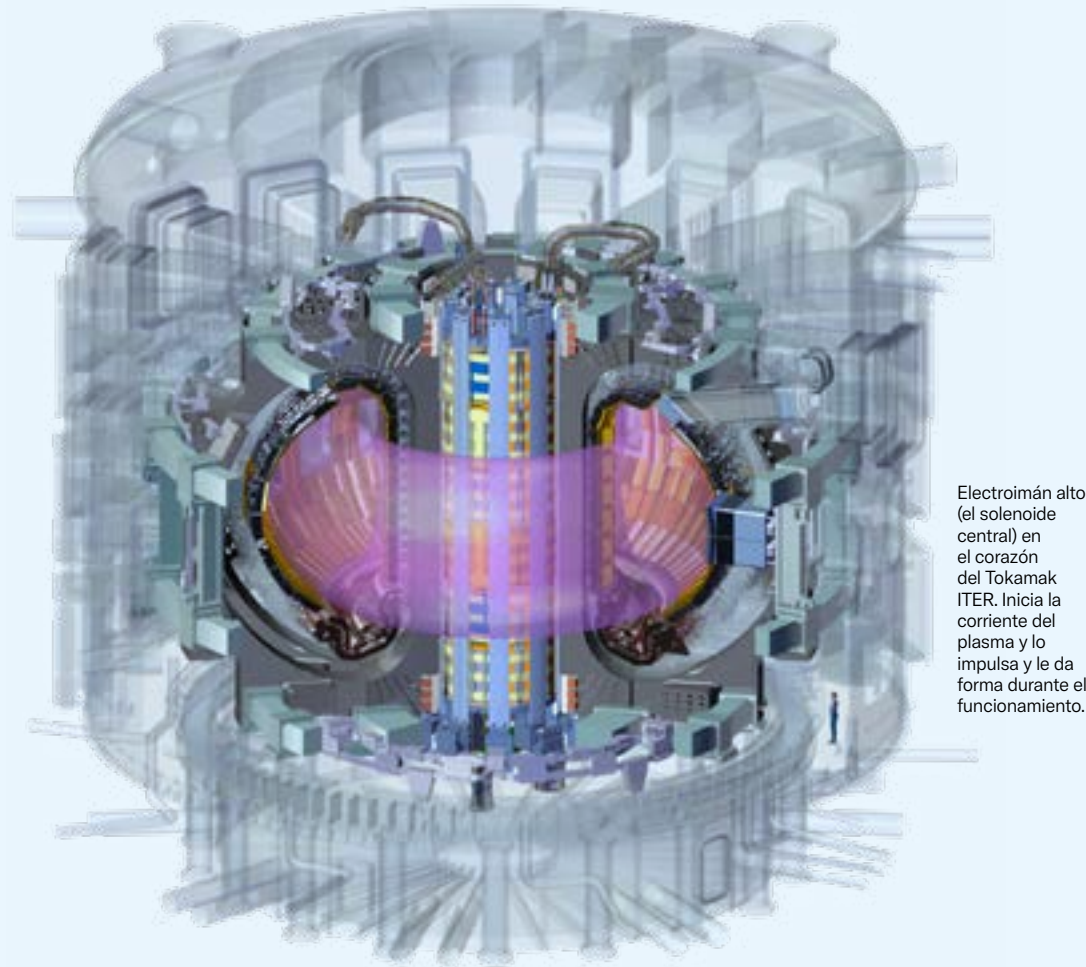


El sueño científico de conseguir la fusión nuclear para la sociedad

TEXTO: CARLOS HIDALGO



Electroimán alto (el solenoide central) en el corazón del Tokamak ITER. Inicia la corriente del plasma y lo impulsa y le da forma durante el funcionamiento.

UNA ESTRELLA EN NUESTRO JARDÍN

Las necesidades energéticas del ser humano se han multiplicado en promedio por un factor de 100 a lo largo de la historia. Si aceptamos que el desarrollo no es posible sin energía, el reto es conseguir que sea limpia, barata y no dañe más el medio ambiente. La fusión nuclear significa dominar la energía que alimenta el Sol y las estrellas, y este desafío científico está liderado por Europa.

Fotografía: US-ITER.

La fascinación de la humanidad por el universo y las estrellas se remonta a tiempos inmemoriales. Desde que los primeros seres humanos alzaron la vista hacia el cielo nocturno, el firmamento se convirtió en un lienzo sobre el que proyectaron preguntas, temores, esperanzas y relatos sobre los misterios de la naturaleza. Las luces titilantes que parecían inalcanzables marcaron el paso del tiempo y las estaciones, y también dieron forma a mitos.

En el siglo VIII a. C., Homero menciona la constelación de Orión en *La Odisea*, integrando el conocimiento astronómico de su tiempo en una obra literaria que ha perdurado milenios. Esta referencia no es casual: demuestra que la observación del cielo formaba parte de la vida cotidiana y del imaginario colectivo. Siglos más tarde, Ovidio, en su obra *Las Metamorfosis*, del siglo I a. C., narra la trágica historia de Ícaro, cuyo vuelo temerario lo acercó demasiado al Sol, dotándola de una dimensión poética que ha influido profundamente en la cultura y el arte universal. Historias mitológicas que simbolizan la eterna tensión entre el anhelo humano de trascendencia y los límites impuestos por la naturaleza.

Con el paso del tiempo, la interpretación mítica dio paso a la indagación científica. Tuvieron que transcurrir muchos siglos, hasta finales del siglo XVIII, para descubrir que algunos de esos puntos brillantes en el firmamento no eran meras

estrellas aisladas, sino enormes cúmulos estelares, más tarde identificados como galaxias.

El siglo XX marcó un hito decisivo. Gracias a los avances en física, la humanidad comprendió que la energía que sustenta a las estrellas es la energía de fusión nuclear: un proceso en el que los núcleos atómicos se combinan liberando cantidades inmensas de energía. Este descubrimiento explicó el brillo persistente del Sol y de las demás estrellas, y reveló

“Para obtener la fusión nuclear es necesario generar una estrella en un laboratorio. Esto significa calentar los núcleos atómicos a temperaturas aproximadamente diez veces superiores a las que hay en el núcleo del Sol”



Fusión nuclear para la sociedad. Sueños y belleza de la imperfección en la ciencia (Editorial Catarata, 2025). Este libro explora los principios

físicos que sustentan la fusión nuclear, los obstáculos científicos y tecnológicos que aún deben superarse y las razones por las que este esfuerzo colectivo puede marcar un punto de inflexión en la historia energética y en la mitigación del cambio climático. Es una llamada a imaginar y construir colectivamente un nuevo modelo de desarrollo.

que la materia y la energía están íntimamente ligadas por leyes fundamentales de la naturaleza.

A partir de ese momento, el empeño científico fue imitar al Sol, confinar una estrella en un laboratorio.

La fusión controlada en la Tierra es ya una realidad, pero aún no hemos alcanzado la meta final, llevarla a la sociedad. El primer experimento con este objetivo explícito, ITER, está en construcción en el sur de Francia gracias a una colaboración que involucra a 35 países, entre los que se incluyen los 27 de la UE. Se trata del mayor experimento de fusión nuclear del mundo. Además, están en desarrollo las bases de la primera planta piloto de fusión, totalmente europea.

ESTRELLA DE LABORATORIO

En el siglo XXI, se anunció la obtención de energía de fusión nuclear mediante estrategias de confinamiento inercial y confinamiento magnético, marcando un hito en la comprensión y el control de los procesos nucleares de fusión. Estos logros reafirman la tenacidad del ser humano y la capacidad extraordinaria de la ciencia para convertir una parte de nuestros sueños en realidad. ▶

Para obtener la fusión nuclear es necesario generar *una estrella* en un laboratorio. Esto significa calentar los núcleos atómicos a temperaturas aproximadamente diez veces superiores a las que hay en el núcleo del Sol, unos 15 millones °C. A estas temperaturas, la materia se encuentra en un estado que incluye partículas positivas (núcleos) y negativas (electrones) que denominamos plasma.

El contacto directo con un plasma tan caliente destruiría cualquier recipiente material. Por eso, usamos campos magnéticos para confinar las partículas cargadas. Dichos campos generan fuerzas que impiden que el plasma (muy caliente) entre en contacto con las paredes del contenedor, evitando daños irreversibles. Esta estrategia puede entenderse mediante una analogía sencilla: es similar al aire atrapado dentro de un neumático de automóvil. Así como la estructura mecánica del neumático mantiene el equilibrio frente a la presión interna del aire, los campos magnéticos cumplen la función de sostener y equilibrar la presión del plasma a altísimas temperaturas.

Los campos magnéticos, de aproximadamente unas 100.000 veces el campo terrestre, se diseñan de manera que las partículas cargadas, como protones y electrones, sigan trayectorias helicoidales alrededor de las líneas de flujo magnético, evitando que colisionen con las paredes del reactor. Este efecto protege el contenedor y permite mantener densidad y temperatura suficientes para que los núcleos atómicos puedan superar la repulsión electrostática y fusionarse, liberando energía.

Las configuraciones de campo magnético más exitosas para

“La fusión nuclear no genera gases de efecto invernadero y su combustible principal son isótopos ligeros de hidrógeno, como el deuterio, abundante en el agua del mar”

el desarrollo de la fusión son los llamados *tokamak* y *stellarator*. En los *tokamak*, el campo magnético es producido por corrientes eléctricas que circulan en bobinas externas al plasma y dentro del propio plasma, mientras que en los *stellarators* el campo magnético es producido fundamentalmente por bobinas externas.

LOS GRANDES DESAFÍOS

La fusión nuclear no genera gases de efecto invernadero, y su combustible principal son isótopos ligeros de hidrógeno, como el deuterio, abundante en el agua del mar, pero también tritio, que se produce a partir de litio. Y aunque los reactores de fusión generan materiales activados por la radia-

ción, estos presentan, en general, periodos de vida significativamente más cortos que los residuos de la fisión nuclear convencional.

Pero no basta con demostrar que la reacción es posible: es necesario convertirla en una fuente de energía controlada, continua y económicamente viable.

Desde el punto de vista físico, el objetivo central es alcanzar una ganancia neta de energía, es decir, producir más energía de la que se invierte en mantener la reacción. Este principio guía proyectos internacionales como ITER, concebido para demostrar la viabilidad científica y tecnológica de la fusión a gran escala.

Desde el punto de vista tecnológico, los retos son igualmente complejos. Entre ellos destacan la autosuficiencia en tritio —un combustible escaso en la naturaleza— y el desarrollo de materiales estructurales capaces de resistir intensos flujos de calor y un severo bombardeo neutrónico, condiciones inherentes a un reactor de fusión. Ese es el objetivo de IFMIF-DONES (International Fusion Materials Irradiation Facility DEMO Oriented Neutron Source), actualmente en construcción en Escúzar (Granada, España). Esta infraestructura permitirá obtener datos experimentales sobre el comportamiento de materiales bajo condiciones extremas análogas a las de un reactor de fusión.

Más allá de los retos científicos y tecnológicos, el diseño de los futuros reactores deberá asegurar altos niveles de disponibilidad, seguridad y eficiencia económica para que la electricidad producida sea competitiva frente a otras fuentes energéticas. Y este es el objetivo de la primera Planta Piloto de Fusión europea, que busca acelerar el proceso de la fusión

nuclear, convertirla en objetivo estratégico para la inversión privada, y conseguir acercarla así a la sociedad.

Desde la mitología hasta los laboratorios de alta tecnología, el hilo conductor ha sido el mismo: la curiosidad insaciable por comprender el cosmos y nuestro lugar en él. Actualmente, nos enfrentamos al desafío de que la fusión nuclear sea técnicamente viable y accesible para toda la sociedad, a la transformación de este avance científico en un beneficio tangible que contribuya al bienestar global, y a la transición hacia fuentes de energía masivas y sostenibles que nos

permitan preservar el planeta para las generaciones futuras.

Hacer realidad la fusión nuclear para la sociedad implica adentrarse en los límites de la ciencia y en la ciencia de los límites. En ese territorio fronterizo, descubrimos también la belleza de la imperfección de nuestro entendimiento de la naturaleza. Los modelos con los que describimos el mundo no son reflejos exactos de la realidad, sino aproximaciones cada vez más refinadas. Son, por definición, incompletos. Y esa imperfección, lejos de ser una debilidad, es la que impulsa el progreso científico. **E**

El desarrollo de la fusión nuclear en Europa se encuentra, a principios de 2026, en un punto de inflexión crítico. El panorama está marcado por el proyecto internacional ITER y por

El papel de Europa

el avance en paralelo hacia la primera Planta Piloto de Fusión europea. El objetivo es acelerar la transición científico-tecnológica y la plena comercialización, posicionando así a Europa como referente global en el sector. El auge de iniciativas privadas a escala internacional refleja un cambio de modelo de financiación: del exclusivamente público al público-privado. Ni el sector público, donde hoy se concentra el conocimiento científico y tecnológico de la fusión, ni el dinamismo del sector privado, actuando por separado, podrán acelerar por sí solos su desarrollo. De ahí la necesidad de un modelo mixto público-privado, ya en fase de diseño en Europa y que debe estar operativo en 2026, para mantener el liderazgo en esta energía disruptiva. Necesitamos reforzar la coordinación e integración de los pilares del Programa Europeo de Fusión —incluidos Fusion for Energy (F4E), EUROfusion, la industria y los Estados miembros—. De este modo, es posible garantizar la coherencia estratégica y la alineación de las actividades de fusión con las prioridades políticas, energéticas e industriales de la Unión Europea.



Parte de la vasija de plasma del Wendelstein 7-X, el mayor y más avanzado dispositivo de fusión nuclear de tipo *stellarator* del mundo, durante su fabricación.

Fotografía: Instituto Max Planck de Física del Plasma, Wolfgang Filiser.