

# Energía de Fusión: de promesa científica a reto tecnológico

Avance Informe Future Trends Forum #FusionForward 2025

Este documento es un resumen que recoge los principales mensajes y debates del foro internacional "Fusion Forward" celebrado los días 4 y 5 de junio en Madrid. A lo largo del otoño de 2025, la Fundación Innovación Bankinter publicará un **informe completo que incluirá conclusiones detalladas y recomendaciones específicas para acelerar el desarrollo y despliegue de la energía de fusión**.

## La fusión entra en escena

Durante décadas, la energía de fusión ha sido el gran unicornio de la transición energética: una fuente limpia, segura e inagotable, siempre a 30 años vista. Hoy, por primera vez, ese horizonte empieza a definirse con fechas concretas, inversiones masivas y prototipos reales. La fusión ha dejado de ser un reto científico para convertirse en un desafío tecnológico, industrial y geopolítico.

Este giro se produce en un momento crítico: la creciente presión por descarbonizar la economía ante la aceleración de la crisis climática ha coincidido con una demanda energética global en ascenso, impulsada por la digitalización masiva, la expansión de la inteligencia artificial y la electrificación del transporte. Este cóctel de urgencias -ambientales, tecnológicas y económicas- ha colocado a la fusión en el centro de una nueva conversación estratégica sobre el futuro de la energía.

Al mismo tiempo, el ecosistema de innovación ha evolucionado. Frente al tradicional modelo de grandes proyectos públicos de investigación, en los últimos diez años han surgido más de 40 startups de fusión altamente especializadas, muchas de ellas impulsadas por capital riesgo y fondos de impacto climático.

Empresas como Commonwealth Fusion Systems, TAE Technologies, Tokamak Energy, Gauss Fusion, Renaissance Fusion, Kyoto Fusionsengineering, Xcimer Energy Corporation o Proxima Fusion han captado miles de millones de dólares.

Este impulso privado **está modificando los ritmos, las expectativas y, sobre todo, la cultura del sector**.

En este contexto, el Future Trends Forum de la Fundación Innovación Bankinter reunió en Madrid a una treintena de expertos internacionales del máximo nivel -científicos, inversores, tecnólogos, líderes empresariales y responsables de políticas públicas- para reflexionar sobre el papel estratégico de la fusión y el camino hacia su viabilidad industrial.

El objetivo: identificar, desde una mirada global y multisectorial, las condiciones que deben alinearse para que esta tecnología dé el salto a la realidad industrial, y qué rol puede jugar España y Europa en ese futuro.



# ¿Qué es la energía de fusión?

**La fusión es la reacción que alimenta al Sol.** Reproducirla en la Tierra -de manera controlada y rentable- podría revolucionar el sistema energético global. A nivel físico, la fusión es el proceso mediante el cual dos núcleos atómicos ligeros, como los del hidrógeno, se combinan para formar un núcleo más pesado, liberando una gran cantidad de energía.

A diferencia de la fisión, que divide núcleos pesados y genera residuos radiactivos de larga duración, la fusión produce una energía mucho más limpia y segura. Aunque también genera residuos radiactivos, estos son de menor intensidad y vida media más corta, y no requiere materiales fisibles que puedan desencadenar reacciones en cadena. Además, no emite gases de efecto invernadero durante su operación ni presenta riesgo de accidentes nucleares catastróficos.

Para liberar energía mediante fusión, es necesario calentar el combustible a temperaturas extremas (superiores a los 100 millones de grados), transformándolo en un plasma, el cuarto estado de la materia.

El plasma es un gas ionizado compuesto por núcleos y electrones libres que se comporta de forma muy diferente a los sólidos, líquidos o gases convencionales: conduce la electricidad, responde a campos magnéticos y es altamente inestable.

El principal desafío es confinar ese plasma durante el tiempo suficiente y en condiciones adecuadas de densidad y temperatura para que se produzca la fusión. Este equilibrio, conocido como el criterio de Lawson, es la base física que rige todos los diseños de reactores.

Actualmente, existen dos grandes enfoques tecnológicos para alcanzar estas condiciones extremas: el confinamiento magnético, que emplea campos magnéticos intensos en dispositivos como los tokamaks y los stellarators; y el confinamiento inercial, que utiliza láseres o haces de partículas para comprimir pequeñas cápsulas de combustible.

Aunque ninguno ha alcanzado aún una ganancia neta sostenida en condiciones comerciales, los avances recientes -como la ignición lograda en el National Ignition Facility (NIF) en EE.UU. o el uso de superconductores de alta temperatura en reactores compactos- están acelerando el desarrollo y acercando la fusión al mercado energético.

Si en el pasado la fusión era “siempre a 30 años vista”, hoy ya no es una promesa científica: es un reto de innovación e ingeniería a escala industrial. Lograr que esta energía llegue a la red eléctrica -y lo haga pronto- depende tanto de avances técnicos como de decisiones estratégicas sobre inversión, colaboración público-privada, regulación y formación de talento.

# Los desafíos

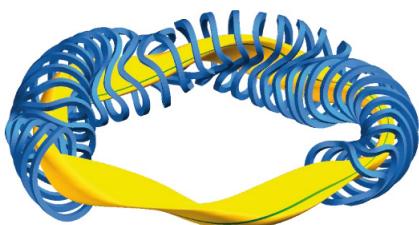
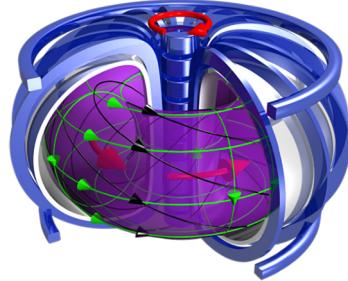
La carrera hacia la energía de fusión es hoy un **enorme reto de ingeniería**, donde las distintas tecnologías avanzan a velocidades desiguales, pero convergen hacia un objetivo común: **generar energía limpia, segura y abundante**. El debate en el foro mostró que ya no se trata de "si" la fusión es posible, sino de "cómo y cuándo" lograremos convertirla en una fuente competitiva y viable a gran escala.

## Tres caminos tecnológicos en marcha

Existen tres grandes líneas tecnológicas activas:

### TOKAMAKS

Como el reactor [JET](#) o el que está desarrollándose en [ITER](#), emplean campos magnéticos intensos en una geometría toroidal para confinar el plasma. Han logrado los mayores avances experimentales, aunque su complejidad y tamaño plantean desafíos de escalabilidad.



### STELLARATORS

Como [Wendelstein 7-X](#) o el futuro reactor de [Renaissance Fusion](#), ofrecen una geometría más compleja pero más estable. Permiten **operación continua sin necesidad de pulsos**, lo que los hace atractivos para energía base, aunque su fabricación es altamente especializada.

### CONFINAMIENTO INERCIAL

Como el del laboratorio [NIF \(National Ignition Facility\)](#) en EE.UU., utiliza láseres para comprimir cápsulas de deuterio-tritio. En 2022 logró por primera vez la ignición (más energía producida que absorbida por el combustible), marcando un hito histórico. En abril de 2025, consiguió su mayor hito hasta la fecha: producir 8,6 megajulios de energía de fusión en un solo experimento, usando 2,08 megajulios de energía láser para iniciar la reacción. Eso significa que la energía obtenida fue más de cuatro veces la que se invirtió directamente en el combustible. **Este resultado supera con creces los logros anteriores** y confirma que la ignición por confinamiento inercial -aunque aún en fase experimental y lejos del rendimiento total requerido para una planta eléctrica - está avanzando rápidamente.

## De la física al sistema

"Ya no estamos en la era de la física del plasma. Estamos entrando en la era de la tecnología de fusión." Con esta frase, uno de los participantes del foro resumió un consenso generalizado: la física base está suficientemente demostrada. El reto ahora es convertir ese conocimiento en sistemas operativos, con ingeniería robusta, materiales avanzados y procesos industriales escalables.

## Los desafíos, según los expertos

### 1. Gestión del tritio y ciclo de combustible:

Uno de los principales expertos mundiales en ingeniería de fusión señaló que muchos de los obstáculos clave no residen en el plasma, sino en los sistemas periféricos: cómo producir, recuperar y manejar el tritio de forma segura, así como lograr que el reactor regenere su propio combustible mediante mantos con litio, conocidos como breeding blankets. Este aspecto fue identificado como uno de los menos maduros y más críticos en el camino hacia la comercialización.

**2. Materiales frente a neutrones:** Los expertos destacaron que el impacto de los neutrones rápidos sobre las paredes internas del reactor plantea desafíos enormes. No solo se requieren nuevos materiales, sino instalaciones específicas de prueba, como IFMIF-DONES en España, que permitirán evaluar su comportamiento bajo condiciones reales.

**3. Sistema completo y eficiencia:** Varios expertos enfatizaron la importancia de pensar en los reactores como sistemas integrados: no basta con generar fusión, hay que recuperar el calor, transformarlo en electricidad, refrigerar los componentes y hacerlo de forma eficiente. También se recordó que cualquier solución viable debe contemplar desde el diseño aspectos de seguridad, mantenimiento y coste operativo.

## Un cambio de mentalidad

"Lo que necesitamos ahora no es otro avance incremental en el plasma, sino integrar todos los subsistemas en un dispositivo funcional, aunque aún no sea perfecto."

La mayoría de los expertos coincidieron en que **el sector debe adoptar enfoques más iterativos, similares a los del desarrollo tecnológico y empresarial**. Esto implica aceptar cierta incertidumbre técnica, priorizar demostradores funcionales y trabajar con criterios de producto mínimo viable (MVP), sin esperar a tener todos los subsistemas perfectos antes de avanzar.

## Tecnologías habilitadoras

La energía de fusión no puede avanzar sin una serie de tecnologías transversales que deben madurar e integrarse al mismo tiempo que el propio reactor. Durante el foro, los expertos coincidieron en que **muchos de los elementos clave que permitirán su funcionamiento comercial aún se encuentran en niveles bajos de madurez tecnológica**, pero se están dando pasos decisivos para acortar los plazos.

### Baja madurez tecnológica generalizada

Según varios expertos del foro, la mayoría de los subsistemas necesarios para un reactor comercial —como el breeding blanket (o manto regenerador), los materiales resistentes a neutrones, los sistemas de mantenimiento remoto, los imanes avanzados, la conversión térmica o el ciclo del tritio— están aún en niveles bajos de madurez tecnológica (TRL < 4). Esto significa que, aunque se comprenden teóricamente y se hayan hecho pruebas experimentales, aún no han sido validados en condiciones relevantes de operación.

**Resolver este desfase requiere instalaciones de ensayo avanzadas y estrategias de integración tecnológica sistemática.**

## Materiales: la base de todo

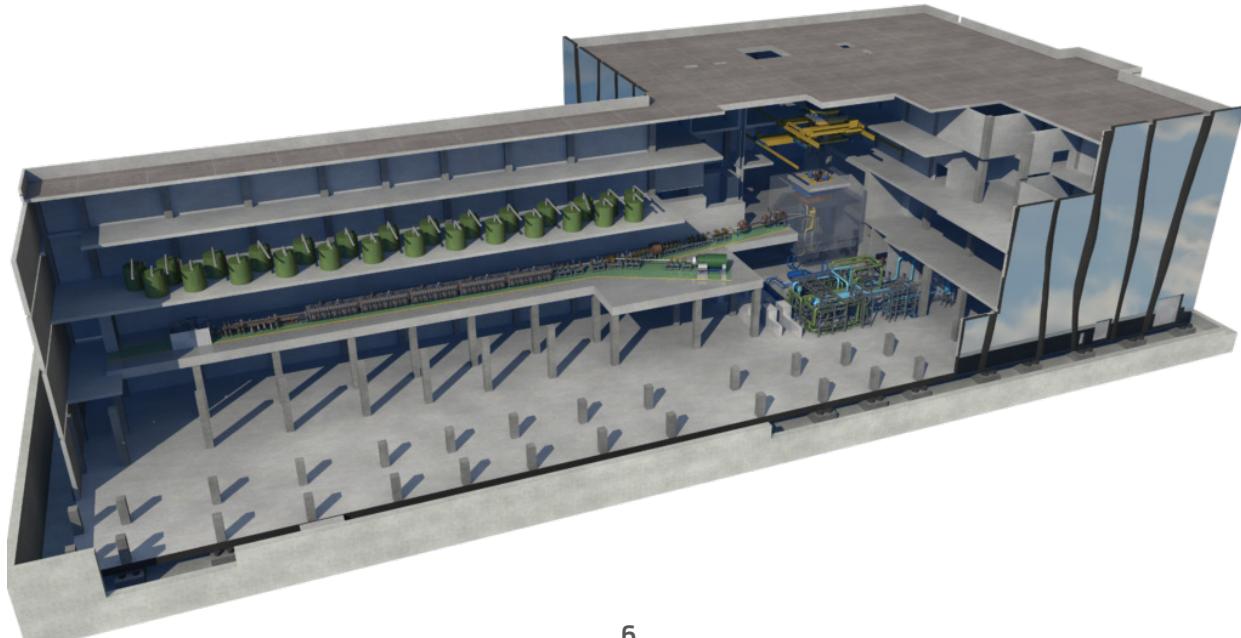
Los materiales estructurales de un reactor de fusión deben resistir condiciones extremas de temperatura, presión y, sobre todo, irradiación por neutrones rápidos, que causan daños acumulativos únicos en comparación con la fisión. **No basta con buscar materiales individuales, sino sistemas completos de materiales -con recubrimientos, uniones y combinaciones- que funcionen de manera integrada.** actualmente, el único material estructural viable es el acero RAFM, aunque ya se investiga en materiales más avanzados. Los expertos también subrayan la necesidad de ensayos que alcancen el "fin de vida" de los componentes, algo que aún no se ha logrado en ningún subsistema nuclear completo.

### IFMIF-DONES – La puerta de entrada a los materiales del futuro

El proyecto IFMIF-DONES (International Fusion Materials Irradiation Facility – DEMO-Oriented Neutron Source) es una de las infraestructuras científicas más importantes para el futuro de la fusión nuclear. Se está construyendo en Granada (España) y será la única instalación del mundo capaz de ensayar materiales bajo condiciones de radiación equivalentes a las de un reactor de fusión.



Está previsto que entre en operación en la década de 2030, convirtiéndose en una piedra angular del camino hacia la energía de fusión comercial.



## El ciclo del tritio: el “elefante en la habitación”

Varios expertos señalaron que la gestión del tritio es uno de los retos más subestimados pero decisivos. Se trata de un elemento escaso, caro y altamente permeable, con implicaciones relevantes en términos de seguridad y regulación debido a su radiactividad. **Para lograr una planta de fusión operativa, es imprescindible diseñar desde el inicio un ciclo cerrado de combustible que incluya producción, almacenamiento, purificación, reciclaje y contención del tritio.** Estos sistemas aún no han sido validados de forma integrada, y su desarrollo será clave para convertir prototipos en plantas reales.

## El tritio en la fusión nuclear – ¿De dónde viene y cómo se gestiona?

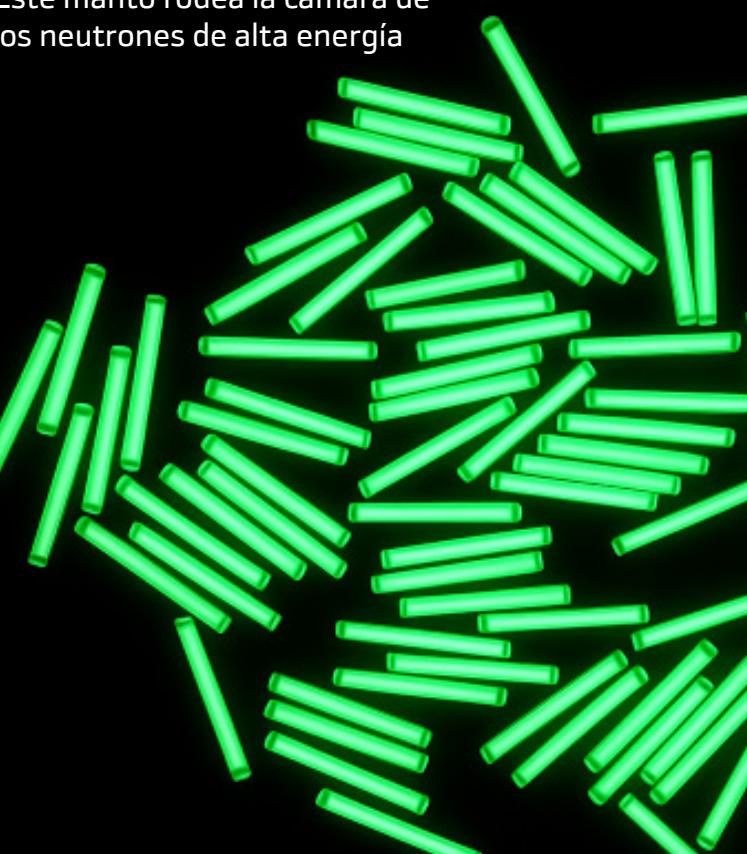
El tritio ( ${}^3\text{H}$ ) es un isótopo radiactivo del hidrógeno clave para las reacciones de fusión más viables a corto plazo, como la deuterio-tritio (D-T). Sin embargo, no existe de forma natural en cantidades significativas en la Tierra: su vida media es corta (~12 años) y se desintegra rápidamente.

Actualmente, el tritio se produce como subproducto en algunos reactores de fisión (especialmente los CANDU en Canadá), la producción actual es muy limitada: los stocks globales civiles rondan los 25 kg en total, con cerca de 2 kg anuales de aporte neto, y las reservas actuales se reducen ~5 % al año por desintegración.

En los futuros reactores de fusión, **el tritio deberá producirse in situ mediante un sistema cerrado de combustible**. Para ello, se recurre a un componente esencial del reactor: el “breeding blanket” o manto regenerador. Este manto rodea la cámara de plasma y contiene litio, que al ser bombardeado por los neutrones de alta energía

Este tritio generado se extrae, purifica, almacena y vuelve a injectarse como combustible, formando así un ciclo cerrado del tritio. **La eficiencia de este ciclo es crítica: el reactor debe producir al menos tanto tritio como consume para ser autosuficiente.**

Desarrollar sistemas fiables para este ciclo implica superar múltiples desafíos de ingeniería, seguridad y regulación: el tritio es escaso, costoso, permeable a muchos materiales y radiactivo. Por eso, **hoy se lo considera uno de los “cuellos de botella” técnicos más importantes en el camino hacia la fusión comercial.**



## El blanket: tres funciones críticas en un solo sistema

Varios expertos destacaron el rol esencial del breeding blanket, que debe cumplir simultáneamente tres funciones: proteger los imanes y estructuras del reactor, extraer el calor para convertirlo en energía y producir tritio mediante reacciones nucleares con litio.

A pesar de su centralidad, no existen aún ensayos completos que lo validen en condiciones operativas. También se subrayó que los neutrones generados por la fusión tienen una energía (~14 MeV) mucho mayor que los de fisión, lo que exige nuevas soluciones estructurales y de ingeniería térmica.

## Robótica e inteligencia artificial: operar sin personas dentro

El mantenimiento de futuros reactores requerirá operar en entornos incompatibles con la presencia humana directa. Diversos expertos destacaron la necesidad urgente de desarrollar sistemas de mantenimiento remoto y robótica avanzada, capaces de realizar tareas complejas con precisión y fiabilidad.

También se subrayó el potencial de la inteligencia artificial para acelerar el diseño, la simulación y el mantenimiento predictivo de los sistemas de fusión, así como la conveniencia de impulsar plataformas compartidas de datos y modelos para facilitar su adopción. En la misma línea, se insistió en la importancia de importar talento y estándares de sectores como el aeroespacial o los grandes aceleradores, con exigencias comparables en precisión, fiabilidad y control remoto.



## Un cambio de enfoque experimental

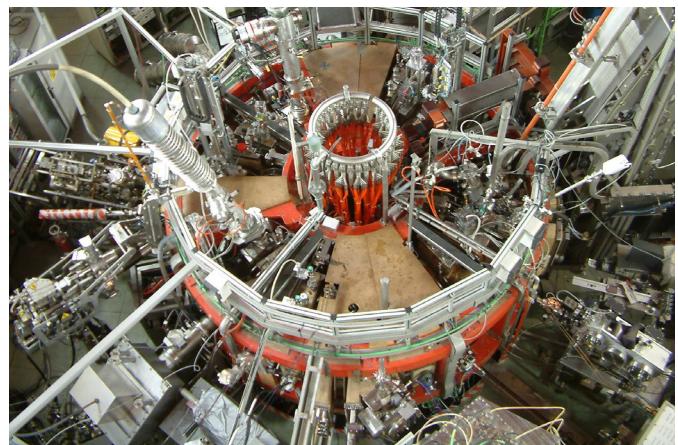
Varios expertos coincidieron en la necesidad de apostar por instalaciones de prueba más compactas y versátiles, capaces de ensayar componentes con mayor agilidad y extraer los resultados a condiciones de planta.

En esta línea, el **Laboratorio Nacional de Fusión del CIEMAT** ocupa un papel central: opera el **stellarator TJ-II**, un dispositivo sumamente flexible que permite variar la configuración magnética casi a demanda y que ha servido como banco de pruebas para técnicas de diagnóstico avanzadas, estudios de transporte y desarrollo de materiales de primera pared durante más de dos décadas.

También el **IFMIF-DONES**, explicado anteriormente, es una de las principales instalaciones que permitirán el desarrollo de la energía de fusión en España.

En paralelo, el **tokamak esférico SMART** que desarrolla la Universidad de Sevilla, recientemente exitoso en su primer plasma y en la exploración de geometrías de plasma de triangularidad negativa, complementa esta estrategia al ofrecer un entorno compacto para ensayar configuraciones disruptivas con ciclos de aprendizaje muy rápidos.

Sin embargo, sigue abierto el debate sobre hasta qué punto estos bancos de prueba reproducen fielmente las condiciones extraordinariamente complejas de un reactor de demostración. **Determinar la combinación óptima de instalaciones y protocolos de validación es, por tanto, la cuestión clave para garantizar decisiones de diseño robustas en la hoja de ruta hacia las futuras plantas comerciales de fusión.**



Stellarator TJ-II de CIEMAT.



Primeras instalaciones de IFMIF-DONES.



Tokamak esférico SMART de la Universidad de Sevilla.

## Un cambio de enfoque experimental

Uno de los mensajes más destacados por los expertos fue la **necesidad de que la fusión aprenda de sectores que ya han superado transiciones tecnológicas complejas**. La experiencia acumulada en campos como la exploración espacial, la energía nuclear civil, la biotecnología o la industria aeroespacial ofrece lecciones valiosas sobre cómo escalar tecnologías disruptivas, gestionar riesgos regulatorios y construir cadenas de suministro globales desde fases tempranas. Uno de los participantes explicó cómo la NASA tuvo que rediseñar desde cero el marco normativo para facilitar la entrada de actores comerciales como SpaceX. Durante dos años, los equipos públicos y privados trabajaron juntos para revisar cada estándar técnico, manteniendo la seguridad sin imponer exigencias obsoletas. "Permitir equivalencias fue clave para que los proveedores innovasen sin romper las reglas", afirmó.

Otro experto destacó cómo en el diseño y montaje de grandes instalaciones como JT-60SA, el trabajo colaborativo entre industria y centros de investigación fue esencial para resolver problemas técnicos en tiempo real, y pidió incorporar a la industria desde fases tempranas. También se compartieron lecciones sobre la complejidad de escalar componentes desde la investigación a la fabricación industrial. Se insistió en que "el diseño debe estar suficientemente cerrado antes de iniciar la construcción", y en la importancia de controlar la calidad en cada eslabón de una cadena de suministro distribuida a escala global.

También se subrayó la necesidad de integrar a expertos del sector aeroespacial -acostumbrados a trabajar en condiciones de vacío y alta precisión- junto a los del ámbito nuclear, más habituados a grandes infraestructuras, pero con menos exigencia en limpieza y exactitud.

En el debate final, varios participantes coincidieron en que **los procesos de transferencia tecnológica y la colaboración abierta entre instituciones públicas y empresas privadas** -como ocurrió con la Estación Espacial Internacional- **pueden y deben inspirar a la fusión**: "lo que estamos construyendo no es solo un reactor, sino una plataforma de cooperación global que puede cambiar el rumbo de la humanidad".

## Tecnologías con impacto más allá de la fusión

Una de las ideas más relevantes del foro fue que **el desarrollo de tecnologías para la fusión está dando lugar a innovaciones con aplicaciones potenciales en múltiples sectores industriales**. Estos "efectos multiplicadores o de transferencias tecnológicas" (spillovers) podrían acelerar el retorno de la inversión, movilizar a sectores industriales y contribuir a la soberanía tecnológica de Europa.

## Tecnologías con mayor potencial de transferencia

**Imanes superconductores de alto rendimiento y criogenia avanzada**, fundamentales en fusión, pero también aplicables en medicina (MRI, protonterapia), transporte (trenes de levitación magnética) o almacenamiento energético. Uno de los participantes explicó cómo se está rediseñando la fabricación de imanes HTS mediante "alfombras superconductoras", abaratando su producción y abriendo nuevos usos. Otro experto recordó que tecnologías de superconductores como NbTi y Nb<sub>3</sub>Sn ya han tenido un gran impacto en medicina y física de partículas, y alertó sobre la dependencia europea de proveedores no europeos.

**Manejo de metales líquidos**, inicialmente pensado para la extracción de calor y regeneración de tritio en fusión, con aplicaciones en reactores de fisión de cuarta generación y sistemas de refrigeración industriales.

**Electrónica resistente a radiación y convertidores de potencia modulares**, con posibles aplicaciones en defensa, infraestructuras críticas, espacio y redes eléctricas avanzadas.

**Inteligencia artificial, digital twins y robótica**, claves para la operación remota de reactores, pero con enormes sinergias con sectores como la automatización industrial, la medicina y la logística.

### Sectores receptores y actores clave

**Energía** (fisión avanzada, hidrógeno, redes eléctricas)

**Salud** (imagen médica, terapia con partículas)

**Defensa y aeroespacial**

**Transporte** (trenes, aviación, automoción)

**Big Science** (aceleradores, instalaciones experimentales)

Actores clave en esta transferencia serían grandes ingenierías, fabricantes de sistemas láser o criogénicos, y empresas de defensa.

Los expertos coincidieron en que la colaboración público-privada es esencial para convertir estos desarrollos en soluciones industriales, y que Europa debe invertir con decisión para liderar cadenas de valor propias, especialmente en imanes superconductores.

### Barreras y oportunidades

**Madurez tecnológica limitada** en muchos casos (TRL bajos)

**Escasez de proveedores europeos** para tecnologías clave como HTS

**Falta de plataformas de prueba y validación industrial**

Los expertos reclamaron inversiones coordinadas, estrategias industriales europeas y programas de demostración para facilitar la adopción de estas tecnologías, incluso antes de que la fusión comercial sea una realidad.

### Cadena de suministro

El despliegue comercial de la fusión no dependerá únicamente de resolver desafíos físicos o de diseño. La **capacidad de construir plantas a escala industrial** dependerá de manera crítica de que exista una **cadena de suministro capaz, ágil y coordinada**, algo que hoy todavía no está garantizado. Como recordó uno de los participantes, "la cadena de suministro no existe hoy en día para muchos de los componentes específicos de la fusión", y la incertidumbre sobre la demanda futura impide a la industria comprometer inversiones clave.

### ¿Una sola cadena de suministro? No, muchas

Los expertos señalan que no hay una única cadena de suministro para la fusión, sino múltiples redes interconectadas dependiendo del enfoque tecnológico: confinamiento magnético o inercial.

Sin embargo, hay elementos comunes esenciales: materiales resistentes, gestión del tritio, mantenimiento remoto, electrónica especializada, componentes del blanket y sistemas de conversión térmica.

En el caso del confinamiento magnético, destacan los imanes superconductores de alta temperatura, los sistemas de calentamiento de plasma por microondas o los divertores resistentes a flujos de calor extremos. En el caso del confinamiento inercial, los retos se centran en la producción masiva de blancos de combustible y en sistemas de inyección de alta precisión.

## Demandas inciertas, inversiones congeladas

Algunos expertos coincidieron en que, sin una señal clara de demanda sostenida, las empresas no invertirán en capacidades industriales. La mayoría de los proveedores actuales solo pueden producir piezas únicas o en series muy cortas, a precios muy elevados y sin garantías de continuidad. La experiencia de Tokamak Energy demuestra que hoy la industria global solo responde a pedidos puntuales. Además, la incertidumbre tecnológica también bloquea decisiones: si no se sabe qué diseños serán viables, qué tecnologías se impondrán o qué requisitos tendrán los componentes, es difícil planificar fábricas o cadenas logísticas a largo plazo.

## El papel de la política industrial

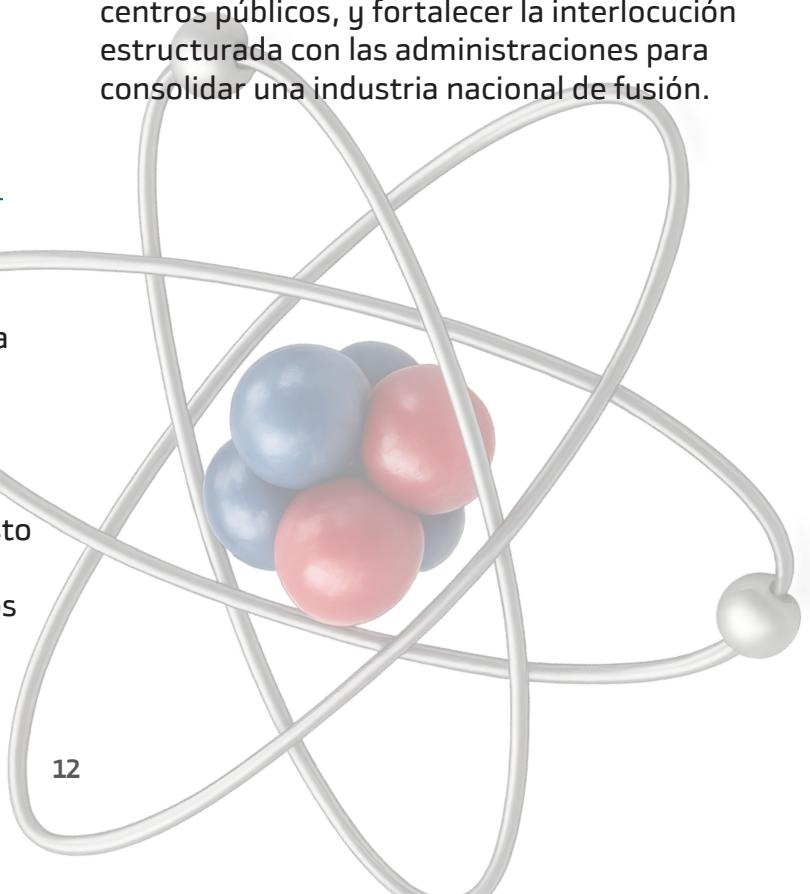
Varios expertos reclamaron la puesta en marcha de programas tipo "milestone-based cost share", como el modelo aplicado en EE. UU., donde el gobierno fija hitos técnicos y cofinancia a las empresas que los cumplen. Esto genera una demanda previsible y facilita la movilización de capital privado, como explicaron algunos expertos. También se mencionó la necesidad de seleccionar dos o tres conceptos tecnológicos prioritarios para concentrar recursos y evitar la dispersión. Esto no excluye a otros enfoques, pero facilita el diseño de estándares industriales y requisitos comunes para los proveedores.

## Tecnologías con mayor potencial de transferencia

Además del reto tecnológico, el foro subrayó la **importancia de construir relaciones de confianza y visión compartida entre los actores de la cadena de valor**. Se destacó también el papel clave de empresas con capacidad transversal para operar entre el mundo científico y el industrial, y se reclamaron estándares específicos para la fusión, que no repliquen modelos de otros sectores sin adaptación.

Un experto subrayó que "la diferencia entre lo que se espera y lo que es realmente realizable solo puede cubrirse con confianza". Para ello, propuso **adaptar estándares de calidad como los ECSS europeos a los retos específicos de la fusión**. Otro de los expertos apuntó que uno de los factores clave del éxito español en grandes proyectos como ITER o IFMIF-DONES ha sido la anticipación: "**nuestra industria está organizada desde hace 30 años para responder a proyectos científicos exigentes**".

Reclamó dar continuidad a ese modelo de colaboración entre asociaciones industriales y centros públicos, y fortalecer la interlocución estructurada con las administraciones para consolidar una industria nacional de fusión.



# Factores clave para acelerar la fusión

La fusión se está convirtiendo en un reto de innovación sistémica que requiere la colaboración estrecha entre sectores públicos y privados, entre grandes laboratorios y startups, entre ingenieros, inversores, reguladores y formadores de talento. Acelerar su desarrollo exige repensar los modelos de gobernanza, financiación, formación y regulación.

Durante el foro se identificaron **tres ejes clave para construir un ecosistema de colaboración eficaz**: una estrategia de colaboración e inversión orientada a hitos, una visión compartida para atraer y formar talento técnico e industrial, y un marco regulatorio claro y adaptado a las especificidades de la fusión. Y, transversalmente, hacer esfuerzos en comunicación.

## Inversión

El futuro de la fusión dependerá de modelos financieros que permitan sostener su desarrollo en el tiempo. En el foro se puso de manifiesto la **necesidad de reforzar las colaboraciones público-privadas**, combinando los recursos y la visión a largo plazo del sector público con la agilidad y la innovación del sector privado.

Varios expertos subrayaron que el modelo actual de financiación pública fragmentada no es suficiente para escalar la fusión, y defendieron avanzar hacia una estrategia tipo "proyecto país o europeo", con compromisos a largo plazo y una planificación conjunta de infraestructuras, hitos tecnológicos y objetivos industriales.

También se insistió en que el sector público debe jugar un papel tractor, pero no puede asumir todo el riesgo.

Se reclamaron marcos que incentiven la inversión privada sin renunciar a la misión pública, incluyendo herramientas como las compras públicas innovadoras, los acuerdos de codesarrollo y una política clara sobre la propiedad intelectual generada en colaboración.

Por su parte, los inversores de capital riesgo presentes en el foro coincidieron en que **la fusión tiene potencial para atraer financiación privada masiva**, pero debe hablar el lenguaje de los fondos. Uno de los expertos advirtió que la fusión no puede esperar 30 años a tener un reactor comercial para generar retornos: hay que identificar modelos de negocio sostenibles a medio plazo, con escalabilidad e hitos intermedios claros.

Otro experto recordó que muchos inversores aún no comprenden la dinámica del sector, y pidió mayor transparencia, menos jerga técnica y propuestas más orientadas a resolver necesidades del mercado. En la misma línea, se propuso **explorar modelos híbridos entre lo público y lo privado, pero con una gestión profesionalizada del riesgo, y métricas de avance equivalentes a las de cualquier otro deep tech**.

El mensaje fue claro: la inversión no es un obstáculo, pero exige condiciones claras. Reducir la incertidumbre tecnológica, definir marcos regulatorios predecibles y demostrar tracción industrial son pasos imprescindibles para movilizar el capital privado que puede llevar a la fusión más allá del laboratorio.

## Talento

La transición hacia una energía de fusión comercial y escalable requerirá una nueva generación de profesionales altamente cualificados.

La magnitud del desafío es tal que, según estimaciones citadas por uno de los expertos, se necesitarán cientos de miles de trabajadores formados en los próximos diez años, incluyendo técnicos, ingenieros, operadores y científicos.

A diferencia de otras industrias tecnológicas, la fusión es en gran parte un campo de ingeniería clásica, por lo que muchas funciones pueden ser cubiertas por perfiles existentes (mecánicos, eléctricos, físicos aplicados) con programas formativos complementarios y prácticos.

Las universidades no están preparadas para responder rápidamente a esta demanda, debido a restricciones estructurales y presupuestarias. Se subrayó la necesidad de establecer alianzas público-privadas que permitan formar profesionales tanto desde el grado o doctorado, como mediante programas de reorientación profesional y formación continua. También se señaló que las universidades deben competir por talento con otras disciplinas STEM más consolidadas.

Los expertos coincidieron en que el sistema debe cambiar de paradigma, reconociendo distintos niveles de capacidades: desde los "usuarios" que operarán las plantas, hasta los "desarrolladores" que diseñarán los futuros sistemas de fusión.

La formación debe extenderse a países en desarrollo, donde se construirá gran parte de la nueva capacidad energética en las próximas décadas.

Los ponentes también abordaron el papel de la inteligencia artificial (IA) en esta transición: no solo como herramienta de aceleración tecnológica, sino como habilidad clave en la formación de futuros profesionales. Ya es habitual que los nuevos doctores en fusión utilicen técnicas de IA en su investigación, y se espera que esta tendencia crezca.

Finalmente, se destacó la importancia de **atraer talento desde otras industrias, como la aeroespacial o la automotriz, y de formar profesionales con capacidad no solo técnica, sino también de integración y operación de sistemas complejos**. Como resumió un participante en la discusión, "necesitamos menos expertos en ecuaciones y más pilotos capaces de volar el avión". La fusión necesita saber hacer.

## Regulación

El marco regulatorio será determinante para acelerar -o frenar- la llegada de la fusión como fuente viable de energía. Uno de los consensos del foro fue que no se puede extrapolar sin más la regulación nuclear de fisión a la fusión.

Como explicó uno de los expertos, aplicar marcos excesivamente prescriptivos puede disparar los costes y burocratizar el desarrollo sin mejorar la seguridad: "**la regulación debe enfocarse en los objetivos de seguridad, no en los medios exactos para alcanzarlos**".

Este experto advirtió contra repetir errores del pasado, donde requisitos excesivos encarecen de forma desproporcionada componentes idénticos a los usados fuera del ámbito nuclear.

Varios participantes defendieron que la fusión debería regularse de forma proporcional a sus riesgos, y propusieron armonizar los marcos regulatorios a nivel internacional, al estilo de la aviación civil, donde las licencias se reconocen mutuamente entre países.

Esta estrategia facilitaría la comercialización global y reduciría barreras de entrada, especialmente para países sin capacidad regulatoria propia. En este sentido, uno de los expertos destacó la importancia de marcos "**basados en desempeño**" que valoren la seguridad real y no listas rígidas de requisitos.

Aunque más exigentes en interacción y análisis, permiten adaptar la regulación a diseños diversos y tecnologías emergentes. También señaló que el diseño mismo puede adaptarse para facilitar la regulación, minimizando inventarios de tritio o reduciendo riesgos asociados a refrigerantes y materiales.

Sin embargo, otros expertos advirtieron que **una regulación excesivamente laxa en fases iniciales puede generar problemas más adelante**. Como apuntó uno de los participantes, un accidente -aunque improbable- podría comprometer la aceptación pública y política de la fusión. Por ello, subrayaron la necesidad de integrar la seguridad desde la fase de diseño para garantizar la viabilidad regulatoria a largo plazo.

En resumen, **la fusión necesita un marco regulador que equilibre agilidad y exigencia, que se adapte al riesgo real y evolucione con la tecnología**. Y, sobre todo, que permita a gobiernos e inversores avanzar con certeza, sin hipotecar la seguridad ni el futuro del sector.

## Perspectivas temporales

Una de las preguntas más repetidas en el foro fue cuándo podrá la fusión convertirse en una fuente real de electricidad en el mix energético global. Por un lado, las **startups del sector, como algunas participantes en el foro, proyectan reactores funcionales en menos de una década**, gracias a metodologías ágiles, inversión privada creciente y diseños más compactos.

Por otro, expertos con décadas de experiencia en grandes proyectos señalan los desafíos técnicos, regulatorios y logísticos que aún deben resolverse. Aunque no existe una única respuesta, el **consenso general fue que estamos entrando en una nueva fase, donde los primeros demostradores tecnológicos serán posibles en la próxima década**.

De entre los expertos asistentes, la mayor parte consideran que antes de 2045 se podría empezar a suministrar energía de fusión a la red eléctrica.

Para que esa promesa se convierta en realidad, será fundamental contar con una **estrategia clara, una financiación sostenida y una colaboración internacional** que incluya desde el inicio esquemas eficaces de colaboración público-privada (PPP).

Solo combinando el dinamismo del sector privado con la visión a largo plazo y las capacidades estructurales del sector público será posible transformar los avances científicos en una infraestructura energética operativa, escalable y segura. **La fusión ya no es una idea del mañana: es un proyecto en marcha, y el momento de definir su papel en nuestro sistema energético es ahora.**