que está disponible en grandes cantidades. No obstante, el problema principal que plantea la fusión p B 11 es que el plasma tendría que estar a una temperatura cien veces superior a la del plasma que contiene deuterio y tritio. Afortunadamente, en el caso de la ignición por láser o los dispositivos lineales, el calentamiento se limita a los puntos calientes y no es necesario que todo el plasma alcance una temperatura muy elevada.

“La fusión p B 11 es la fuente de combustible más limpia y respetuosa con el medio ambiente que existe en la Tierra, no genera subproductos nocivos y existen reservas suficientes en la naturaleza para mantener el planeta durante milenios. Estos factores, tomados conjuntamente, pueden maximizar la seguridad, la economía, la eficiencia y la durabilidad de las centrales de fusión —explica Michl Binderbauer, Director Ejecutivo de TAE—. La principal dificultad de la fusión p B 11 es que para sostener la reacción de fusión se necesitan temperaturas más altas que las que se precisan para otros ciclos de combustible. TAE ha desarrollado un concepto de confinamiento alternativo para afrontar este desafío.”

Así pues, los combustibles avanzados podrían ofrecer una solución más eficaz y eficiente para producir energía de fusión en el futuro.

Trabajadores de la Instalación Nacional de Ignición (NIF) inspeccionan un conjunto óptico final durante un período de mantenimiento ordinario. La instalación NIF, que se encuentra en el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, es el sistema láser de mayor tamaño y más alta energía del mundo.

(Fotografía: Laboratorio Nacional Lawrence Livermore)



ITER: el experimento de fusión más grande del mundo

Wolfgang Picot

Con sus 23 000 toneladas de peso y casi 30 metros de altura, el ITER será algo digno de admirar. Este reactor de fusión nuclear ocupará el centro de un complejo de 180 hectáreas que también incluirá instalaciones y equipo auxiliar. Las enormes dimensiones del ITER —término latino que significa “camino”— superarán con creces las de los reactores experimentales de fusión de mayor tamaño actualmente en funcionamiento: el Toro Europeo Común (JET), en el Reino Unido, y el JT-60SA, un proyecto conjunto de Europa y el Japón que se encuentra en el país nipón.

Pero, ¿qué puede llegar a ofrecer el ITER y, en la era de la miniaturización y la optimización, por qué es necesario construir un dispositivo de investigación de tales proporciones?

Uno de los objetivos principales del ITER es demostrar que las reacciones de fusión pueden producir una cantidad de energía mucho mayor que la suministrada para iniciar el proceso de reacción, lo que resultará en una ganancia global de energía. Los reactores como el ITER reciben el nombre de tokamaks (véase el artículo de la página 6) y utilizan una combinación de sistemas caloríficos, potentes imanes y otros dispositivos para crear reacciones de fusión en plasmas extremadamente calientes y liberar así energía. Los campos magnéticos resultantes mantienen unidas las partículas cargadas y las hacen girar dentro de la vasija del reactor, que tiene forma de dónut, para que puedan fusionarse y producir energía de fusión.

En cuanto a la cuestión del tamaño, los tokamaks más grandes ofrecen un mejor aislamiento y confinan durante más tiempo las partículas generadas por la fusión, produciendo así más energía que los dispositivos de menor tamaño.

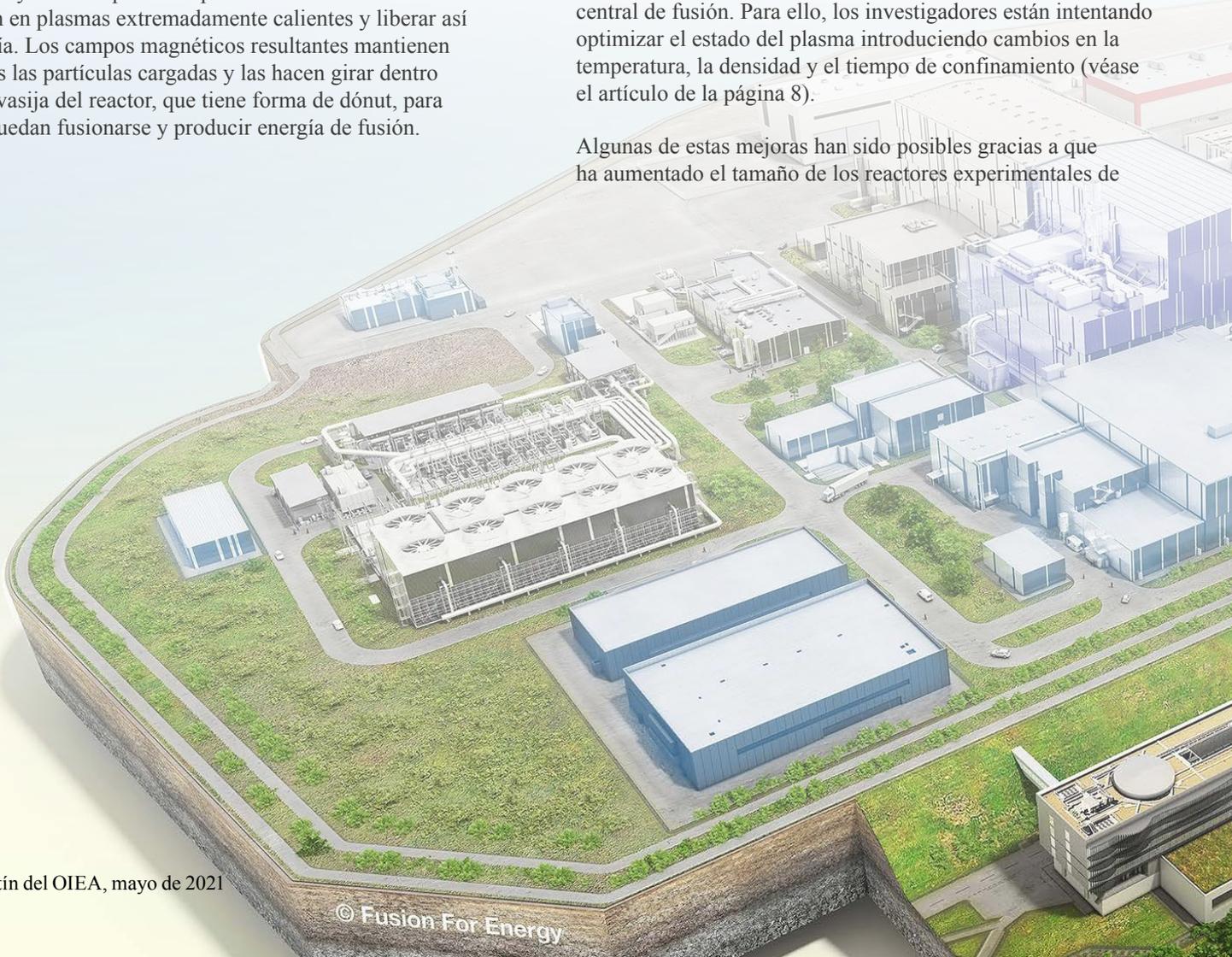
Un importante indicador del rendimiento de un reactor es su ganancia de energía de fusión, es decir, la relación entre la energía de fusión producida y la inyectada en el plasma para iniciar la reacción, que se expresa mediante el símbolo “Q”.

Hasta el momento, el JET ha obtenido los mejores resultados, con un valor Q de 0,67, al producir 16 megavatios (MW) de energía de fusión a partir de 24 MW de energía calorífica. Con todo, para producir electricidad se necesitarán valores Q mucho más elevados.

Requisitos previos para la producción de electricidad

Aunque durante los últimos 50 años de experimentos en el ámbito de la fusión el rendimiento de los dispositivos de fusión se ha multiplicado por 100 000, este todavía tiene que aumentar 5 veces más para alcanzar el nivel necesario para una central de fusión. Para ello, los investigadores están intentando optimizar el estado del plasma introduciendo cambios en la temperatura, la densidad y el tiempo de confinamiento (véase el artículo de la página 8).

Algunas de estas mejoras han sido posibles gracias a que ha aumentado el tamaño de los reactores experimentales de



fusión. En el ITER, cuya altura y radio duplican los del JET, el plasma alcanzará un volumen diez veces mayor. Además, en este reactor se están aplicando diseños novedosos y materiales innovadores, por lo que también incorporará algunos de los dispositivos más potentes utilizados hasta la fecha para calentar el plasma. Con el ITER se pretende producir 500 MW de energía de fusión —lo que daría un valor Q de al menos 10— durante pulsos de entre 5 y 10 minutos aproximadamente cada uno, inyectando únicamente 50 MW de energía calorífica en el plasma.

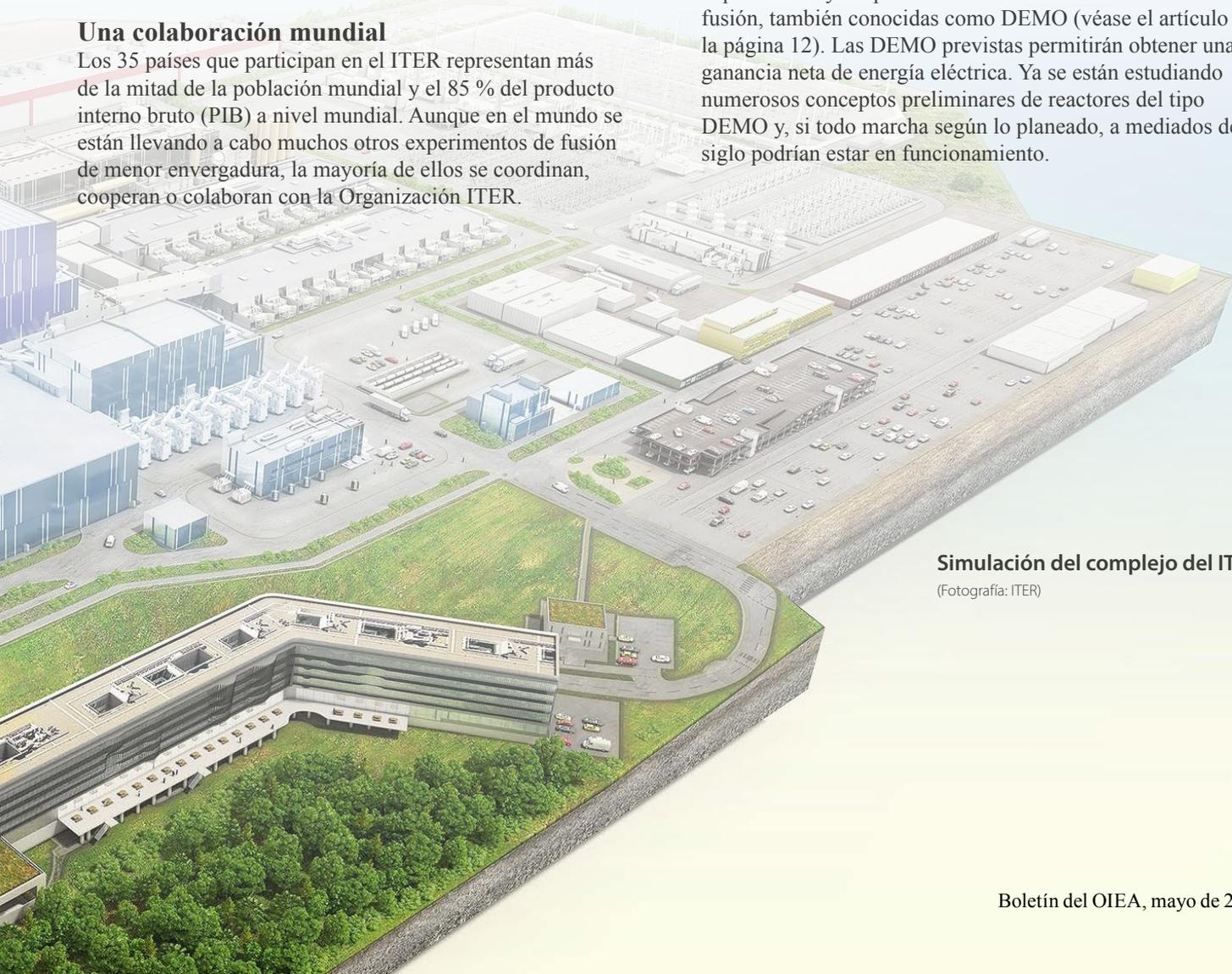
Si bien el ITER tendrá un rendimiento máximo espectacular, este solo se alcanzará durante un lapso muy breve. Para poder llegar a ofrecer electricidad de manera constante, las futuras centrales de fusión tendrán que estar siempre en funcionamiento. Un valor Q de 5 representa un límite crítico por encima del cual el plasma empieza a calentarse por sí mismo para autosostener la reacción de fusión. A fin de comprender mejor cómo lograr esta reacción autosostenida, el objetivo del ITER es llegar a generar y mantener valores Q de 5 durante periodos muy superiores a los 10 minutos.

Una colaboración mundial

Los 35 países que participan en el ITER representan más de la mitad de la población mundial y el 85 % del producto interno bruto (PIB) a nivel mundial. Aunque en el mundo se están llevando a cabo muchos otros experimentos de fusión de menor envergadura, la mayoría de ellos se coordinan, cooperan o colaboran con la Organización ITER.

El OIEA y la Organización ITER han mantenido una estrecha relación desde el primer momento, especialmente en las esferas de la investigación, la gestión del conocimiento, el desarrollo de recursos humanos y las actividades de enseñanza y divulgación en el ámbito de la fusión nuclear. El OIEA también ayuda a la Organización ITER a compartir sus experiencias en materia de seguridad nuclear y protección radiológica con los Estados Miembros del OIEA, incluidos los que no participan en el proyecto. Este año la Organización ITER y la Comisión de Energía Atómica y Energías Alternativas (CEA) de Francia acogerán conjuntamente la 28ª Conferencia del OIEA sobre Energía de Fusión.

Se espera que el ITER demuestre que es científica y tecnológicamente viable producir electricidad a partir de la energía de fusión y que, de acuerdo con su plan de investigación por fases, los primeros experimentos en este sentido comiencen en 2025. Los experimentos a pleno rendimiento deberían iniciarse en 2035. Si los resultados son favorables, estos avances supondrán un hito importante y tenderán un puente histórico entre la investigación experimental y las primeras centrales de demostración de la fusión, también conocidas como DEMO (véase el artículo de la página 12). Las DEMO previstas permitirán obtener una ganancia neta de energía eléctrica. Ya se están estudiando numerosos conceptos preliminares de reactores del tipo DEMO y, si todo marcha según lo planeado, a mediados de siglo podrían estar en funcionamiento.



Simulación del complejo del ITER.

(Fotografía: ITER)

Centrales de demostración de la fusión

Un paso fundamental hacia la producción de electricidad comercial a gran escala

Irena Chatzis y Matteo Barbarino

La finalidad del ITER, el experimento de fusión más grande del mundo, es demostrar cómo se crea energía neta a partir de una reacción de fusión. El siguiente paso importante será demostrar que puede producirse electricidad neta a partir de la energía de fusión. Ahí es donde entran en juego las centrales de demostración de la fusión, también conocidas como DEMO.

Los reactores del tipo DEMO son más un concepto de diseño que una configuración particular de un dispositivo de fusión. Aún no se han terminado los diseños preliminares de las DEMO financiadas con capital público, en desarrollo en varios países. Esto se hará tras conocer los resultados de los experimentos del ITER.

Se prevé que las DEMO funcionen de forma casi constante para que produzcan más de 50 megavatios (MW) de ganancia neta de electricidad. Su principal desafío será encontrar el modo de mantener el plasma de fusión estable durante un lapso suficientemente prolongado para producir energía de forma continua.

Si bien aún quedan por resolverse muchas cuestiones con respecto a las DEMO, una DEMO pública será probablemente un reactor del tipo tokamak que utilizará como combustible isótopos pesados de hidrógeno —deuterio y tritio—. Sin embargo, las reservas de tritio disponibles en el mundo son limitadas y las DEMO deberán producir por sí mismas suficientes reservas de ese isótopo por medio de los llamados “mantos”, que producen y extraen tritio. También habrá que resolver los problemas relacionados con la carga, el consumo, el confinamiento, la extracción y la separación del tritio, dice Sheila González de Vicente, Física especializada en Fusión Nuclear del OIEA.

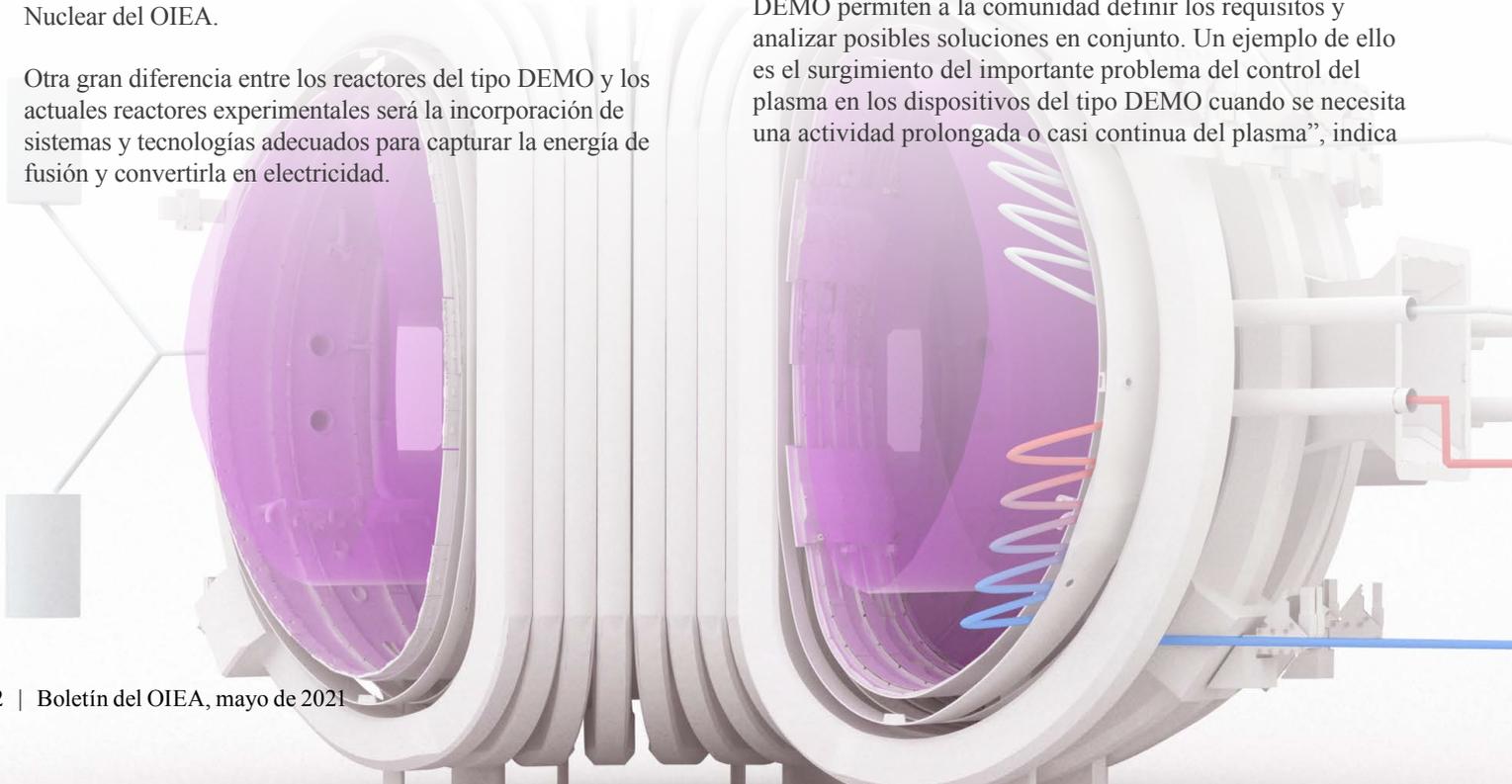
Otra gran diferencia entre los reactores del tipo DEMO y los actuales reactores experimentales será la incorporación de sistemas y tecnologías adecuados para capturar la energía de fusión y convertirla en electricidad.

“Los dispositivos del tipo DEMO exigen el diseño y la integración de componentes y sistemas complejos que no forman parte de los actuales dispositivos experimentales de fusión. Se necesitan componentes como los mantos de producción de tritio, la generación de energía y el control de la combustión, entre otros” —dice Elizabeth Surrey, Jefa de Tecnología de la Autoridad de Energía Atómica del Reino Unido—. “Las condiciones de funcionamiento de una DEMO son particularmente hostiles para los materiales, ya que el plasma en condiciones de quemado genera un alto flujo de neutrones y densidades de alta potencia en las paredes. Las DEMO requieren la creación de nuevos materiales y tecnologías”.

La función del OIEA

En diversos países, grupos de investigadores están examinando los conceptos y los enfoques de las DEMO. El OIEA facilita la coordinación internacional y el intercambio de prácticas óptimas mediante una serie de reuniones técnicas y, desde 2012, por intermedio de sus talleres periódicos del programa DEMO. Mediante esas plataformas se promueve el debate sobre cuestiones de física y tecnología, se facilita el intercambio de estrategias para los programas DEMO y se analizan posibles maneras de proceder. Con el paso del tiempo se ha atribuido menor importancia a las visiones amplias para concentrarse en los intrincados desafíos técnicos que han de superarse.

“Al concentrarse en la determinación de problemas y examinar las actividades de investigación y desarrollo en curso, la serie de reuniones técnicas del OIEA y los talleres del programa DEMO permiten a la comunidad definir los requisitos y analizar posibles soluciones en conjunto. Un ejemplo de ello es el surgimiento del importante problema del control del plasma en los dispositivos del tipo DEMO cuando se necesita una actividad prolongada o casi continua del plasma”, indica



la Sra. Surrey, que desempeñó funciones como Presidenta de los últimos tres talleres del programa DEMO, celebrados entre 2016 y 2019.

Planes en todo el mundo

Si bien aún se están examinando diversas vías para lograr la electricidad basada en la fusión, existe amplio consenso respecto de los problemas científicos y tecnológicos que hay que resolver. Cada país tiene su calendario, pero el consenso general entre los científicos es que se puede construir y poner en funcionamiento un reactor del tipo DEMO que produzca electricidad para 2050.

En China se han logrado importantes avances en la planificación de su reactor de prueba de ingeniería de fusión (CFETR). Este dispositivo ayudará a colmar la brecha entre el ITER y las DEMO. Su construcción comenzará en la década de 2020, a la que seguirá la construcción de una DEMO en la década de 2030.

En Europa, EUROfusion está a cargo de la elaboración del diseño de una DEMO. Este proyecto se encuentra actualmente en la fase de diseño conceptual (2021-2027) y tiene por objeto demostrar la viabilidad tecnológica y económica de la fusión produciendo varios cientos de MW de electricidad neta.

La India anunció su plan de comenzar a construir para 2027 un dispositivo denominado SST-2 que permitirá poner a prueba los conceptos y componentes de un reactor para una DEMO y posteriormente, en 2037, comenzará la construcción de una DEMO.

El grupo japonés de diseño especial conjunto para DEMO de fusión está trabajando en el estudio conceptual de una instalación DEMO estable (JA DEMO), cuya construcción debería comenzar alrededor de 2035.

En 2012, la República de Corea comenzó un estudio de diseño conceptual para una “K-DEMO”, cuya construcción está prevista para 2037, con potencial para generar electricidad a partir de 2050. En la primera fase (2037-2050), K-DEMO se utilizará para desarrollar y poner a prueba componentes, los cuales se utilizarán ulteriormente. En la segunda fase, después de 2050, se espera que demuestre que es posible generar electricidad neta.

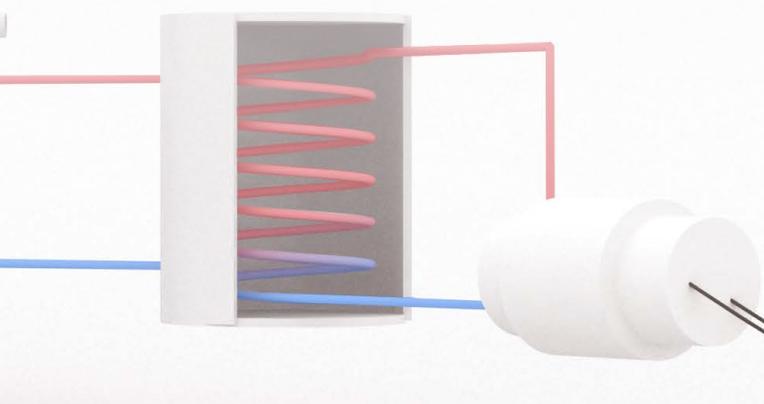
La Federación de Rusia prevé la construcción de una instalación híbrida de fusión y fisión denominada DEMO Fusion Neutron Source (DEMO-FNS), que recogerá neutrones producidos mediante fusión para convertir uranio en combustible nuclear y destruir los desechos radiactivos. La instalación, cuya construcción se prevé finalizar para 2023, forma parte de la estrategia acelerada del país para establecer una central de fusión para 2050.

En los Estados Unidos de América, expertos en materia de fusión acaban de publicar dos informes en los que se recomienda iniciar un programa nacional de investigación y tecnología, con la participación de alianzas público-privadas, para, en última instancia, dar viabilidad comercial a la fusión. Se prevé realizar esto entre 2035 y 2040, con el objetivo de posicionar al país como líder en materia de fusión y acelerar su transición a la energía con bajas emisiones de carbono para 2050.

En paralelo, varias empresas comerciales financiadas con capital privado también están avanzando en el desarrollo de conceptos para centrales de fusión, aprovechando los conocimientos técnicos generados tras años de actividades de investigación y desarrollo financiadas con capital público y proponiendo plazos aún más exigentes.

Concepto artístico de una central de fusión que convierte el calor de la fusión en calor y electricidad.

(Fuente: EUROfusion)



La seguridad en el ámbito de la fusión

Un proceso inherentemente seguro

Carley Willis y Joanne Liou

Mientras que la fisión nuclear obtiene energía dividiendo los núcleos atómicos, la fusión nuclear lo hace uniéndolos y liberando energía durante ese proceso. Si bien ambas reacciones atómicas producen energía modificando átomos, sus diferencias fundamentales repercuten ampliamente en la seguridad.

Las condiciones necesarias para iniciar y mantener una reacción de fusión hacen que sea imposible que se produzca un accidente como los de fisión o la fusión del núcleo a partir de una reacción en cadena. Tendrían que darse circunstancias muy excepcionales —como temperaturas que superen los 100 millones de grados Celsius— para que en las centrales de fusión nuclear se alcanzara una densidad de partículas lo suficientemente elevada para que se produjera la reacción. Dado que las reacciones de fusión solo pueden tener lugar en condiciones tan extremas, es imposible que se produzca una reacción en cadena descontrolada, explica Sehila González de Vicente, Física especializada en Fusión Nuclear del OIEA.

Las reacciones de fusión dependen de la introducción constante de combustible y el proceso es altamente sensible a cualquier variación en las condiciones de trabajo. Dado que una reacción de fusión podría interrumpirse en cuestión de segundos, el proceso es inherentemente seguro. “La fusión es un proceso autolimitante: si no se puede controlar la reacción, ella se detiene por sí sola”, añade.

Además, la fusión no produce desechos nucleares de período largo altamente radiactivos. “La fusión produce únicamente desechos radiactivos de actividad baja y no plantea ningún peligro grave”, indica la Sra. González de Vicente. Los artículos contaminados, como la vestimenta de protección, los productos de limpieza e incluso los tubos o hisopos médicos, son residuos radiactivos de actividad baja y período corto que pueden manipularse en forma segura tomando precauciones básicas.

La mayoría de los dispositivos de fusión más comunes utilizan como combustible una combinación de deuterio y tritio. Este último es un isótopo radiactivo del hidrógeno con un período de semidesintegración de 12,3 años. Como consecuencia de la reacción de fusión se liberan neutrones que colisionan contra la pared que recubre el núcleo del reactor y son absorbidos por ella, indica la Sra. González de Vicente, lo que convierte dicha pared en radiactiva. “Los neutrones reaccionan con el litio que se encuentra en la pared, lo que genera tritio que puede volver a inyectarse en el dispositivo”.

Sin embargo, existen semejanzas entre las instalaciones de fusión y las de fisión, como la manera en que se manipula el material radiactivo y el uso que se hace de los sistemas de refrigeración. “Los órganos reguladores tienen una vasta experiencia en el ámbito de la seguridad tecnológica y la seguridad física aplicadas a la fisión. Estamos trabajando con ellos para que todos los conocimientos aplicables se transfieran a la fusión —indica la Sra. González de Vicente—. Ahora bien, no hay correspondencia en todos los casos y es preciso determinar y abordar las diferencias con la fusión, como la menor cantidad y variedad de material radiactivo, la imposibilidad de que se den las condiciones para la fusión del núcleo y la ausencia de desechos de período largo. El OIEA está ayudando a facilitar esa labor.”

Colaboración a nivel internacional

El ITER, el experimento de fusión más grande del mundo, ha reunido a expertos de 35 países para que trabajen en hacer que las fuentes de energía de fusión sean una realidad y a ayudar al mismo tiempo a superar los obstáculos en materia de seguridad tecnológica y seguridad física aplicables a la fusión a medida que el proyecto avanza.

Se puede alcanzar un alto nivel de seguridad si se aplican a la fusión los requisitos de seguridad pertinentes aplicables a la fisión, como las normas de seguridad del OIEA. Por ejemplo, al igual que con los reactores de fisión nuclear, las centrales de fusión propuestas también deben tener en cuenta las reglamentaciones relativas a las dosis, y conviene diseñar las instalaciones de modo que la dosis mínima sea “tan baja como sea razonablemente posible” (ALARA). Sin embargo, dadas las diferencias fundamentales en cuanto al riesgo de accidentes, es necesario aplicar un enfoque graduado para evitar reglamentar en exceso el proceso de fusión. “El problema con todas las normas de seguridad que existen es que están orientadas hacia la fisión —indica Stéphane Calpena, Jefe Adjunto del Departamento de Seguridad y Calidad de la Organización ITER—. Tenemos que extraer las normas que son pertinentes para la fusión y aplicarlas de forma proporcional al riesgo, para asegurar que la tecnología no solo es viable, sino que es realmente segura. La fusión es una nueva forma de crear energía y sigue siendo una tecnología muy joven.”

El OIEA ayuda a promover esta tecnología celebrando reuniones técnicas para expertos con el fin de intercambiar conocimientos que puedan ayudar a superar los obstáculos en

materia de fusión y garantizar la seguridad de las instalaciones de fusión. La Primera Reunión Técnica Conjunta OIEA-ITER sobre Seguridad y Protección Radiológica aplicadas a la Fusión, presidida por el Sr. Calpena en noviembre de 2020, se centró en el desarrollo de una metodología para determinar los posibles tipos y cantidades de material radiactivo o peligroso en instalaciones de fusión que podría emitirse al medio ambiente, así como en la preparación de publicaciones equivalentes a las de la Colección de Normas de Seguridad del

OIEA, N° SSR-4 y SSG-12, pero para fusión. En la reunión se abordaron temas como los criterios de riesgo para las instalaciones de fusión y el diseño y la explotación de esas instalaciones. En el Taller sobre la Gestión de los Desechos Generados en la Fusión, programado para octubre de 2021, se examinará la manera en que se clasifican y se eliminan los desechos radiactivos provenientes de la producción de energía de fusión.

Una de las cámaras de vacío del ITER, una pieza de 440 toneladas que ayudará a contener el plasma del dispositivo, es instalada.

(Fotografía: ITER)



Cómo las bases de datos del OIEA contribuyen a avanzar en la investigación de cara al uso comercial de la fusión

Aleksandra Peeva

Para hacer realidad la fusión comercial, y la promesa que esta encierra de aprovechar el abundante potencial energético de la fusión nuclear, es preciso comprender mejor los plasmas —gases ionizados sobrecalentados— y desarrollar materiales de alto rendimiento para reactores. Gracias al apoyo que prestan a los científicos dedicados a estudiar el comportamiento del plasma, y a la modelización de las propiedades de los materiales utilizados en la investigación sobre energía de fusión, las bases de datos del OIEA contribuyen a avanzar en la investigación orientada hacia una posible producción de energía a escala comercial.

Una cuestión fundamental para el desarrollo de la energía de fusión es lograr y, más adelante, mantener las condiciones extremas necesarias para la “ignición de fusión”: ese punto en que una reacción de fusión se sostiene gracias a la energía que ella misma genera. Para ello, los combustibles del plasma de la reacción han de estar confinados en un espacio durante un lapso lo suficientemente prolongado como para permitir que la fusión se produzca y se caliente hasta ser autosuficiente.

Dicha ignición exige también que los ingenieros desarrollen materiales de alto rendimiento para la pared de un reactor que sean capaces de soportar el flujo constante de energía en forma de calor y neutrones liberados. Esa energía calienta las paredes y el bombardeo de neutrones puede dañar los materiales, lo cual pone en riesgo la integridad del material de la pared o provoca la pulverización iónica del material en el plasma y su enfriamiento.

Asimismo, los materiales de un reactor deberían absorber la menor cantidad posible de tritio, uno de los isótopos de hidrógeno del combustible empleado para la fusión. Todo tritio que se absorba será combustible perdido de cara a la reacción. Y lo que es más importante: el tritio es radiactivo y, con objeto de reducir al mínimo la cantidad y la radiotoxicidad de los desechos nucleares que se pudieran generar, lo ideal sería que las paredes del reactor no absorbieran el tritio y no se volvieran radiactivas en el proceso.

Análisis del comportamiento del plasma

A fin de que el plasma pueda permanecer más tiempo confinado por las fuerzas magnéticas, es preciso comprender en profundidad su comportamiento en el reactor. Las bases de datos del OIEA contienen información sobre los procesos que tienen lugar en el plasma interno y en el borde del plasma, así como en los sistemas de inyección de haces neutros utilizados para calentar el plasma de cara a la ignición. Asimismo, encierran datos sobre las propiedades de diversas impurezas que se inyectan deliberadamente en el plasma con fines diagnósticos y para mitigar inestabilidades.

La base de datos ALADDIN del OIEA es un repositorio en el que se pueden consultar datos de colisión evaluados correspondientes a procesos relacionados con la fusión. La comunidad investigadora se sirve de ella para efectuar diagnósticos del plasma y para aprender acerca de los parámetros plasmáticos importantes,

como la temperatura y la densidad. Con el uso de ALADDIN, los científicos pueden comprender mejor las propiedades colisional-radiativas de los iones que resultan críticas para un diagnóstico fiable del plasma.

Modelización de materiales para la fusión

La falta de instalaciones que repliquen las condiciones extremas de un reactor de fusión dificulta la creación de nuevos materiales para las futuras centrales de fusión. Mediante el uso de técnicas de modelización computacional, de plataformas computacionales de alto rendimiento y de instrumentos de caracterización experimental analítica, los expertos pueden diseñar materiales capaces de ofrecer buenos resultados en un entorno de energía de fusión.

Gracias a la modelización se están descubriendo nuevos materiales y se puede prever la fiabilidad de los ya existentes. Esto resulta especialmente importante para la pared más interna del reactor, que es la más cercana al plasma dentro de la vasija del reactor y protege los componentes de dicha vasija contra los daños que pudiera ocasionar aquel.

“El entorno extremo al que está expuesta la primera pared de un reactor de fusión nuclear exige que se seleccionen cuidadosamente los materiales, que han de soportar altas temperaturas y bombardeos de partículas sin erosionarse, quebrarse ni volverse radiactivos, y sin retener el combustible de hidrógeno —dice Christian Hill, Jefe de la Dependencia de Datos Atómicos y Moleculares

del OIEA—. Solo con datos fiables provenientes de experimentos y cálculos exactos se pueden prever las propiedades pertinentes de los materiales candidatos”.

Los investigadores emplean las bases de datos del OIEA en la investigación sobre energía de fusión y en otras aplicaciones de la ciencia y tecnología del plasma. El Organismo recaba y evalúa datos mediante sus redes, proyectos coordinados de investigación y Reuniones Técnicas, y los distribuye por medio de sus bases de datos en línea gratuitas, bien planteadas y con función de búsqueda integrada.

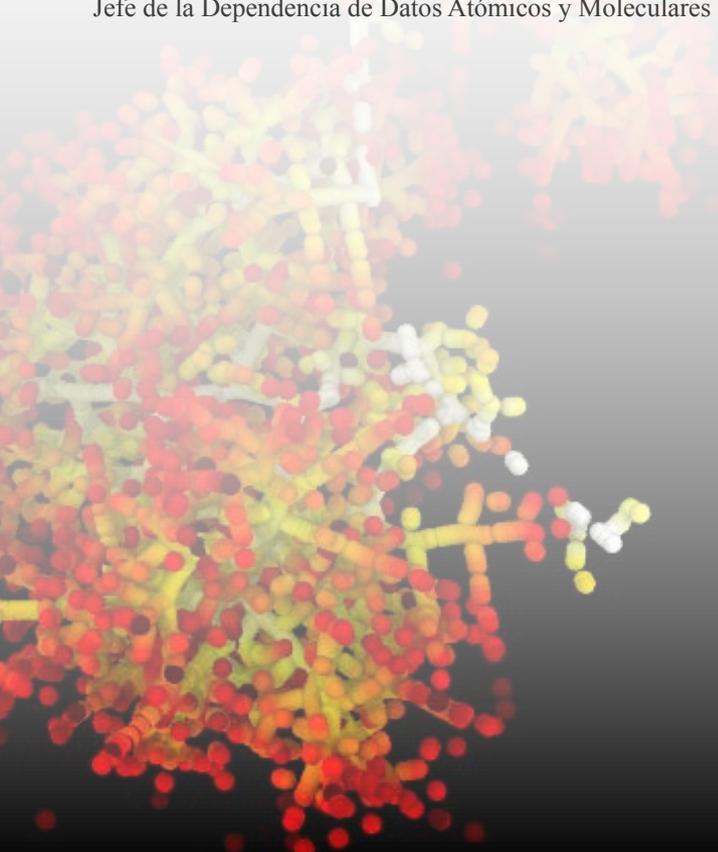
“Una base de datos internacional y bien planteada resulta valiosa en la medida en que actúa como un repositorio permanente, fiable y accesible de datos evaluados al que la comunidad de expertos en fusión puede recurrir libremente. La Dependencia de Datos Atómicos y Moleculares del OIEA es también única en otros aspectos: existe desde hace más de 40 años, una antigüedad considerable cuando se trata de datos de fusión”, afirma el Sr. Hill.

Las bases de datos del OIEA son objeto de mejoras y ampliaciones continuas en función de las necesidades específicas de los investigadores con respecto a los datos, como la cuantificación y la inferencia de incertidumbres en ellos, y las técnicas de validación, mantenimiento y divulgación de datos.

Todas las bases de datos sobre fusión gestionadas por el OIEA pueden consultarse en: amdis.iaea.org/databases

Visualización de la cascada de colisiones que dañan un material cristalino.

(Imagen: cortesía de Andrea Sand/Universidad Aalto)



Plasma en condiciones de quemado

Un paso crucial hacia la energía de fusión

Matteo Barbarino

En el núcleo de nuestro Sol, las temperaturas extremas y la inmensa presión generada por las enormes fuerzas gravitatorias crean unas condiciones ideales para la fusión nuclear.

Ahora bien, recrear esto en la Tierra, que carece de las fuerzas gravitatorias extremas de una estrella, y hacerlo mediante un reactor de fusión plantea numerosos desafíos técnicos. El mayor de todos consiste en conservar a más de 100 millones de grados Celsius el plasma calentado de la fusión (ese gas dotado de carga y compuesto por iones y electrones libres en el que tiene lugar la reacción), confinando sus partículas en un campo magnético y manteniéndolas unidas durante un lapso lo suficientemente prolongado para que tengan lugar reacciones y estas produzcan energía.

Comprender y validar las hipótesis actuales sobre cómo se comporta este plasma caliente de la fusión son algunas de las cuestiones fundamentales de las que se han de ocupar los científicos e ingenieros especializados en fusión para más adelante generar electricidad a partir de la fusión.

Un supercombustible para temperaturas superiores a las del Sol

Las opciones de combustible para la fusión son limitadas. En la Tierra, el combustible de máximo rendimiento posible está formado por una mezcla de iones de deuterio y tritio: dos formas más pesadas de hidrógeno. Cuando estas colisionan a temperaturas extremas, se fusionan y generan partículas cargadas compuestas por dos protones y dos neutrones (denominadas partículas alfa), así como neutrones libres. Mientras que los neutrones escapan del campo magnético y no interactúan con el plasma, las partículas alfa quedan confinadas por el campo magnético y calientan aún más el plasma circundante. “Para aprovechar la energía de fusión es fundamental controlar ese calentamiento”, dice Matthew Hole, Profesor de la Universidad Nacional de Australia.

Una energía de fusión segura y sostenible se basa en estas partículas alfa cargadas y en su energía para mantener el plasma a una temperatura constante, lo que, a su vez, permite que las reacciones sean autosuficientes. Lograr esto es esencial para el funcionamiento de un reactor de fusión.

En la década de 1990 los reactores experimentales de fusión producían hasta 16 megavatios (MW) de energía durante algo menos de un segundo. En esos experimentos, las partículas alfa suministraban solo un 10 %, aproximadamente, del calor abastecido de manera externa. Comprender qué ocurre cuando las partículas alfa proporcionan una parte mayor del calor es una cuestión que se explorará por medio de iniciativas como el ITER: un experimento internacional a escala de reactor que se está construyendo en Francia (véase el artículo de la página 10).

“El ITER nos brindará la oportunidad de estudiar los ‘plasmas en condiciones de quemado’, en los que al menos el 66 % del calentamiento total provendrá de las partículas alfa de la fusión. Si se dan estas condiciones, el ITER producirá 500 MW de energía de fusión durante un máximo de 500 segundos”, declara Alberto Loarte, Jefe de la División de Ciencias de la Organización ITER. Según afirma, los experimentos de su organización proporcionarán respuestas muy necesarias a preguntas clave dentro de la física del plasma en condiciones de quemado, por ejemplo: cómo crear un plasma que se autosostenga a partir del calentamiento interno proveniente de sus partículas alfa, y cómo encontrar unas condiciones de funcionamiento óptimas para un alto rendimiento de fusión que sean compatibles con la capacidad de la pared del reactor de soportar la energía.

Cómo lograr que el plasma sea autosuficiente

Un indicador importante del rendimiento de un reactor de fusión es su “ganancia de potencia de fusión”, que está determinada por la temperatura del plasma, su densidad y el tiempo de confinamiento de la energía, un parámetro de medición de la eficacia con que el campo

magnético mantiene la energía del plasma a lo largo del tiempo. Para crear una reacción automantenida han de cumplirse tres requisitos: una temperatura en torno a los 100 millones de grados Celsius, una densidad 1 millón de veces inferior a la del aire, y un tiempo de confinamiento de la energía de apenas unos pocos segundos.

Aunque esos requisitos se entienden bien, la manera de satisfacerlos todos a un mismo tiempo lejos está de ser evidente. Por ejemplo, incrementar la densidad del plasma es, en principio, ventajoso, puesto que así es más probable que se produzcan reacciones de fusión. Sin embargo, tal y como señala Richard Hawryluk, Director Adjunto - Fusión del Laboratorio de Física del Plasma de Princeton, en los Estados Unidos de América, muchos experimentos muestran que, conforme la densidad se acerca a su máximo, el confinamiento del plasma se degrada más de lo previsto.

Para que el experimento del ITER tenga éxito han de encontrarse soluciones a estos problemas, y gran parte de la investigación necesaria para tal fin requiere cooperación internacional. Por intermedio de su serie de reuniones técnicas sobre física de partículas con carga energética, control del plasma y obtención, validación y análisis de datos de fusión, el OIEA proporciona una plataforma para el intercambio de resultados científicos y técnicos y está ayudando a desarrollar instrumentos de modelización que se puedan utilizar para prever el comportamiento del plasma de fusión en el ITER y en los futuros reactores de fusión.

Encontrar el “punto justo”

Uno de los mayores desafíos es encontrar unas condiciones de funcionamiento óptimas con un nivel máximo de energía de fusión y de control del plasma, que permitan un alto rendimiento sin infringir los límites operacionales durante períodos prolongados. Quebrantarlos resulta problemático, pues podría dar pie a inestabilidades que acabarían con el plasma debido a un fenómeno conocido como disrupción del plasma.

“En un reactor del tipo tokamak y de forma toroidal, como el ITER, una disrupción podría acabar rápidamente con el plasma en escasos milisegundos y generar una importante tensión térmica y mecánica en los componentes del reactor — dice Michael Lehnen, Coordinador Científico de la Sección de Estabilidad y Control de la Organización ITER—. El OIEA está ayudando a evitar este escenario fomentando el intercambio de información relativa a las labores experimentales, teóricas y de modelización en esta esfera, y en los próximos años se centrará particularmente en crear una base sólida para el diseño del sistema del ITER para la mitigación de las disrupciones”.

Los experimentos recientes y las labores de modelización que incorporan métodos basados en la inteligencia artificial están arrojando luz sobre los requisitos para un control eficaz del plasma, lo cual contribuye a allanar el camino para que las futuras centrales de fusión tengan un diseño y un funcionamiento seguros. “La poderosa estadística avanzada y los enfoques de aprendizaje automático aplicados a la investigación sobre disrupción pueden ayudar a detectar patrones significativos y revelar información oculta en los datos experimentales acumulados durante años”, señala Cristina Rea, Investigadora del Centro de Fusión y Ciencia del Plasma del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT).

Está surgiendo una sinergia productiva entre físicos especializados en control, expertos en modelización y en desarrollo de escenarios e ingenieros de datos, en la que se están diseñando nuevas soluciones para eludir esas barreras disruptivas. Según la Sra. Rea, se ha de seguir trabajando para evaluar la aplicabilidad de esas metodologías basadas en datos respecto de proyectos como el ITER, pero por ahora los resultados son alentadores.

Visualización de partículas de alta energía, en forma de plasma, circulando a través de un reactor del tipo tokamak.

(Fotografía: Shutterstock)

Llenar el vacío en materia de tecnología y materiales de fusión

Matteo Barbarino

La fusión es probablemente la labor de ciencia e ingeniería más compleja de la Tierra. Construir un reactor de fusión, lograr una reacción en cadena automantenida y transformar esa energía en electricidad casi inagotable son acciones que cambiarán para siempre a la humanidad y nuestra relación con la energía. Por muy atractivo que parezca, los avances no han sido fáciles ni homogéneos. Los desafíos técnicos relacionados con las estructuras, los combustibles y los materiales necesarios para mantener unidas esas máquinas tan complejas solo se han resuelto de forma parcial.

Para comprender las limitaciones técnicas y las lagunas de conocimiento que enfrenta hoy en día la fusión hay que comenzar por examinar el interior del propio reactor.

Dentro de un reactor tokamak (véase el artículo de la página 6) un gas ionizado a temperatura elevadísima, llamado plasma, se calienta a más de 100 millones de grados Celsius (°C) para inducir reacciones de fusión. Encerradas entre poderosos campos magnéticos, las paredes del reactor están protegidas del plasma volátil.

El plasma utilizado en la fusión nuclear suele estar compuesto de dos isótopos pesados del hidrógeno: el deuterio y el tritio, que luego se fusionan para producir helio y neutrones. En las centrales de fusión los ingenieros esperan poder “reproducir” o crear más tritio a partir de la propia reacción con un blindaje de manto de litio aún no probado que reacciona con los neutrones resultantes de la fusión.

“La energía de los neutrones generados por la fusión plantea grandes problemas a la primera pared y la cámara de vacío de la central de fusión, lo que significa que deben tenerse

en cuenta los daños por la radiación, el blindaje biológico, la manipulación a distancia y la seguridad”, explica Ian Chapman, Presidente de la Autoridad de Energía Atómica del Reino Unido.

La principal tarea de los ingenieros es desarrollar materiales de alto rendimiento capaces de soportar altas temperaturas y los intensos flujos neutrónicos derivados de la reacción. Para el futuro de las centrales de fusión a gran escala también es fundamental comprender el impacto de las condiciones de funcionamiento sobre los componentes expuestos al plasma.

Materiales fabricados para condiciones extremas

Una prioridad para los investigadores es crear materiales estructurales y resistentes al plasma capaces de soportar la degradación producida por los neutrones. Esos materiales deben tener características de seguridad, como baja radiactividad inducida por los neutrones, para reducir al mínimo la producción de desechos radiactivos. Hoy en día, sin embargo, no hay instalaciones de irradiación de materiales de fusión especializadas en las que se puedan poner a prueba mecanismos de degradación de la radiación y sea posible desarrollar y probar materiales en las condiciones necesarias.

El OIEA contribuye a abordar cuestiones asociadas al desarrollo de materiales de fusión y la investigación en la materia, coordinando la elaboración de directrices para las técnicas de ensayo de los materiales de referencia y llenando los vacíos de conocimiento en materia de diseño de instalaciones para el ensayo de materiales y componentes del reactor de fusión.



“Tecnologías como la instalación de doble haz de iones construida en 2019 en el Instituto Ruđer Bošković de Croacia con el apoyo del OIEA pueden estimular las condiciones a las que estaría expuesto un material en un reactor termonuclear. Entre ellas la transmutación de un producto y la simulación del daño producido por neutrones y partículas energéticas generados por la fusión”, señala Melissa Denecke, Directora de la División de Ciencias Físicas y Químicas del OIEA.

La parte principal de un reactor en la que el plasma entra en contacto directo con la vasija del reactor se conoce con el nombre de “diversor”, y los científicos y los ingenieros están procurando encontrar la configuración óptima para que ese dispositivo maneje mejor los flujos de calor que recibe. También están elaborando y verificando un marco de criterios para el diseño de reactores para todos los componentes internos de la vasija, incluido el diversor, para lo cual se sirven de los conocimientos y los datos recopilados de diversos experimentos de irradiación e instrumentos de simulación.

Un escape a altísimas temperaturas

El diversor, que en la mayoría de los diseños se sitúa en la parte inferior de un reactor donde se desvían las impurezas como la “ceniza” de helio, actúa como “caño de escape” del reactor termonuclear y es el lugar hacia el cual se encausa todo el calor excesivo. Esta configuración ayuda a producir plasmas “más puros” con un mejor confinamiento de energía —parámetro crítico para el rendimiento de un dispositivo de fusión—, lo que garantiza que el plasma se encuentre a una temperatura lo suficientemente elevada durante un lapso suficientemente largo para que puedan producirse reacciones de fusión mantenidas.

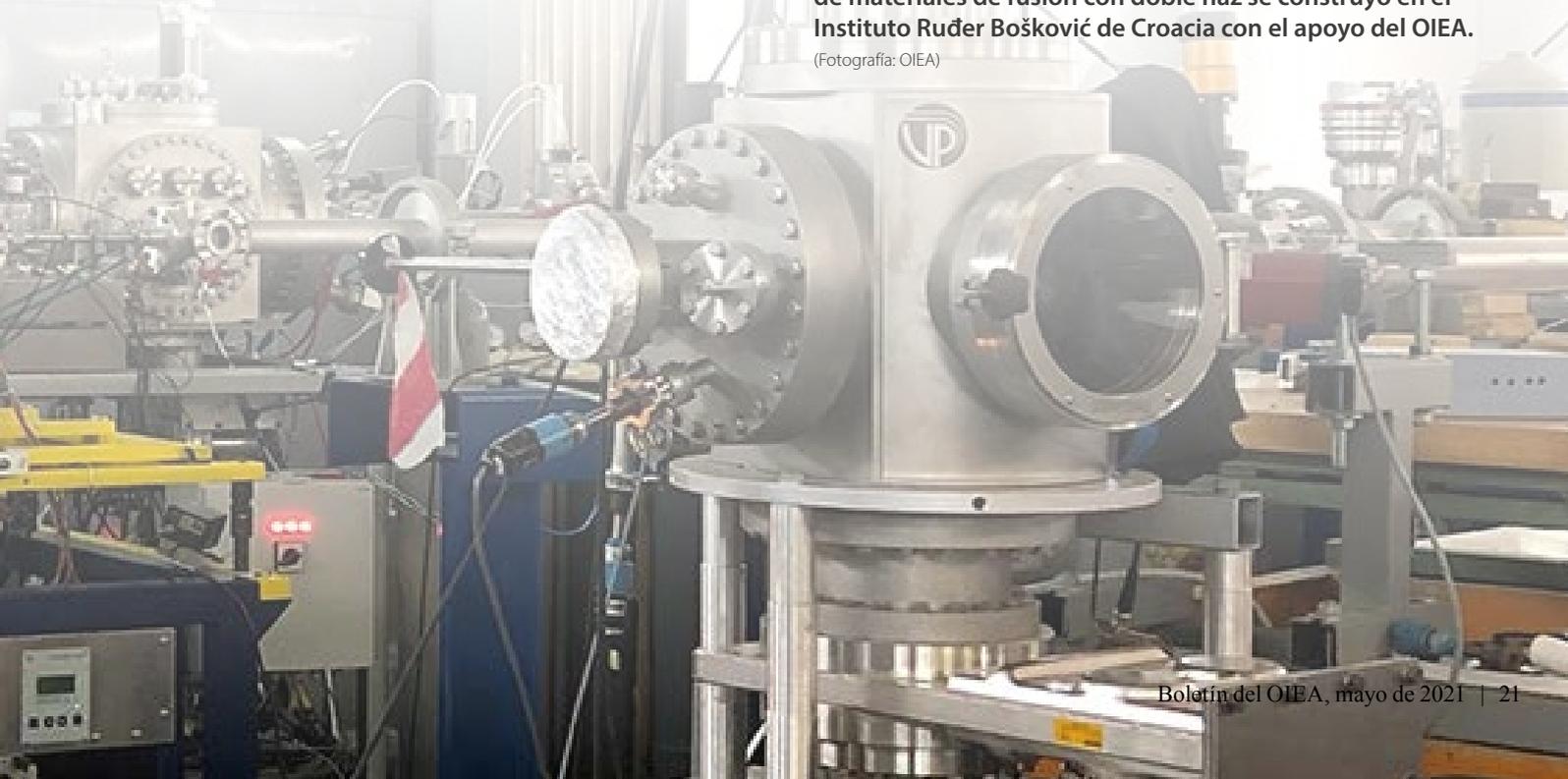
En el ITER, el experimento de fusión más grande del mundo, el diversor estará compuesto de hasta 54 módulos de 10 toneladas cada uno. Las condiciones impuestas a los módulos serán muy exigentes; al soportar flujos de calor constantes de entre 10 y 20 megavatios por metro cuadrado, con partes expuestas a temperaturas de entre 1000 °C y 2000 °C, los módulos tendrán que reemplazarse mediante un proceso de manipulación a distancia al menos una vez durante la vida útil del dispositivo. Para hacer frente al calor extremo y las partículas dañinas, los componentes expuestos al plasma estarán blindados con tungsteno, un material que tiene una baja absorción de tritio y la temperatura de fusión más elevada de todos los elementos naturales.

“Si bien el diseño del diversor del ITER refleja lo más avanzado de nuestros actuales conocimientos y capacidades desde un punto de vista físico y tecnológico, las futuras centrales de fusión necesitarán otros avances. Saber cuáles son esos avances es una de las múltiples misiones importantes del proyecto ITER”, dice Richar Pitts, Líder de la Sección de Experimentos y Operación del Plasma de la Organización ITER.

El diseño y la construcción de futuros reactores de fusión dependerán de los resultados técnicos, tecnológicos y materiales del ITER y de otras actividades de investigación y desarrollo bien establecidas coordinadas por múltiples países, pero la distancia entre nosotros y un futuro impulsado por la fusión sigue acortándose día a día.

La instalación de fuente de iones de helio y de irradiación de materiales de fusión con doble haz se construyó en el Instituto Ruđer Bošković de Croacia con el apoyo del OIEA.

(Fotografía: OIEA)



Países unidos mediante la investigación y la cooperación en el ámbito de la fusión

Elodie Broussard

“Apunta a la Luna. Incluso si fallas, aterrizarás entre las estrellas”, dijo una vez el autor Norman Vincent Peale. En lo que respecta a la fusión nuclear, los científicos están apuntando a las estrellas, pues tratan de descubrir si es posible generar en la Tierra electricidad de fusión a escala industrial.

En todo el mundo, expertos de unos 50 países están participando en actividades de investigación sobre la física del plasma y el desarrollo tecnológico de la fusión nuclear. Muchos de estos países están trabajando para intensificar sus programas de investigación en fusión nuclear en un contexto en el que la demanda de energía aumenta rápidamente y el cambio climático acelera su ritmo debido a la quema de combustibles fósiles.

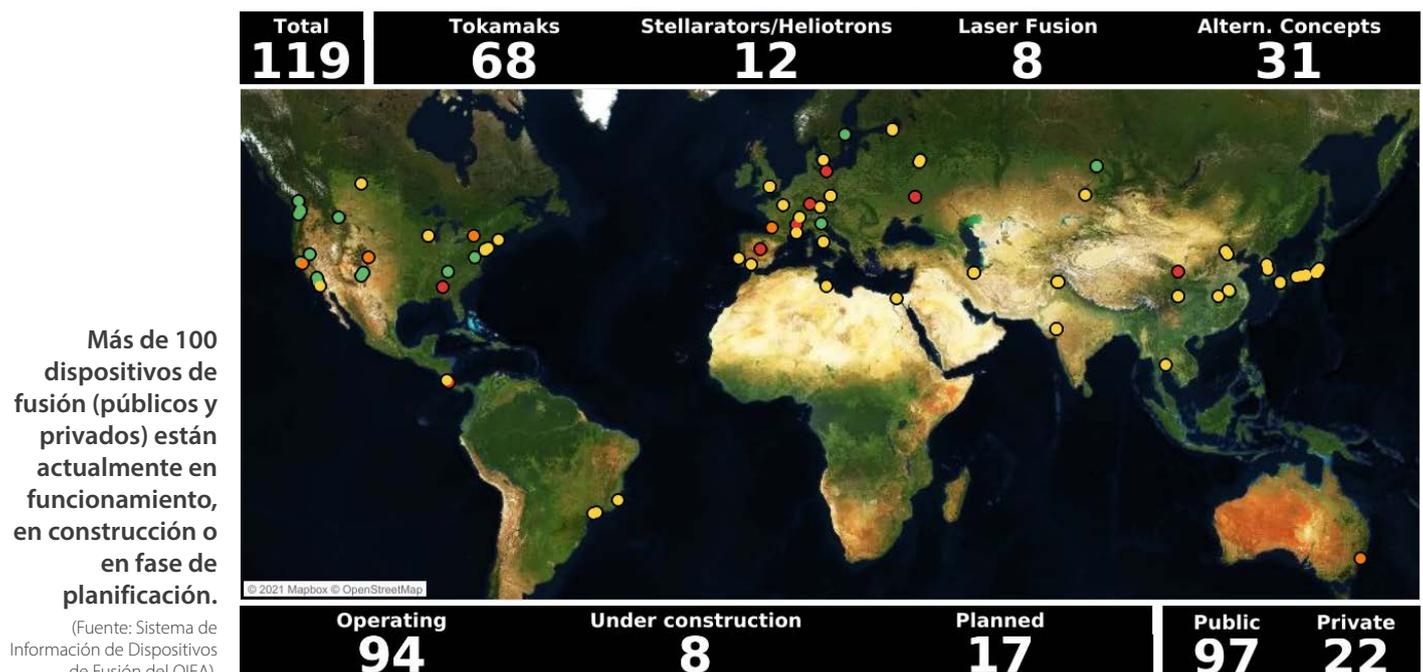
Para facilitar las iniciativas existentes a escala internacional, el OIEA ofrece a sus Estados Miembros una serie de actividades de investigación y creación de capacidad —a veces a nivel regional— que ayudan a reducir las diferencias entre los países en cuanto a conocimientos y experiencia en materia de fusión.

En los últimos 50 años el OIEA ha apoyado la investigación y el desarrollo en el ámbito de la fusión a escala mundial organizando una serie de foros relacionados con la fusión, entre ellos, la Conferencia Internacional del OIEA sobre Energía de Fusión, de carácter bienal. Además, organiza una serie de talleres sobre conceptos de centrales de demostración de la fusión, una serie de reuniones técnicas sobre cuestiones

relacionadas con la ciencia y la tecnología de fusión, y actividades coordinadas de investigación en las que reúne a instituciones y científicos para tratar cuestiones fundamentales de interés común.

A través de sus publicaciones sobre fusión, como la revista Nuclear Fusion y otras colecciones, el OIEA difunde conocimientos e información y contribuye a la labor de divulgación de conocimientos avanzados en la comunidad científica. Además de mantener un portal sobre fusión y una base de datos de dispositivos de fusión, el OIEA ha establecido bibliotecas de datos numéricos con datos moleculares y nucleares fundamentales que son indispensables para la investigación y el desarrollo tecnológico de la fusión. En colaboración con múltiples asociados, el OIEA también organiza y apoya actividades de enseñanza y capacitación en materia de fusión, entre ellas cursos y talleres a nivel internacional y regional.

Costa Rica, que acaba de incorporarse a la escena mundial de la fusión, recibe apoyo del OIEA para ponerse al día con respecto a otros países mediante actividades de desarrollo técnico y creación de capacidad. En 2019 el Tecnológico de Costa Rica organizó un taller con el apoyo del OIEA que ofreció a los participantes de países latinoamericanos la oportunidad de colaborar en experimentos conjuntos y recibir capacitación para el manejo de los dos pequeños dispositivos de fusión que se encuentran en el instituto.





Donado a Tailandia en 2018, el tokamak HT-6M es un pilar fundamental de la hoja de ruta del país en materia de fusión.

(Fotografía: ASIPP, China)

Fortalecimiento de los vínculos entre los líderes en el ámbito de la fusión y los países contribuyentes

Seis países y la Unión Europea colaboran, a través de la Euratom, en el experimento de fusión más grande del mundo, el ITER, un reactor experimental de fusión que se está construyendo en Francia (véase el artículo de la página 10).

“Con respecto a los países que no participan en el proyecto ITER, el OIEA tiene una importante función de enlace, ya que difunde los conocimientos del ITER a la comunidad más amplia y viceversa. Lo hace a través de reuniones técnicas, talleres, cursos y materiales de aprendizaje electrónico, en los que colaboran expertos del ITER”, dice Danas Ridikas, Jefe de la Sección de Física del OIEA.

Inspiración para una nueva generación en Asia Sudoriental

Desde 2014 el Curso de la Asociación de Naciones de Asia Sudoriental (ASEAN) sobre Plasma y Fusión Nuclear ha sido una de las actividades clave para poner en marcha un programa de fusión en Tailandia y lograr avances en la investigación sobre fusión en la región. En enero de 2020, el OIEA y el ITER prestaron apoyo al curso en el fomento de la interacción entre jóvenes con talento e investigadores internacionales de renombre. “El OIEA envió a expertos que compartieron sus conocimientos y experiencias y sirvieron de gran inspiración para la generación joven”, dice Kanchalika Dechates, Jefa de Cooperación Internacional en el Instituto de Tecnología Nuclear de Tailandia. Más de 80 investigadores jóvenes de la región participaron en el curso.

Con el objetivo de fortalecer la capacitación y la colaboración entre los grupos de investigación de países desarrollados y en desarrollo, el OIEA dirige desde 2004 un proyecto coordinado de investigación sobre dispositivos de fusión de pequeño y mediano tamaño en el que participan investigadores de 19 países. “Este proyecto ofrece a los investigadores tailandeses la oportunidad de reunirse y colaborar con una multitud de expertos de todo el mundo”, explica Boonyarit Chatthong, Profesor Adjunto en la Universidad Prince of Songkla (Tailandia).

Gracias a esta antigua alianza es posible realizar experimentos conjuntos y comparativos, capacitar al personal de distintas instituciones y países, y formar en teorías y técnicas de vanguardia a una nueva generación de científicos especializados en fusión. “En el futuro próximo Tailandia tendrá su primer dispositivo de fusión, por lo que este proyecto nos permitirá empezar nuestro propio programa de fusión”, dice el Sr. Chatthong.

La construcción de un tokamak experimental (véase el artículo de la página 6) en Tailandia constituye la actividad central del programa nacional de desarrollo de la fusión. Será el primer dispositivo de fusión que utilizará la ASEAN y una plataforma de aprendizaje fundamental para los investigadores tailandeses y de la ASEAN.

En 2018 el OIEA otorgó subvenciones a científicos e ingenieros tailandeses para que asistieran a la Conferencia del OIEA sobre Energía de Fusión, celebrada en la India. Ese año, un investigador tailandés también se incorporó a la Escuela Conjunta CIFT-OIEA sobre Física del Plasma en Italia, que reunió unos 70 estudiantes avanzados de doctorado, investigadores posdoctorales y otros investigadores jóvenes de 23 países, promoviendo así la colaboración internacional.

Fusión: lista cuando la sociedad la necesite

Michael Amdi Madsen

Los científicos han estado pregonando los posibles beneficios de la energía de fusión desde la década de 1920, pero hasta hace bien poco la fusión comercial seguía siendo un sueño lejano. Para entender mejor por qué, tras decenios de investigación, la fusión sigue sin ser parte de la canasta energía mundial, y por qué eso va a cambiar, hablamos con Melanie Windridge, Directora en el Reino Unido de Fusion Industry Association, Consultora de Comunicaciones en Tokamak Energy y fundadora de Fusion Energy Insights.

P: Hay un viejo chiste que dice que “la fusión nuclear es la tecnología que siempre está a tan solo 30 años”, ¿es eso cierto?

R: Es verdad que es un chiste clásico sobre la fusión, pero es un poco triste porque, en realidad, sí que se está avanzando. Actualmente están confluyendo ciertos factores que permiten avanzar en la fusión. En primer lugar, la ciencia ha madurado; actualmente entendemos bien la física del plasma y gracias a conceptos como los tokamaks se han podido generar reacciones de fusión. A eso hay que sumar las nuevas tecnologías, como la computación de alto rendimiento, que permiten mejorar las simulaciones y la modelización del plasma; la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, con los que se pueden optimizar y controlar las operaciones; y los superconductores de alta temperatura, que pueden producir campos magnéticos mucho más fuertes para confinar mejor los combustibles de fusión. Los láseres de hoy día, mucho más potentes y eficientes, podrían impulsar la fusión por confinamiento inercial y los avances en la fabricación podrían ayudar a reducir los costos de los experimentos y de las futuras centrales eléctricas.

Un dato que ha de tenerse en cuenta es que ahora el público está más interesado en las soluciones climáticas y los gobiernos están fijando metas de emisiones cero. También está el sector privado en el ámbito de la fusión, que hasta el momento ha atraído inversiones por un valor de unos 2000 millones de dólares de los Estados Unidos. La Fusion Industry Association ya cuenta con unos 25 miembros, e incluso las empresas de petróleo y gas están empezando a interesarse por la fusión.

P: Para hacer frente al cambio climático, muchos países están apostando por la descarbonización a gran escala para 2030 y la neutralidad en carbono para 2050. ¿Llegará la fusión demasiado tarde para contribuir al cambio?

R: El físico ruso Lev Artsimovich dijo una vez: “La fusión estará lista cuando la sociedad la necesite.” Pienso que así es. Lo ideal sería haber resuelto la fusión hace 30 años y que hoy estuviera lista para su despliegue. Sin embargo, en el pasado no se daban las condiciones adecuadas para la fusión y no existía el tipo de motivación necesaria ni las posibilidades para lograrla.



“Aunque la fusión no esté disponible a tiempo para contribuir a los objetivos fijados para 2050, será necesaria en la segunda mitad del siglo cuando la demanda de energía sea aún mayor.”

Melanie Windridge, Directora en el Reino Unido, Fusion Industry Association

P: En su opinión, ¿qué obstáculos podrían impedir el avance de la tecnología y cómo podrían sortearse?

R: Tenemos que superar una serie de dificultades que se presentan en diferentes etapas. La primera de ellas es conseguir que una reacción de fusión produzca más energía de la que consume. A este hito le llamamos punto de equilibrio. Una vez superado el punto de equilibrio, hay que construir una central piloto que pueda generar electricidad. Cuando lo consigamos, podremos planificar el despliegue comercial.

Entre el punto de equilibrio y la primera generación de electricidad hay barreras técnicas, por ejemplo, cómo extraer la energía y producir más combustible de tritio. El entorno de fusión también plantea dificultades en cuanto a los materiales; necesita calor y frío extremos si

se utilizan imanes superconductores, así como campos magnéticos fuertes. Aun así, el mayor problema lo plantean los neutrones de alta energía, ya que pueden ocasionar muchos daños a los materiales. Por esa razón es muy probable que cada cierto tiempo tengamos que sustituir determinados componentes de las centrales eléctricas, así que necesitamos diseñar una máquina en la que esto se pueda hacer de forma rápida, fácil y económica.

Además de la física y la ingeniería, la comunidad de expertos en fusión también tiene que hablar con los gobiernos sobre la reglamentación para que, cuando ya estemos listos para construir, no haya trabas en el proceso de concesión de licencias. Por último, también está el factor de la aceptación pública y la necesidad de que la población también dé su visto bueno al desarrollo de la fusión. Tenemos que reflexionar acerca de todas estas cuestiones y empezar a hablar ya sobre ellas. De hecho, ya lo estamos haciendo.

P: Actualmente casi 800 millones de personas viven sin acceso fiable a la electricidad. ¿Es la fusión nuclear una solución para ellas y qué está haciendo el sector para hacer partícipes a los países en desarrollo?

R: Cuando en 1985 Reagan y Gorbachov hablaron por primera vez del proyecto internacional de fusión, ITER, en su famosa reunión celebrada en Ginebra al calor de la chimenea, dijeron que querían que la fusión estuviera al servicio de toda la humanidad, y ese sigue siendo el objetivo. El ITER está planificando un programa educativo abierto a todos los países, que tiene por objeto crear la fuerza de trabajo futura en el ámbito de la fusión. Esto es importante si queremos expandir la fusión en todo el planeta.

Apenas comienza a establecerse la colaboración público-privada, que ayudará a reducir los costos y compartir los riesgos. Esta cooperación será especialmente importante en los países en desarrollo y probablemente necesitará asistencia intergubernamental.

P: La física y la energía nuclear son ámbitos tradicionalmente dominados por hombres. ¿Qué se está haciendo en el sector de la fusión para lograr una industria con más equilibrio de género?

R: Hace ya mucho tiempo que la gente es consciente del desequilibrio de género presente en los ámbitos de la física y la fusión, y ha habido iniciativas para cambiarlo, pero va a ser un proceso lento que implicará a varias generaciones.



Tokamak ST40, construido y explotado por la empresa privada Tokamak Energy.

(Fotografía: Tokamak Energy)

Llevo casi 20 años participando en iniciativas que intentan cambiar las percepciones basadas en el género. En algunos de los laboratorios más importantes se están tomando medidas activas para resolver la cuestión de género mediante programas centrados en mejorar la diversidad y crear redes para aumentar la inclusión. En las empresas privadas, que suelen ser muy pequeñas, resulta más difícil.

Pero no se trata solo de lo que los laboratorios pueden hacer, sino también de lo que nosotros podemos hacer a nivel individual. Hace poco creé @womeninfusion en Instagram para dar a conocer a las mujeres que trabajan en este ámbito y ayudar a motivar a la siguiente generación de mujeres jóvenes a que se dediquen a la física.

Apuestas arriesgadas y apuestas seguras

Por qué la fusión necesita empresas y empresas emergentes

Simon Woodruff



Simon Woodruff es fundador y presidente de Woodruff Scientific, una empresa estadounidense que, por encargo de instituciones públicas y privadas, lleva a cabo actividades de investigación y desarrollo en el ámbito de la tecnología de fusión para acelerar el desarrollo de una energía de fusión económica. Activa en la comunidad de expertos en fusión, la empresa acoge

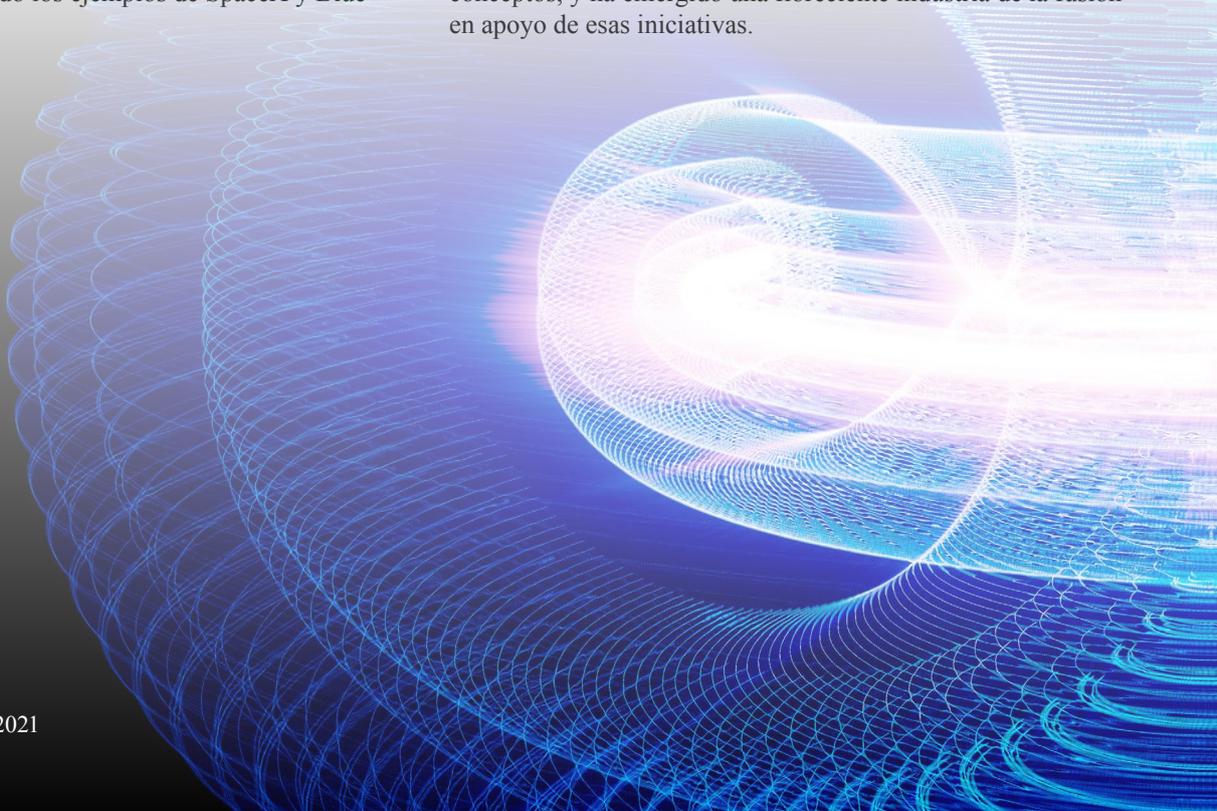
un campamento anual de computación científica para estudiantes universitarios, ha organizado talleres nacionales sobre ciencias de la energía de fusión y participa actualmente en dos iniciativas del OIEA sobre fuentes compactas de neutrones por fusión y desarrollo privado de la fusión.

La premisa básica del desarrollo de la fusión por el sector privado es que existen muchas vías para la comercialización, y que los emprendedores pueden complementar los programas gubernamentales. A modo de ejemplo, basta con echar un vistazo a lo que ha sucedido en la industria de los lanzamientos espaciales. Una combinación de ingeniosos programas administrados por el Gobierno de los Estados Unidos y basados en alianzas público-privadas ha permitido realizar ahorros de manera generalizada en este sector, como han demostrado los ejemplos de SpaceX y Blue Origin, entre otros.

Los partidarios de la fusión del ámbito privado piensan de manera similar y se preguntan: ¿Cómo podemos abaratar las cosas? ¿De qué manera podemos utilizar las innovaciones más recientes en el terreno de los materiales, la tecnología y la inteligencia artificial para lograr viabilidad? ¿Cómo podemos reducir los costos totales de capital y el costo de la electricidad de manera que los sistemas de fusión puedan competir con el gas natural de ciclo combinado?

Desde mi investigación posdoctoral en el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore en 1999, vengo siguiendo muy de cerca la historia de las empresas privadas dedicadas a la fusión. El Departamento de Energía de los Estados Unidos tenía en marcha un pequeño programa llamado Innovative Confinement Concepts (ICC), en el que se buscaban conceptos más sencillos y de más fácil construcción para la fusión nuclear. Ayudé a organizar la serie de talleres de dicho programa, y sus actividades se solapaban y complementaban con los conceptos de fusión que se estaban desarrollando en el ámbito privado. Cerca de Livermore, TAE Technologies (entonces llamada Tri-Alpha Energy) daba sus primeros pasos; en Vancouver (Canadá), General Fusion iniciaba su andadura, y, en el Reino Unido, se había fundado Tokamak Energy, por entonces conocida como Tokamak Solutions.

Me marché de Lawrence Livermore en 2004 para seguir el ejemplo de esas empresas y ver si podíamos de verdad agilizar la incorporación de sistemas de energía de fusión en el espacio de mercado comercial. En los 22 años que han transcurrido desde entonces, estas “apuestas arriesgadas” relacionadas con la fusión han recaudado en conjunto más de 1500 millones de dólares de los Estados Unidos para seguir desarrollando sus conceptos, y ha emergido una floreciente industria de la fusión en apoyo de esas iniciativas.



Las empresas privadas del ámbito de la fusión son optimistas; a menudo, demasiado optimistas. Esa combinación de espíritu emprendedor y tecnología avanzada les ha hecho ganar un estatus prácticamente de culto entre los directores de tecnología y los directores generales de otras industrias. Pero hay que decir que existe una esperanza generalizada. Muchos partidarios de la fusión del sector privado comenzaron en programas gubernamentales con unos horizontes de desarrollo de al menos 20 años, y hoy debaten acerca de la neutralidad de caja y la puesta en marcha, con muy pocos recursos o sin ellos, de iniciativas en un ecosistema en el que conviven empresas emergentes de muy distinto tipo. Estos emprendedores cuentan en parte con el apoyo de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados-Energía para cerrar la brecha entre el trabajo convencional de laboratorio y la industria, mediante una serie de pequeños programas como ALPHA, BETA, GOMOW y OPEN, y los que imagino que estarán por venir.

El programa “Tech to Market” (T2M) también resulta pertinente ahora para la fusión. El tema de las “salidas” suele estar sobre la mesa: ¿Qué sucede con esa empresa emergente? ¿Ha sido comprada? ¿Sale al mercado? ¿Vende propiedad intelectual? ¿Podemos hacerlo antes de que venza la vida útil del fondo de inversiones?

Desde que dejé Lawrence Livermore, he tenido el privilegio de hacer carrera trabajando con compañías privadas dedicadas a la fusión, desde una empresa emergente de sonofusión en Grass Valley, en California, hasta una empresa derivada del MIT que recaudó la sorprendente cifra de 200 millones de dólares de los Estados Unidos gracias a una inversión de Serie A. Es evidente que existe un interés renovado por la neutralidad en carbono y la neutralidad de caja. Cada

emprendedor y cada empresa tienen un enfoque técnico diferente (ahora bien, por lo general es mejor a menor escala) y una idea ligeramente distinta sobre su plan de comercialización: algunos son partidarios de este enfoque basado en apuestas arriesgadas, donde todos los esfuerzos se concentran en ser los primeros en llevar al mercado algo capaz de generar energía. Pero esas apuestas arriesgadas (tal vez 20 en todo el mundo) solo constituyen una fracción diminuta de ese ecosistema de pequeñas empresas que ofrece productos y servicios en apoyo de la fusión.

En los Estados Unidos de América existe un programa de becas denominado Small Business Innovation Research que presta apoyo a cientos de empresas dedicadas a aspectos relacionados con la fusión: ya sea la fabricación de ignitrones o capacitores, la realización de simulaciones, el desarrollo de nuevos materiales para la fabricación aditiva o el examen de técnicas de diagnóstico novedosas. Las pequeñas empresas tienen menos gastos generales que los grandes laboratorios. Son ágiles y pueden virar el rumbo: un año pueden ofrecer una línea de productos y al siguiente idear un conjunto de soluciones distintas. Asimismo, son innovadoras: tienen en cuenta los problemas más importantes y encuentran soluciones, y se centran en aquello que, en última instancia, podría propiciar la llegada de la energía de fusión al mercado.

En definitiva, el *presente* de la fusión lo integran empresas emergentes y pequeñas empresas dedicadas a dicha esfera. ¡Y estas últimas tienen ante sí un *futuro* prometedor!

Representación del flujo de partículas de alta energía a través de un reactor tokamak.

(Imagen: Shutterstock)



Agua apta para el consumo: la unidad de tratamiento del agua respaldada por el OIEA potabilizará las aguas de acuíferos en Jordania



La unidad de tratamiento del agua, concluida en diciembre de 2020, facilita el uso de acuíferos de aguas subterráneas más antiguos rodeados de arenisca.

(Fotografía: A. Al-Sayaheen/Autoridad del Agua de Jordania)

En Jordania, donde la escasez de agua es motivo de creciente preocupación, una nueva unidad de tratamiento de las aguas subterráneas, desarrollada con el apoyo del OIEA, empezará pronto a abastecer agua potable de gran calidad a miles de hogares en la gobernación de Áqaba, en la punta meridional del país. Este sistema experimental de tratamiento, el primero de su clase en Jordania, elimina los radionucleidos naturales de las aguas subterráneas, lo que permite a la Autoridad del Agua de Jordania (WAJ) sacar el máximo partido a acuíferos que antes no se utilizaban y aliviar la tensión a la que están sometidas las fuentes de agua existentes.

Dado su clima semiárido — caracterizado por bajas tasas de precipitación— y como resultado de su creciente población, Jordania es uno de los diez países del mundo con menor disponibilidad de agua dulce por persona. Se prevé que esta situación empeore y, según la Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud para el Mediterráneo Oriental (EMRO), el país quedará sumido en un estado de “pobreza hídrica extrema” de aquí a 2025 a menos que se adopten medidas eficaces.

Una de esas medidas es la explotación de recursos de aguas subterráneas más profundas y antiguas, como el acuífero de Ram, que está rodeado de arenisca y contiene enormes cantidades de agua dulce de gran calidad con escasa probabilidad de presentar contaminación antropogénica. Sin embargo, la arenisca suele contener elevadas concentraciones de radionucleidos naturales, sobre todo radio, que puede resultar peligroso para quienes consuman esa agua.

Con el apoyo del programa de cooperación técnica del OIEA, los especialistas en análisis de isótopos y tecnología de los desechos han ayudado a los expertos de Jordania a medir y vigilar la concentración de radio en las muestras de aguas subterráneas tomadas del acuífero de Ram, así como a estudiar diversas opciones para el tratamiento del agua.

Los resultados del análisis del agua propiciaron la construcción e instalación de una unidad de tratamiento del agua, próxima a un pozo. Esta unidad filtra el agua agregándole óxido de manganeso acuoso y canalizándola, posteriormente, a través de una serie de filtros cerámicos, de manera que

las concentraciones de radionucleidos se reducen hasta unos niveles que se ajustan a las normas jordanas.

En febrero de 2020, una vez llegados los primeros componentes básicos, como bombas y dispositivos de calibración, se inició el montaje del equipo para el tratamiento del agua, y al mes siguiente comenzaron las obras civiles y la construcción. Para diciembre de 2020, la unidad de tratamiento estaba terminada y lista para ser utilizada por Aqaba Water Company, la autoridad local encargada de la distribución del agua. Esta nueva unidad es capaz de tratar 40 metros cúbicos de agua por hora (12,5 litros por segundo), un suministro suficiente para unas 2000 personas.

“Tenemos previsto establecer más unidades para tratar los recursos hídricos en la ciudad de Áqaba, así como en otros nuevos pozos de aguas subterráneas en la región meridional de la gobernación de Ammán, en una zona llamada Khan Alzabib”, dice Amal Al-Sayaheen, Directora de Investigación y Servicios Técnicos de la Autoridad del Agua de Jordania.

Todos los materiales de la corteza terrestre contienen radionucleidos naturales, repartidos por las rocas y suelos, normalmente con bajas concentraciones de la actividad. Estos pueden, sin embargo, lixiviarse hasta las aguas subterráneas y, en consecuencia, hasta el agua potable proveniente de ellas y de los manantiales. “La presencia de radionucleidos podría exigir un análisis minucioso para comprender los riesgos radiológicos asociados al consumo de estas aguas”, declara Horst Monken-Fernandes, Especialista en Rehabilitación Ambiental del OIEA que está prestando asistencia a Jordania en este proyecto.

La presencia de radiactividad en el agua potable plantea un problema en numerosos países del mundo. El OIEA organizó recientemente un taller en el marco de la Conferencia Internacional sobre la Gestión de Materiales Radiactivos Naturales (NORM) en la Industria, titulado

Aguas Subterráneas 360 °, en el que se examinaron diversos aspectos relacionados con la presencia de radionucleidos naturales en las aguas subterráneas.

BASE CIENTÍFICA

La calidad de las aguas subterráneas provenientes de las cuencas de arenisca del Oriente Medio es, por lo general, elevada. Ahora bien, dada su composición, dicha arenisca suele contener radionucleidos naturales con

grandes concentraciones de actividad. En el caso de Jordania, los niveles de radio de origen natural en esas cuencas, y las propiedades carcinógenas de dichos radionucleidos, podrían mermar la calidad de las aguas subterráneas del país.

El radio puede, no obstante, eliminarse del agua utilizando un filtro compuesto de una membrana de carburo de silicio que actúa en apoyo de una capa de óxido de manganeso acuoso.

Cuando el agua atraviesa el filtro, el óxido de manganeso acuoso absorbe el radio. Transcurrido un determinado tiempo, el filtro cerámico se somete a un “lavado en contracorriente” y el óxido de manganeso acuoso, que contiene el radio absorbido, se elimina como desecho.

— Omar Yusuf

Las prácticas mejoradas de gestión del suelo y los nutrientes aumentan la producción de arroz en la República Democrática Popular Lao



Ensayo de demostración con arroz en un terreno de cultivo.

(Fotografía: M. Zaman/OIEA)

El arroz, que es el principal cultivo básico de la República Democrática Popular Lao, es fundamental para la seguridad alimentaria y el empleo. Más del 80 % de los agricultores del país producen arroz, que ocupa aproximadamente el 60 % de la superficie cultivada del país. Sin embargo, la topografía montañosa de Laos, su clima tropical con monzones frecuentes, la erosión del suelo, la falta de variedades de arroz adecuadas y el uso insuficiente de fertilizantes limitan la producción de arroz y amenazan los medios de subsistencia de esta sociedad agraria. Dado que el 72 % de la superficie del país en la que se cultiva arroz depende de las precipitaciones naturales, se prevé que la distribución de las precipitaciones, cada vez más

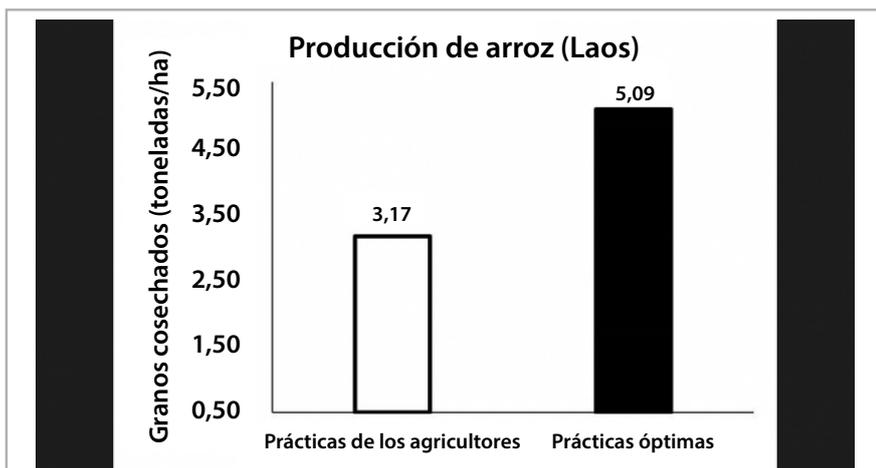
variable debido a los cambios en el clima, tendrá efectos devastadores en la producción de arroz.

El OIEA, en cooperación con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), ha ayudado a los agricultores de Laos a aumentar un 60 % la producción de arroz gracias a unas prácticas mejoradas de gestión del suelo y los nutrientes determinadas mediante técnicas nucleares (véase el recuadro “Base científica”). Según los resultados de ensayos realizados en campos de cultivo, la producción de arroz ha pasado de 3,16 a 5,1 toneladas por hectárea gracias a la utilización de fertilizantes químicos y estiércol de forma optimizada.

“Llevo tres años siguiendo estas prácticas —dice Somphet Siphandone, agricultor del distrito Sanakarm, en la provincia de Vientián, que participa en un proyecto piloto en el que se ponen en práctica estos hallazgos—. Mi cosecha ha aumentado un 60 % con respecto a nuestra práctica tradicional. En la capacitación se nos presentaron técnicas agrícolas eficientes y eficaces que han funcionado bien en nuestros campos. Gracias al programa, somos más resistentes a los cambios en el clima y nuestras cosechas han aumentado”.

El OIEA, a través de su programa de cooperación técnica, ha capacitado a investigadores en la utilización de nitrógeno 15, un isótopo estable del nitrógeno, para cuantificar la cantidad de nitrógeno que las plantas absorben de los fertilizantes y, posteriormente, determinar la cantidad exacta de fertilizante que los agricultores deberían utilizar en las distintas fases de la vida de un cultivo, así como la mejor forma de incorporar a estos fertilizantes paja de arroz localmente disponible y estiércol como fuentes de nutrientes.

Sobre la base de esos resultados, expertos del OIEA y la FAO ayudaron a especialistas locales a elaborar una serie de directrices para la producción de arroz dirigidas a los agricultores y los oficiales agrícolas que están trabajando con ellos. Estas directrices ofrecen las prácticas óptimas para la gestión del suelo y los nutrientes y se basan en los resultados obtenidos utilizando técnicas isotópicas.



El gráfico muestra un aumento en la producción de arroz gracias al uso de prácticas mejoradas de gestión del suelo y los nutrientes.

Con el objetivo de llegar a un mayor número de agricultores y difundir estas prácticas óptimas, el OIEA y los expertos del Instituto Nacional de Investigación sobre Agricultura y Silvicultura (NAFRI) elaboraron un folleto para los agricultores en el que se reproducía de forma sencilla en idioma laosiano información tomada de las directrices sobre el cultivo de arroz. Hasta la fecha, 57 agricultores de cuatro localidades en la provincia de Vientian han recibido capacitación en la fase experimental del programa.

“El folleto ofrece un conjunto completo de instrumentos tecnológicos en el que se enseña a los agricultores qué tienen que hacer exactamente, desde preparar el terreno para la siembra hasta aplicar el fertilizante, gestionar las malas hierbas y los insectos, y recolectar en el momento oportuno”, explica Mohammad Zaman, edafólogo y especialista en fitonutrición del Programa Conjunto FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura.

BASE CIENTÍFICA

Técnicas de isótopos estables

Los isótopos son átomos de un mismo elemento que tienen igual número de protones pero un número distinto de neutrones y, por lo tanto, un peso atómico distinto. Por ejemplo, el nitrógeno 15 tiene el mismo comportamiento químico que el nitrógeno 14 pero posee un neutrón más, por lo que es más pesado. Los científicos pueden utilizar fertilizantes marcados con este isótopo para comprender cómo el nitrógeno presente en el fertilizante transforma los sistemas suelo-planta-agua, y rastrear y determinar la eficacia con la que los cultivos absorben el fertilizante, así como cuánta cantidad queda en el suelo.

Los científicos también pueden emplear isótopos para rastrear el movimiento y el origen de diferentes emisiones en la agricultura: el nitrógeno 15 sirve para rastrear el óxido nítrico y el carbono 13, para rastrear el metano y el dióxido de carbono.

— Lu Han

Nueva tecnología de drones para la monitorización radiológica en situaciones de emergencia

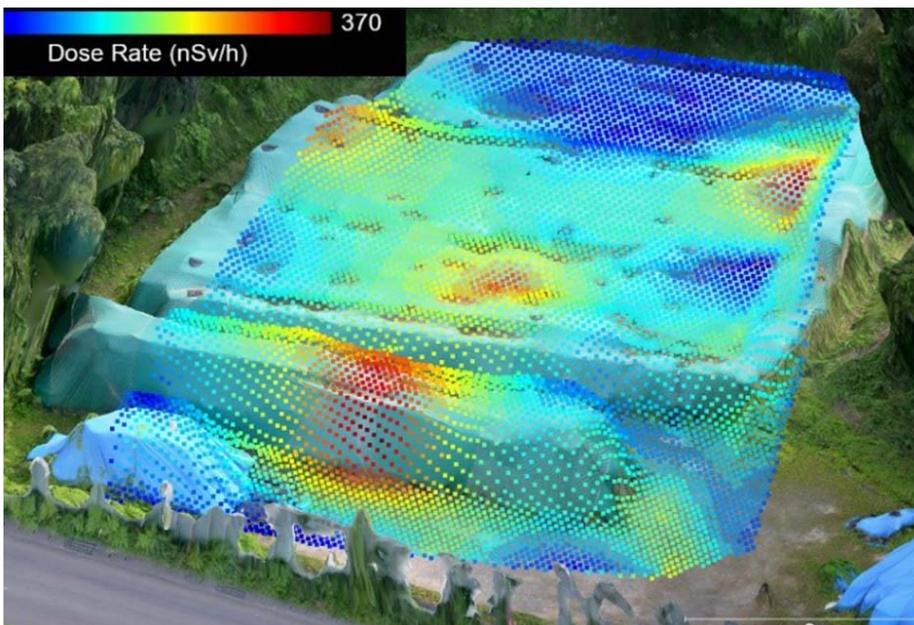


Una nueva tecnología que utiliza drones, desarrollada por el OIEA para su uso por las autoridades de la prefectura de Fukushima en el Japón, permite efectuar mediciones radiológicas en zonas contaminadas.

(Fotografía: prefectura de Fukushima)

Tras un accidente nuclear, como el ocurrido en la central nuclear de Fukushima Daiichi en 2011, la zona con contaminación radiactiva que rodea a un reactor puede ser demasiado peligrosa para que las personas ingresen a monitorizar la radiación. Esta tarea será más fácil gracias a una nueva tecnología que utiliza drones, desarrollada por el OIEA para su uso por las autoridades de la prefectura de Fukushima (Japón).

La metodología e instrumentación desarrolladas por el OIEA para aeronaves no tripuladas equipadas con detectores de radiación, cámaras y dispositivos GPS se ha puesto a prueba y validado en condiciones reales en la prefectura de Fukushima y actualmente está disponible para su aplicación práctica en situaciones ordinarias y de emergencia. Sobre la base de esa experiencia, el OIEA está preparado para ayudar a los Estados



Fotogrametría aérea completa en 3D superpuesta a un mapa radiológico obtenida utilizando una única aeronave no tripulada en dos vuelos consecutivos.

(Imagen: OIEA y prefectura de Fukushima)

Miembros interesados en el desarrollo y la utilización de esta tecnología a fin de elaborar mapas radiológicos después de una emergencia nuclear o radiológica.

Esta tecnología presenta ventajas importantes, como el bajo costo de los drones y la posibilidad de evitar que las personas se expongan a la radiación.

El OIEA y la prefectura de Fukushima comenzaron a trabajar juntos en el desarrollo y la utilización de aeronaves no tripuladas para la monitorización radiológica en 2012. En el marco del Plan de Acción del OIEA sobre Seguridad Nuclear, el Organismo ha prestado asistencia a la prefectura de Fukushima mediante dos proyectos consecutivos ejecutados de 2012 a 2020, por conducto de los cuales:

- Se proporcionó un sistema completo de instrumentación que utiliza aeronaves no tripuladas para medir la radiación, es decir, un sistema de detección de radiaciones con capacidades de procesamiento y almacenamiento de datos, desarrollado y construido en el Laboratorio de Ciencias e Instrumentación Nucleares (NSIL) del OIEA.
- Se elaboró una metodología de análisis e interpretación posterior a las mediciones y se impartieron capacitaciones tanto al personal de la prefectura de Fukushima como al del NSIL de Seibersdorf (Austria) sobre

cómo utilizar la aeronave no tripulada y su sistema de instrumentación y cómo utilizar el software para la obtención e interpretación de datos.

Recientemente se han producido grandes avances en la tecnología de las aeronaves no tripuladas y se prevén otros importantes en un futuro próximo, entre ellos, mayores cargas útiles, detectores y sensores integrados, navegación autónoma optimizada y la capacidad de que trabajen junto con otras aeronaves no tripuladas, así como con sistemas terrestres. En la actualidad, el OIEA está trabajando para integrar y poner a prueba instrumentación nueva y mejorada, incluida su adaptación para la siguiente generación de aeronaves no tripuladas.

“Estos novedosos avances aumentarán el tiempo de vuelo de la aeronave no tripulada y permitirán determinar las tasas de dosis equivalente y los espectros gamma con una única medición —afirma Danas Ridikas, Jefe de la Sección de Física del OIEA—. Combinado con las capacidades de cámaras de alta calidad, el nuevo sistema permitirá a los usuarios obtener un modelo completo de fotogrametría aérea en 3D superpuesta a los mapas radiológicos y la identificación de radionucleidos”.

Las tecnologías que utilizan aeronaves no tripuladas serán cruciales para

avanzar en la monitorización radiológica, lo que incluye mejorar tanto la aplicación de la cartografía del medio ambiente como la vigilancia a largo plazo de las zonas contaminadas, explica Miroslav Pinak, Jefe de la Sección de Seguridad y Monitorización Radiológicas del OIEA.

Los datos recopilados mediante los sistemas de aeronaves no tripuladas desarrollados por el OIEA y validados por la prefectura de Fukushima pueden utilizarse para evaluar los posibles riesgos radiológicos y ayudar a elaborar planes y estrategias adecuados de rehabilitación, descontaminación y gestión de desechos nucleares en el Japón.

Se hará público un documento técnico detallado del OIEA sobre los resultados del proyecto, en el que se tratan aspectos como la calibración de la instrumentación, la validación de la metodología, las mediciones in situ de la tasa de dosis y la reseña geográfica de los emplazamientos de almacenamiento temporal para desechos radiactivos en la prefectura de Fukushima, entre otros.

Los Estados Miembros del OIEA que lo soliciten tienen a su disposición la tecnología, la metodología y las oportunidades de capacitación conexas, que ya se están poniendo en práctica en algunos países con el apoyo del Organismo.

¿Cómo funciona la tecnología?

Las aeronaves no tripuladas están equipadas con detectores de radiación, cámaras y dispositivos GPS. Después de que una aeronave no tripulada despega, las lecturas de radiación y otra información pertinente se sincronizan con su posición GPS exacta y se envían en tiempo real al piloto en la estación terrestre mientras al mismo tiempo se almacenan a bordo. Tras aterrizar, se recuperan todos los datos detallados y la información fotográfica y geográfica se reconstruye junto con las mediciones de la radiación corregidas. Posteriormente, las fotografías, similares a las que toma un satélite, y los análisis de las mediciones de la radiación se ponen a disposición de los encargados de la toma de decisiones para que adopten medidas ulteriores.

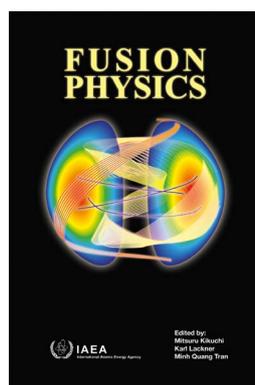
— Alexandra Peeva



Nuclear Fusion

Esta publicación está considerada la principal revista especializada en fusión del mundo. En ella se tratan todos los aspectos de la investigación, a nivel teórico y práctico, relacionados con la fusión nuclear controlada. Fundada en 1960, la revista, que publica alrededor de 400 artículos nuevos al año, ofrece un foro de prestigio e imparcial para el intercambio de conocimientos entre los miembros de la comunidad de investigación sobre fusión. El OIEA gestiona el proceso de revisión por homólogos y se encarga de la coordinación con los autores y revisores, así como con el Editor Académico, el Consejo Editorial de la revista y la empresa coeditora de la publicación, IOP Publishing. En los últimos años, los contenidos de la revista también se han hecho eco de la mayor atención prestada a los materiales empleados en los aparatos de fusión. Cada año la versión electrónica registra medio millón de descargas del texto completo de la publicación y sigue siendo la revista de mayor impacto de todas las de su misma índole.

Revista; doi:10.1088/issn.0029-5515; Online ISSN: 1741-4326; Print ISSN: 0029-5515



Fusion Physics

Esta publicación es una obra de referencia exhaustiva para estudiantes universitarios y una guía de gran valor para investigadores más experimentados. Ofrece una introducción a la fusión nuclear, su situación y perspectivas, y contiene capítulos especializados escritos por expertos de renombre en la materia, en los que se presentan los principales conceptos en cuanto a las actividades de investigación y desarrollo en el ámbito de la física de la fusión. El libro empieza con una introducción en la que se aboga por el desarrollo de la fusión como fuente de energía y en la que también se tratan el confinamiento magnético e inercial. Hay capítulos dedicados a la física del confinamiento, el equilibrio y la estabilidad de los tokamaks, el diagnóstico del plasma, el calentamiento y la generación de corriente por haces neutros y ondas de radiofrecuencia, así como las interacciones plasma-pared. Si bien el tokamak es el concepto principal para hacer realidad la fusión, en el libro también se abordan otros enfoques, como el confinamiento helicoidal y, en sentido más amplio, otras configuraciones magnéticas e inerciales. Esta publicación de más de 1100 páginas es un recurso sin igual para físicos e ingenieros especializados en fusión.

Publicaciones monográficas; ISBN: 978-92-0-130410-0; edición en inglés; 90,00 euros; 2012



Integrated Approach to Safety Classification of Mechanical Components for Fusion Applications

Esta publicación es la primera que edita el OIEA sobre la clasificación desde el punto de vista de la seguridad de los componentes para aplicaciones de fusión. En ella se destacan las diferencias existentes entre los reactores de fisión y de fusión con miras a determinar y clasificar estructuras, sistemas y componentes importantes para la seguridad, y se ofrece información práctica sobre las aplicaciones de la fusión. En este documento técnico también se proporciona información sobre la incorporación de las nuevas condiciones adicionales de diseño, que se añadieron tras la revisión de las Guías de Seguridad del OIEA llevada a cabo a raíz del accidente de la central nuclear de Fukushima Daiichi.

IAEA-TECDOC-1851; 978-92-0-105518-7; edición en inglés; 18,00 euros; 2018

Si necesita información adicional o desea encargar una publicación, póngase en contacto con:

Dependencia de Mercadotecnia y Venta
 Organismo Internacional de Energía Atómica
 Vienna International Centre
 PO Box 100, A-1400 Viena, Austria
 Correo electrónico: sales.publications@iaea.org

Lea este y otros números del *Boletín del OIEA* en línea en
www.iaea.org/es/bulletin

Para más información sobre el OIEA y su labor, visite www.iaea.org,

o síganos en



IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica
Átomos para la paz y el desarrollo