

# Energía de Fusión: una revolución energética en marcha

Del avance científico al despliegue industrial

# Índice

- 01** LA ENERGÍA DE FUSIÓN Y EL DESAFÍO ENERGÉTICO GLOBAL:  
CONSTRUIR UNA INDUSTRIA VIABLE 📉
- 02** CÓMO ACELERAR EL DESPLIEGUE COMERCIAL DE LA FUSIÓN ●
- 03** COLABORACIÓN PÚBLICO-PRIVADA E INVERSIÓN 📈
- 04** HACIA UN MARCO REGULATORIO PARA LA FUSIÓN ⚖️
- 05** CAPITAL HUMANO PARA IMPULSAR LA INDUSTRIA DE LA FUSIÓN “
- 06** CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ↗️
- 07** ANEXO: TECNOLOGÍAS DE FUSIÓN E IMPACTO EN OTROS SECTORES ✨
- 08** GLOSARIO Y AGRADECIMIENTOS

# 01

**LA ENERGÍA DE FUSIÓN Y  
EL DESAFÍO ENERGÉTICO  
GLOBAL: CONSTRUIR UNA  
INDUSTRIA VIABLE**

# La energía de fusión y el desafío energético global: construir una industria viable

Toda la energía que conocemos tiene un origen común: la fusión. La energía solar, eólica, hidráulica, los combustibles fósiles... todas son manifestaciones derivadas de esa reacción fundamental que alimenta las estrellas. Si podemos reproducir en la Tierra el mismo proceso que hace brillar al Sol, ¿por qué depender de fuentes de energía intermediarias? La energía de fusión es el motor original del universo. Su potencial es inmenso: una fuente limpia, abundante y capaz de transformar para siempre nuestro sistema energético. Imaginemos encender en la Tierra un pequeño sol que pueda alimentar nuestras ciudades, industrias y hogares durante generaciones.

Pero alcanzar ese sueño no es sencillo. La humanidad se enfrenta a una encrucijada energética sin precedentes. La urgencia climática y la creciente demanda de energía -impulsada por el crecimiento poblacional, la industrialización del sur global y la irrupción de tecnologías intensivas en electricidad

como la inteligencia artificial- están tensando los límites del sistema energético actual. El paradigma basado en combustibles fósiles es incompatible con los objetivos de descarbonización globales, y las soluciones disponibles -renovables, eficiencia energética, redes inteligentes, almacenamiento de energía y fisión nuclear-, aunque esenciales, no bastan por sí solas.

En este contexto, la energía de fusión emerge como una opción estratégica transformadora, capaz de proporcionar grandes cantidades de energía limpia, razonablemente segura, abundante y firme. Por primera vez en la historia, la fusión ha dejado de ser una promesa distante para convertirse en una realidad tecnológica en gestación, con hitos científicos ya alcanzados y una industria incipiente en formación que avanza rápidamente. Es el momento de pasar del laboratorio al mercado, de la ciencia a la industria.

## 1. ¿Qué es la energía de fusión?

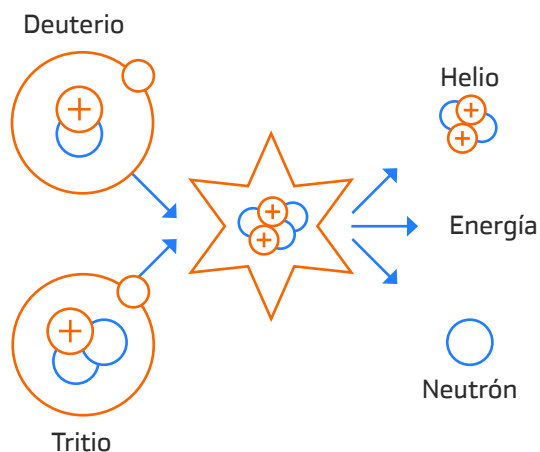
### ¿Qué es la fusión?

Es el proceso que ocurre en el Sol: **unir dos átomos ligeros de hidrógeno** para formar uno más pesado (helio). Al hacerlo, se libera una enorme cantidad de energía.

### ¿Cómo funciona?

Para lograrlo, se usan dos tipos especiales de hidrógeno (llamados isótopos)

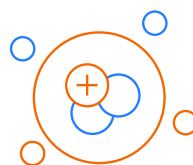
Deuterio, que se obtiene del agua.  
Tritio, que se genera dentro del propio dispositivo de fusión usando litio.



## 2. Proceso de Fusión

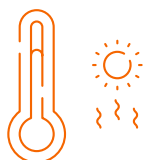


**01.** Se calienta esta mezcla a más de 100 millones de grados (como referencia son 15 millones el núcleo del sol)



**02.** A esa temperatura, los átomos se transforman en plasma: el cuarto estado de la materia.

El plasma es como un gas, pero sus partículas están tan calientes que se separan en cargas positivas y negativas (protones y electrones) que se mueven libremente.



**03.** En ese plasma, los núcleos de deuterio y tritio se fusionan y liberan una enorme cantidad de energía en forma de calor.



**04.** Ese calor se usa para generar electricidad, igual que en una central eléctrica convencional.

La gran diferencia es que no se quema nada ni se rompe un átomo, se unen y eso libera energía.

### ¿Por qué es especial?

No produce CO<sub>2</sub> ni residuos peligrosos a largo plazo.

Usa combustibles abundantes (agua y litio).

Con poco combustible se genera muchísima energía.

### ¿Qué retos tiene?

Mantener el plasma estable es muy complicado.

Los materiales deben resistir temperaturas extremas.

Hay que producir suficiente tritio para que el proceso sea autosuficiente.

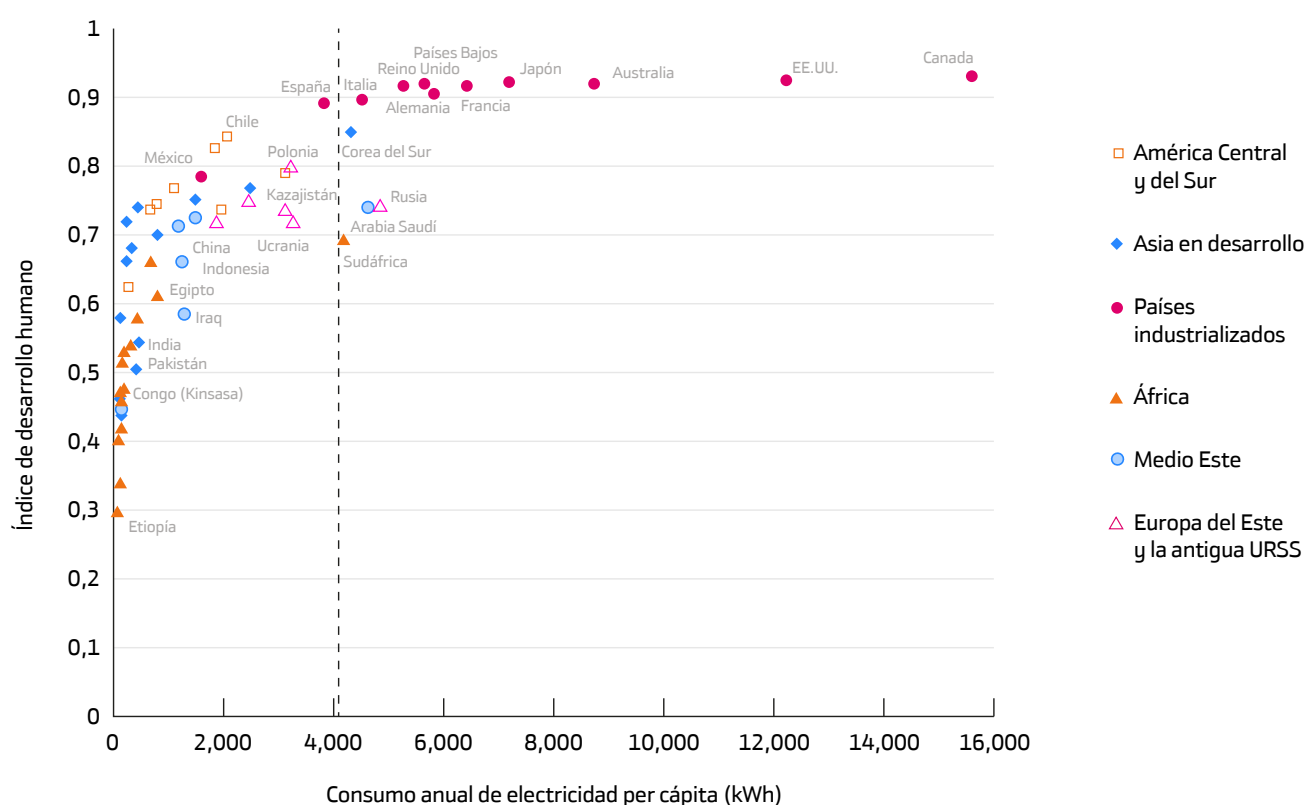
## 3. Diferentes Enfoques

Confinamiento magnético y Confinamiento inercial

Se detallan en el [Anexo](#)

## La urgencia energética del siglo XXI

Los datos son elocuentes. Para que cada habitante del planeta disfrute de una calidad de vida razonable -según los estándares del [Índice de Desarrollo Humano](#)- se requieren al menos 4.000 kWh per cápita al año. Hoy, miles de millones de personas están muy por debajo de ese umbral. Si asumimos una población global de 10.000 millones en 2050 y un consumo medio de 4.000 kWh/persona/año, la demanda energética global se triplicará. Este crecimiento no es opcional: es una condición para el desarrollo humano.



**Sin embargo, en las últimas décadas, la participación de los combustibles fósiles en el mix energético apenas ha disminuido.**

La reducción entre 2009 y 2019 fue de tan solo un 0,1%. Las renovables crecen, pero sufren de intermitencia y requieren costosas infraestructuras de respaldo y mecanismos de almacenamiento. Las redes eléctricas europeas, por ejemplo, no están preparadas para gestionar un mix 100% renovable sin enormes inversiones. Mientras tanto, la fisión nuclear se enfrenta a desafíos de aceptación social, residuos y riesgos vinculados a la fabricación de armamento nuclear a partir de residuos o materiales del ciclo de la fisión.

## De promesa a pilar: el papel estratégico de la fusión

La fusión puede desempeñar un **papel clave como pilar de un mix energético descarbonizado y resiliente**, complementando a las renovables y sustituyendo gradualmente a los fósiles. Sus ventajas potenciales son notables:

|                                     |                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Alta densidad energética</b>     | 50 gramos de litio (extraídos de 280 litros de tierra) y 12 gramos de deuterio (extraídos de 400 litros de agua) equivalen a 300 toneladas de petróleo, el consumo energético de toda una vida de un ciudadano europeo según Carlos Alejaldre. |
| <b>Emisiones cero en operación</b>  | Sin CO <sub>2</sub> , sin residuos de alta actividad ni riesgo de proliferación nuclear.                                                                                                                                                       |
| <b>Versatilidad de aplicaciones</b> | Generación eléctrica, producción de hidrógeno verde, calor para procesos industriales, neutrones para medicina y materiales.                                                                                                                   |
| <b>Escalabilidad y estabilidad</b>  | Energía firme, predecible y con bajo uso de superficie.                                                                                                                                                                                        |

Como subraya [Carlos Alejaldre](#), Presidente del Consejo de Gobernanza de [Fusion for Energy](#) y referente internacional en energía de fusión: "La fusión puede sustituir completamente a los combustibles fósiles". Además de su valor energético y climático, la fusión representa una **ventana de oportunidad industrial sin precedentes**.

Solo en la construcción de [ITER](#)<sup>1</sup>...

**+ 2.000 empresas**

europeas participan ya en el desarrollo de componentes, materiales avanzados y sistemas críticos

**+ €7.000 mill.**

en contratos adjudicados

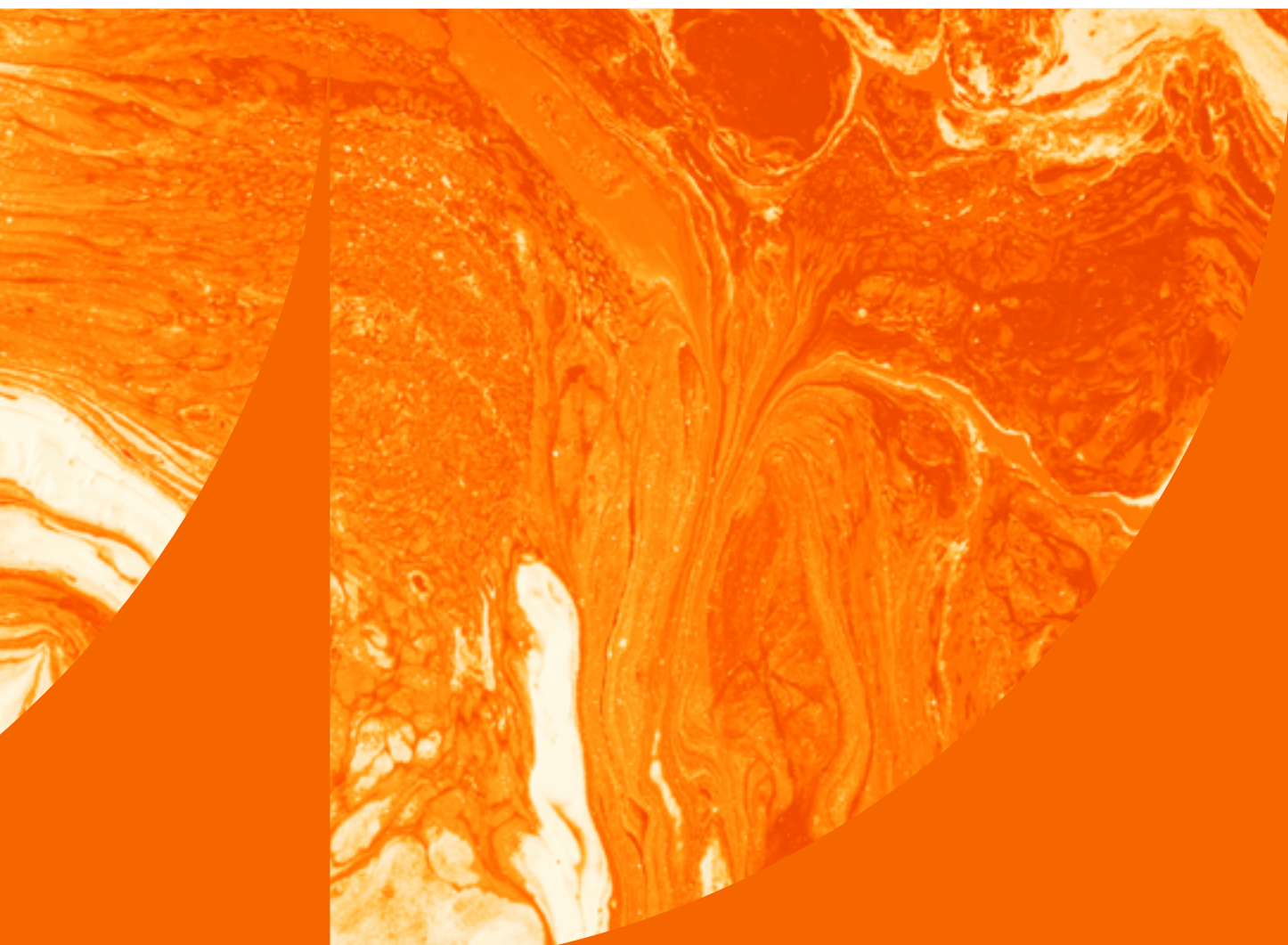
Fuente: [https://fusionforenergy.europa.eu/wp-content/uploads/2025/06/F4E\\_Observatory\\_Report\\_1\\_Private\\_Sector.pdf](https://fusionforenergy.europa.eu/wp-content/uploads/2025/06/F4E_Observatory_Report_1_Private_Sector.pdf)

<sup>1</sup> Proyecto internacional de Fusión. Más información en la [página 10](#)

La creación de una cadena de suministro robusta para la fusión no solo es necesaria, sino que puede convertirse en uno de los **motores industriales estratégicos de Europa** en las próximas décadas.

Esta visión estratégica de la fusión como elemento clave en el futuro energético europeo y global está respaldada por trabajos como el informe ["A systemic approach to the energy transition in Europe"](#). Este estudio subraya que alcanzar los objetivos de descarbonización del Acuerdo de París no será posible sin considerar la fusión. Además, defiende la necesidad de una aproximación sistémica que integre capacidades industriales, tecnológicas y de formación, situando a Europa en una posición de liderazgo si se movilizan los recursos adecuados desde ahora.

Esta oportunidad también se expone en el [documento](#) recientemente publicado por [Clean Air Task Force](#) sobre una estrategia para la energía de fusión en Europa, donde siguiendo las indicaciones del informe Draghi sobre la competitividad en Europa, se señala la estrategia a seguir para construir un sector industrial para la energía de fusión que pueda competir a nivel global y que a su vez sea un motor para el crecimiento en el continente.



## Acelerando el futuro: de la ciencia a la industria

En los últimos años se han producido avances científicos espectaculares y también un compromiso creciente en inversiones públicas y privadas que están construyendo la base industrial necesaria.

Este esfuerzo combinado está permitiendo que la fusión salga de los laboratorios y se acerque a su despliegue comercial:

**1****NIF - EE.UU.**

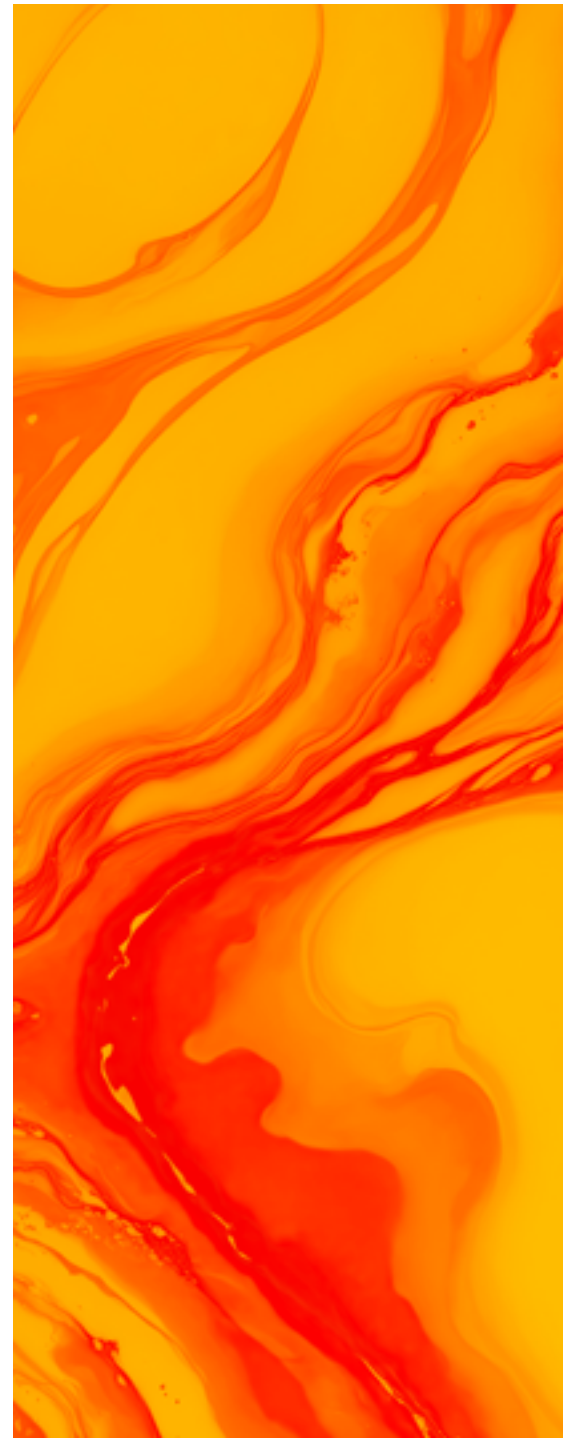
El 5 de diciembre de 2022 se alcanzó la primera ignición científica - momento en el que una reacción de fusión produce más energía de la que se introduce en el combustible para iniciarla-. Es un hito porque demuestra que el proceso puede ser autosostenido. (3,15 MJ<sup>1</sup> obtenidos de 2,05 MJ, ganancia<sup>1</sup> ~1,5). Desde entonces, se han realizado múltiples disparos destacados hasta el último, el 7 de abril de 2025 con una ganancia récord<sup>2</sup> ~4,13 (8,6 MJ).

**2****UE y Reino Unido**

En 2022 se alcanzó un récord mundial de 59 MJ de energía de fusión generada en una sola descarga en el [Joint European Torus \(JET\)](#). Este resultado, conseguido en colaboración entre la Unión Europea y el Reino Unido, demostró que es posible mantener el plasma estable durante periodos más largos, un paso esencial hacia la viabilidad comercial de los dispositivos tipo tokamak.

<sup>2</sup>MJ: megajulio. 1 megajulio equivale a 1 millón de julios. O para entenderlo mejor, a la energía necesaria para hervir aproximadamente 3 litros de agua.

<sup>3</sup>Ganancia: también se llama factor Q. Indica cuánta energía se obtiene en relación con la que se inyecta en el combustible. Ejemplo: una ganancia de 1,5 significa que se obtuvo un 50% más de energía de la que se introdujo.



3

**ITER (Internacional)**

El mayor experimento energético de la historia, con participación de siete potencias globales, avanza hacia su fase operativa. El **coste del ITER se estima entre 18.000–20.000 M€**. ITER es un avance decisivo porque será el primer dispositivo de fusión capaz de producir de forma sostenida más energía de la que consume para mantener el plasma. Además, permitirá validar a gran escala tecnologías clave como el confinamiento magnético, los sistemas de extracción de calor y la producción de tritio.

“ITER: La mayor colaboración científica-industrial de la historia”

**18.000–20.000 M€**

4

**IFMIF-DONES (España)**

Infraestructura clave a nivel mundial para ensayar y cualificar materiales sometidos a radiación intensa, paso indispensable hacia la construcción de **DEMO**<sup>4</sup>. Con sede en Granada y liderazgo español, el proyecto avanza como una de las piedras angulares del ecosistema tecnológico europeo en fusión. Recientemente la Comisión Europea ha aprobado una inversión de 202 millones de euros a través de **Fusion for Energy (F4E)** para la construcción y puesta en marcha del acelerador de partículas **IFMIF-DONES**, lo que representa aproximadamente el **25% del coste total del proyecto**.

<sup>4</sup>DEMO (por DEMONstration Power Plant) es el siguiente gran paso en el desarrollo de la energía de fusión, y será el sucesor de ITER. DEMO será la primera planta de energía de fusión que generará electricidad, aunque aún no con fines comerciales. Su objetivo es demostrar que la fusión no solo es posible, sino también útil y sostenible a gran escala.

## 5

## Inversión privada y capital de riesgo

La industria privada de fusión ha alcanzado hitos destacables. A mediados de 2024, se habían recaudado **más de 7 mil millones de dólares**. A 30 de junio de 2025, la cifra llegó a **10.74 mil millones de dólares en inversión privada exclusiva**. Destacan iniciativas como la **ronda de €130 M** conseguidos por **Proxima Fusion** en Alemania en junio de 2025, uno de cuyos fundadores, **Lucio Milanese**, participó en nuestro foro. Además, en agosto de 2025, Commonwealth Fusion Systems (CFS) cerró una ronda Serie B2 de financiación por valor de aproximadamente \$863 millones, lo que eleva su inversión total a casi 3 mil millones de dólares —una parte significativa del capital global en empresas privadas de fusión.

Alejandre lo resume así: “La física de plasma ya ha cumplido su papel: ahora entramos en la era tecnológica de la fusión”. El reto ya no es demostrar que la fusión funciona, sino construir máquinas reales que puedan operar de forma segura, competitiva y regulada.

Este impulso hacia la industrialización de la fusión tiene que ser tecnológico y también organizativo. Un ecosistema global empieza a tomar forma, integrando actores públicos y privados, centros de investigación, startups, grandes proveedores y utilities energéticas. Su consolidación será clave para acelerar el desarrollo y construir una cadena de valor capaz de sostener una industria de fusión competitiva, segura y escalable. Este aspecto -el ecosistema industrial emergente- será abordado con mayor detalle en los próximos capítulos.

Como vemos, la fusión está avanzando rápidamente, pero sigue siendo poco conocida fuera del propio ecosistema de fusión. Como dice **Richard Pearson**, quien en el momento de la celebración del foro en junio trabajaba como CTO en **Kyoto Fusioneering**, “cuando hablo sobre fusión con personas del mundo empresarial, me doy cuenta de que no saben lo que está pasando”.

## Carlos Alejandre

▶ Ver vídeo



La percepción externa puede frenar el desarrollo tanto como cualquier barrera técnica. Por eso, es fundamental comunicar con claridad los avances y el potencial de esta tecnología, generando la confianza necesaria para atraer inversión, talento y apoyo social. Este informe nace con la intención de contribuir a que la sociedad y los decisores comprendan el verdadero potencial de la fusión.

El mensaje es claro: hemos cruzado el umbral científico. Es momento de pasar del discurso a la acción, de construir una industria real, robusta y global en torno a una de las mayores oportunidades tecnológicas de nuestro tiempo.

## La necesidad de una visión estratégica para la fusión

**Sehila González**, Directora global de Energía de Fusión en Clean Air Task Force, afirma que la energía de fusión ya no es una promesa lejana, sino el resultado de 70 años de avances científicos sostenidos. Frente a quienes ven una "burbuja", argumenta que la situación actual responde a una combinación inédita de madurez tecnológica, herramientas disruptivas y presión social por soluciones climáticas firmes y limpias.

**González** recalca que la fusión cumple con los requisitos clave de la transición energética: es cero carbono, firme y escalable. También señala que el cambio de paradigma hacia la comercialización -impulsado por el sector privado- está transformando la forma en que físicos, ingenieros y empresas abordan los retos pendientes.

Para ella, el reto ya no es técnico; es de decisión y paso a la acción: con las herramientas disponibles, se pueden desplegar plantas piloto en los próximos años y tener multitud de plantas operativas antes de 2050. No hay excusas para no lograrlo.

Su mensaje final es claro: la fusión no es un sueño, es una carrera que estamos ganando. Pero para cruzar la meta, necesitamos visión estratégica, colaboración global y acción decidida hoy.

### Sehila González

 Ver video



## Fundamentos y tecnologías de la energía de fusión

La fusión no es una "caja negra". Es un fenómeno físico extremadamente complejo que, para ser viable, requiere superar aún retos científicos y tecnológicos. Comprender estos desafíos es clave para evaluar la madurez de las soluciones propuestas, los riesgos tecnológicos y el horizonte temporal realista para su despliegue.

Por ello, se incluye como ANEXO un bloque técnico que ofrece al lector una visión clara, concisa y visual de las condiciones necesarias para lograr la fusión, los principales enfoques tecnológicos, los retos técnicos pendientes, y un análisis del impacto que pueden tener las tecnologías que se están desarrollando para la fusión en otros sectores.

Este contenido técnico proporciona las claves para responder a preguntas como:

- ¿Qué tecnologías están más cerca de ser comercialmente viables?
- ¿Por qué los materiales y la ingeniería del sistema son tan importantes?
- ¿Qué implica un anuncio de "ignición"?
- ¿Qué oportunidades abre la fusión para sectores industriales estratégicos?

Si desea reforzar su comprensión sobre la base científica de esta revolución energética y su potencial transformador, le invitamos a consultar el [Anexo: Tecnologías de Fusión e Impacto en otros sectores](#), al final de este informe.





# 02

**CÓMO ACELERAR EL  
DESPLIEGUE COMERCIAL  
DE LA FUSIÓN**

# Cómo acelerar el despliegue comercial de la fusión

El despliegue comercial de la energía de fusión no depende solo de resolver los retos científicos. Requiere construir una industria sólida, conectar con mercados reales y hacerlo en plazos competitivos.

Este capítulo aborda los factores clave para transformar los avances tecnológicos en una industria global y escalable, con cuatro ejes principales:

- 1.- La **cadena de suministro** como cuello de botella industrial.
- 2.- Las **tecnologías habilitadoras** que pueden acelerar el desarrollo desde otros sectores punteros.
- 3.- El **mercado potencial de la fusión**, más allá de la electricidad.
- 4.- Los **calendarios de despliegue**, tanto públicos como privados, que marcarán el ritmo de llegada al mercado.

## 2.1 La cadena de suministro: El cuello de botella industrial

Convertir la energía de fusión en una realidad comercial requiere **construir, desde ya, una cadena de valor industrial sólida, escalable y confiable**. La experiencia acumulada en proyectos como ITER ha demostrado que los retos clave están, además de en los laboratorios, en talleres, fábricas y cadenas logísticas.

En este sentido, **Klaus Hesch** (KIT) fue claro: "La madurez industrial no llegará por accidente: hay que diseñarla desde el principio". Propone una **hoja de ruta industrial específica para la fusión**, articulada en torno a tres fases: entender qué capacidades industriales existen ya, construir capacidades que aún faltan, y usar la cadena de suministro para aprender, escalar y competir. Hesch subraya que muchas empresas no entrarán en el sector solo por convicción técnica: necesitan una visión de mercado creíble, contratos sostenibles y colaboración estructurada.

Por su parte, **Miguel Ángel Carrera**, fundador y CEO de **AVS**, refuerza esta idea desde su experiencia participando en proyectos clave como ITER, IFMIF-DONES o MITICA, además de una amplia trayectoria en entornos tecnológicos afines: "Diseñar no basta. Hay que construir. Y eso requiere una industria viva, capacitada y diversificada". Desde los primeros prototipos hasta las plantas comerciales, se requiere una cadena de suministro que evolucione con la madurez tecnológica y se ajuste a los requisitos regulatorios.

**Carrera** subraya que la industria necesita mantenerse activa y diversificada mientras madura el ecosistema de fusión. De ahí su apuesta por una **estrategia transversal**, basada en la colaboración público-privada, la participación en múltiples sectores y el diseño de sistemas que puedan evolucionar desde la I+D hasta producción industrial.

Además, insiste en la necesidad de **alianzas estratégicas a largo plazo**, estándares de calidad adaptados al sector fusión, y plataformas que permitan **transferencia tecnológica e innovación abierta**. Como apunta:

**"Lo que compras nunca lo has comprado antes. Y lo que diseñas nunca lo has diseñado antes. Solo la confianza permite cerrar esa brecha".**

Concretando esta visión, **David Zaragoza**, director de Fusión en **IDOM**, recalca: "La dificultad no está en construir una máquina. Está en construir una industria de la fusión". **IDOM** ha participado en más de 170 proyectos relacionados con la fusión, tanto públicos (como **JET**, **ITER**, **DEMO** o **IFMIF-DONES**) como privados. **IDOM** es, además, socio fundador de **Gauss Fusion**, lo que refuerza su compromiso con la industrialización de la fusión más allá del rol de proveedor técnico.

## Erik Fernández

▶ Ver vídeo



Desde una doble perspectiva -el largo recorrido y la oportunidad histórica-, [Erik Fernández](#), director general de la [Asociación Española de la Industria de Ciencia \(INEUSTAR\)](#) subraya que: "El éxito de la cadena de valor española se ha cimentado sobre 30 años de colaboración público-privada con el CIEMAT, y 15 años de trabajo conjunto en el marco de INEUSTAR. Una asociación industrial sólida permite hablar con una sola voz, generar confianza con el sector público y compartir riesgos. Es una herramienta estratégica, no un simple lobby".

INEUSTAR representa a un ecosistema que ha evolucionado desde la fabricación de componentes científicos únicos a entornos de producción más industrializados. Según [Fernández](#), la transición actual -de los prototipos de laboratorio a sistemas competitivos y escalables- exige nuevas estrategias: alianzas duraderas, estabilidad de mercado, y sobre todo una visión compartida entre ciencia, industria e instituciones.

En este sentido, iniciativas como la participación de IDOM en **Gauss Fusion**, o la diversificación de AVS hacia sectores como espacio, sincrotrones o aceleradores, ilustran un **nuevo modelo de actor industrial: transversal, resiliente y proactivo**. Fernández defiende que esta capacidad de adaptación debe consolidarse en un marco de colaboración estable, que incluya plataformas de prueba, mecanismos de codesarrollo tecnológico y un flujo bidireccional de talento entre centros públicos y empresas

## Miguel Ángel Carrera

▶ Ver vídeo



## David Zaragoza

▶ Ver vídeo



## Fernández identifica cuatro factores críticos que deben abordarse ya:

- La necesidad de mejorar la comunicación, tanto entre actores del ecosistema como hacia la sociedad.
- La creación de relaciones de confianza reales entre centros de investigación y empresas, superando culturas organizativas distintas.
- La garantía de disponibilidad tecnológica en sectores con picos de demanda y cadenas críticas frágiles.
- Y la formación de talento técnico altamente cualificado que permita sostener el crecimiento del sector.

Aportando una mirada internacional y orientada a la innovación, **Itxaso Ariza** (Tokamak Energy) alerta sobre la necesidad de hacer atractiva esta industria para nuevos actores. Con una trayectoria híbrida entre innovación tecnológica y desarrollo industrial, esta experta destaca que el éxito de la fusión va a depender de la capacidad para construir un **ecosistema industrial abierto, eficiente y competitivo**. Subraya que muchas tecnologías habilitadoras ya existen fuera del sector de la fusión, en campos como la aeronáutica o el espacio, y que la clave está en atraerlas al entorno de la fusión con inteligencia.

**"Necesitamos bajar las barreras de entrada. No podemos esperar que empresas con capacidades críticas entren solas. Hay que darles razones, apoyo y visibilidad".**



## Propone tres líneas de acción:

- 1 Desarrollar plataformas compartidas de prueba y certificación para acelerar la cualificación industrial
- 2 Crear esquemas de inversión público-privada que repartan el riesgo tecnológico
- 3 Diseñar una narrativa ambiciosa que permita atraer talento joven y empresas de alto valor añadido

También puso énfasis en integrar a pymes tecnológicas con soluciones transversales, actualmente fuera del radar de fusión, pero esenciales para escalar el sistema. Ariza insiste en que se trata de generar un entorno de innovación orientado a producto, con ciclos rápidos, estándares claros y visibilidad internacional.

**"El reto no es construir un ITER más. Es construir muchas máquinas, con fiabilidad, costes asumibles y en serie".**

En resumen, la cadena de suministro es hoy uno de los principales cuellos de botella para escalar la fusión. Superarlo exige planificación industrial, políticas públicas activas, asociaciones estratégicas a largo plazo y una narrativa que movilice talento, inversión y compromiso empresarial.

## Itxaso Ariza

 [Ver vídeo](#)



## 2.2 Tecnologías habilitadoras: palancas externas

El desarrollo de una cadena de suministro robusta no será suficiente si no se aprovechan las tecnologías avanzadas ya disponibles en otros sectores punteros. **Itxaso Ariza** (Tokamak Energy) explica que muchas tecnologías habilitadoras ya existen fuera del sector -en la aeronáutica, el espacio o la automoción- y que el reto está en atraerlas al ecosistema de la fusión. Propone facilitar la entrada de empresas con capacidades clave en digitalización, sensores avanzados o automatización, hoy fuera del sector de fusión, mediante plataformas compartidas de prueba, esquemas de coinversión y estándares industriales claros.

La [inteligencia artificial](#) y la **simulación digital** están transformando la forma en que se diseñan y validan los diseños de máquinas de fusión. **Pablo Rodríguez** (MIT) explica cómo los avances recientes en modelos físicos de primer principio, aceleración por GPU e inteligencia artificial permiten predecir con fiabilidad el rendimiento del núcleo del plasma. Este salto cualitativo abre la puerta a diseños optimizados desde la física, y no solo desde extrapolaciones empíricas.

La [inteligencia artificial física o Embodied AI](#), que combina algoritmos de IA con capacidades robóticas, sensores avanzados y sistemas autónomos, ha sido señalada como una palanca crítica para el **mantenimiento remoto y la inspección en condiciones extremas**. Este enfoque, analizado en profundidad en una [edición anterior del Future Trends Forum](#), permite automatizar tareas complejas y garantizar la seguridad operativa en entornos donde la intervención humana directa es inviable.

La **experiencia espacial también aporta lecciones aplicables**. [Charles Bolden](#), ex-administrador de la NASA, fundador y consejero delegado emérito de The Charles F. Bolden Group LLC y Patrono de la Fundación Innovación Bankinter, defendió la necesidad de sistemas que puedan ser operados y mantenidos a distancia, inspirados en la operación de sondas, satélites y estaciones espaciales. Estas soluciones permiten afrontar los retos de mantenimiento en entornos extremos sin intervención humana directa, algo crucial para las máquinas de fusión.

El **concepto de gemelos digitales** es mencionado por varios expertos como una herramienta clave para validar diseños y planificar operaciones.

**Miguel Ángel Carrera (AVS) apunta la necesidad de “diseñar desde la pantalla”, con entornos simulados que repliquen las condiciones de operación reales antes de la fabricación física. Esta aproximación permite ahorrar costes, anticipar problemas y acelerar la iteración tecnológica.**

Ámbitos como la criogenia, el control de haces, el vacío extremo o la instrumentación de alta precisión son desafíos comunes, ya abordados en proyectos como el [LHC](#) (Large Hadron Collider), el mayor acelerador de partículas del mundo, situado en un túnel subterráneo de 27 kilómetros en la frontera entre Suiza y Francia). Además, aporta la experiencia del [CERN](#) (Organización Europea para la Investigación Nuclear), el principal laboratorio internacional de física de partículas) como modelo de gestión para infraestructuras científicas complejas que aspiran a convertirse en industrias.

Finalmente, la **fisión nuclear también deja lecciones valiosas**. Carrera dice que la cultura de seguridad, la operación remota y los sistemas modulares desarrollados en fisión deben ser considerados desde el inicio en la fusión. No se parte de cero: se puede -y se debe- aprender de sectores que ya han recorrido ese camino.

En conjunto, se dibuja una conclusión clara: la fusión no debe inventarlo todo. Integrar tecnologías habilitadoras externas es imprescindible para acelerar su despliegue, reducir costes y ganar en fiabilidad industrial. En resumen:

| Tecnología                            | Origen / Sector de referencia                  | Aplicación en fusión                                                                        |
|---------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Inteligencia Artificial (IA)          | Ciencia de datos, física computacional         | Predicción del rendimiento del plasma, optimización de diseño, análisis de datos operativos |
| Gemelos digitales                     | Ingeniería aeroespacial, automoción            | Simulación de operaciones, planificación de operaciones, testeo previo a fabricación        |
| Embodied AI (IA física)               | Robótica, espacio, automatización              | Mantenimiento remoto, inspección en zonas hostiles, operación autónoma                      |
| Fabricación aditiva                   | Industria 4.0, automoción                      | Producción de componentes complejos, reducción de tiempos de ensamblaje                     |
| Digitalización de sistemas de control | Nuclear, aeroespacial                          | Automatización de procesos, seguridad operacional, telemetría en tiempo real                |
| Gestión avanzada de proyectos         | CERN, fisión nuclear, grandes infraestructuras | Coordinación técnica, modularidad, control de calidad, escalabilidad                        |
| Lecciones desde la fisión nuclear     | Nuclear civil                                  | Seguridad, diseño modular, operación remota, licenciamiento                                 |

## 2.3 Construyendo un mercado para la fusión

La electricidad es solo una de las posibles aplicaciones de la fusión. Varios expertos coinciden en que la fusión también puede suministrar calor de proceso, esencial para sectores industriales como el acero, el cemento o la química pesada, donde la electrificación directa es inviable. Abre también oportunidades para la producción de [hidrógeno verde](#) a gran escala, mediante electrólisis o procesos termoquímicos, y genera flujos de neutrones rápidos que podrían revolucionar la gestión de residuos nucleares, la producción de isótopos médicos o el desarrollo de nuevos materiales.

Desde una perspectiva estratégica, expertos en inversión en energía ofrecen una reflexión de fondo:

**"Con la fusión, la energía deja de estar atada a la escasez de recursos naturales".**

Esta disociación implica una revolución en el modelo de desarrollo humano: posibilita un mundo donde la energía deja de ser un factor limitante del desarrollo. Los expertos nos recuerdan lo que decíamos al arranque de este informe: si todos los habitantes del planeta consumieran electricidad al nivel de los países de la OCDE, se necesitarían 25 teravatios -más del triple del consumo global actual-, lo cual sería inviable con combustibles fósiles. Con fusión, es posible. La fusión, por tanto, responde también a una aspiración de **equidad energética a escala global**.

Este salto es aún más urgente por la aparición de **nuevas fuentes de demanda energética**. Los expertos advierten que el despliegue de inteligencia artificial y computación intensiva podría suponer el 10 % del consumo eléctrico de EE. UU. en 2035, sin contar la electrificación masiva del transporte, la industria o los centros de datos. En su visión, la fusión es más que una solución climática; es una **apuesta por la abundancia sostenible**: una economía global no constreñida por los recursos energéticos, que habilita todo lo demás -desarrollo, innovación, equidad, estabilidad-.

Las **estimaciones actuales** del mercado global de fusión **superan los 800.000 millones de euros en los próximos 20 años**, dependiendo del grado de penetración, las políticas de descarbonización y el avance de otras tecnologías competidoras. Pero el verdadero reto es cómo convertir esta expectativa en una **demanda organizada y sostenible**.

Aquí es donde entra en juego la cadena de suministro. Como ya se ha discutido en el apartado anterior, muchos actores industriales aún no ven con claridad cómo encajar sus capacidades en esta nueva industria. La conexión entre **la oferta tecnológica -lo que las startups y centros de investigación están desarrollando-** y **la demanda -lo que sectores industriales necesitan-** debe organizarse mejor.

Esto exige **mecanismos de coordinación** que alineen las hojas de ruta tecnológicas con las cadenas de valor industriales. Se trata de **alinear capacidades reales con casos de uso concretos**, marcos regulatorios claros y modelos de negocio viables. En definitiva, la cadena de suministro es el puente crítico entre la capacidad de producir y la capacidad de servir a un mercado real.

También se subraya el papel creciente de **inversores y reguladores** (**ver capítulo 3**). La mayoría de los fondos busca claridad de mercado, visibilidad tecnológica y marcos de colaboración estables. Varios ponentes insisten en que los inversores solo se movilizan por señales claras de viabilidad técnica y demanda futura. En este sentido, los reguladores (**ver capítulo 4**) pueden desempeñar un papel clave estableciendo **incentivos, garantías y estándares** que reduzcan el riesgo de entrada para actores privados.

Finalmente, se remarca la necesidad de narrativas más realistas. En lugar de prometer una red eléctrica 100% alimentada por fusión en 2035, se trata de **mostrar aplicaciones parciales, mercados intermedios y beneficios paralelos**. Desde el calor industrial al tritio, pasando por sistemas de refrigeración criogénica, **la fusión tiene muchos mercados objetivo**. El reto es articularlos con inteligencia.

**En definitiva, la fusión no necesita esperar a que aparezca un mercado: será el catalizador de un mercado nuevo y masivo.**

Su capacidad para suministrar energía abundante y limpia, generar nuevos vectores energéticos y multiplicar oportunidades industriales puede transformar la economía global.

Si el ecosistema sabe organizarse ahora --alineando cadenas de suministro, reguladores, inversores y usuarios-, el día que un dispositivo de fusión operativo demuestre su viabilidad, **la fusión se convertirá en el mayor motor de crecimiento energético e industrial de nuestra era**.

## 2.4 Calendarios de desarrollo de la fusión

El calendario para el despliegue de la energía de fusión difiere notablemente según el enfoque tecnológico y el tipo de actor implicado. En términos generales, puede distinguirse entre tres etapas clave:

- 1** **Prototipos:** dispositivos experimentales orientados a demostrar aspectos críticos de la física y la ingeniería.
- 2** **Plantas piloto:** instalaciones que buscan operar con producción neta de energía, validando sistemas completos con conexión a red.
- 3** **Plantas comerciales:** instalaciones industriales con funcionamiento continuo, coste competitivo y cumplimiento normativo.



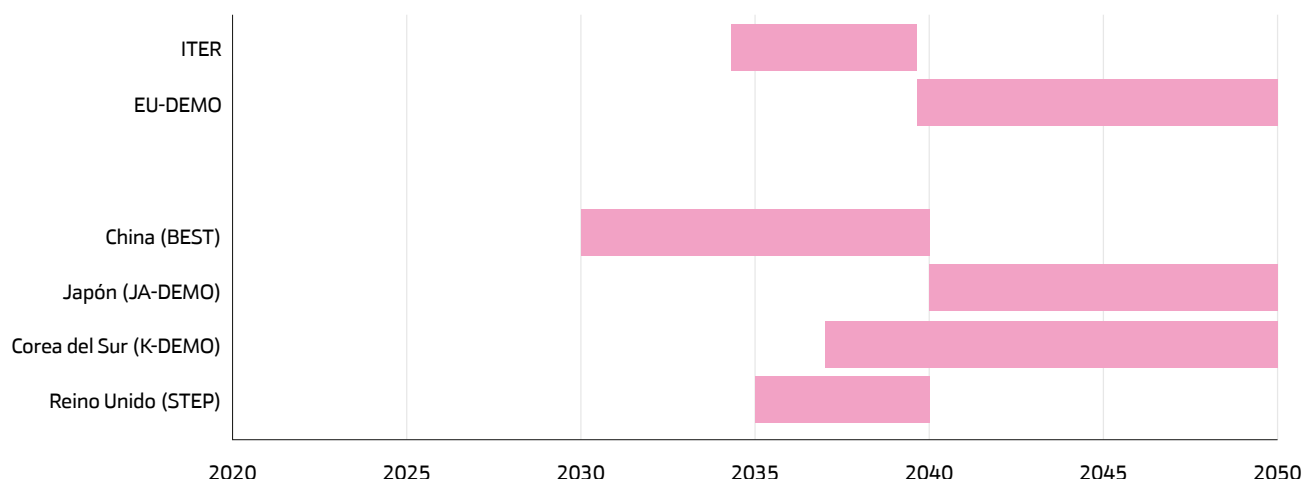
En el ámbito público, donde se manejan escalas de tiempos más conservadoras, **ITER** prevé comenzar operaciones con plasma en 2034 con ensayos de fusión de deuterio-tritio en torno a 2039. A partir de ahí, se avanzará hacia **EU-DEMO** como sucesor de **ITER**, con ambiciones de operar alrededor de **2050**, generando entre **3 y 4 GW térmicos** para demostrar tanto la viabilidad técnica como la autosuficiencia en tritio. Respecto a otras iniciativas públicas alrededor del mundo, tenemos:

**China** Está construyendo **BEST**, una maquina capaz de generar tritio como paso anterior al **CFETR**, una maquina tipo DEMO que consolidaría su tecnología entre 2030 y 2040. Estos desarrollos se apoyan en la experiencia acumulada con el proyecto **EAST**, el tokamak experimental en Hefei que ha alcanzado récords mundiales en confinamiento de plasma y que sirve como banco de pruebas clave para las futuras instalaciones.

**Japón** Trabaja en el **JA-DEMO**, previsto para la **década de 2040–2050**, enfocado en generación estable de cientos de megavatios y autosuficiencia en tritio, bastante similar al EU-DEMO.

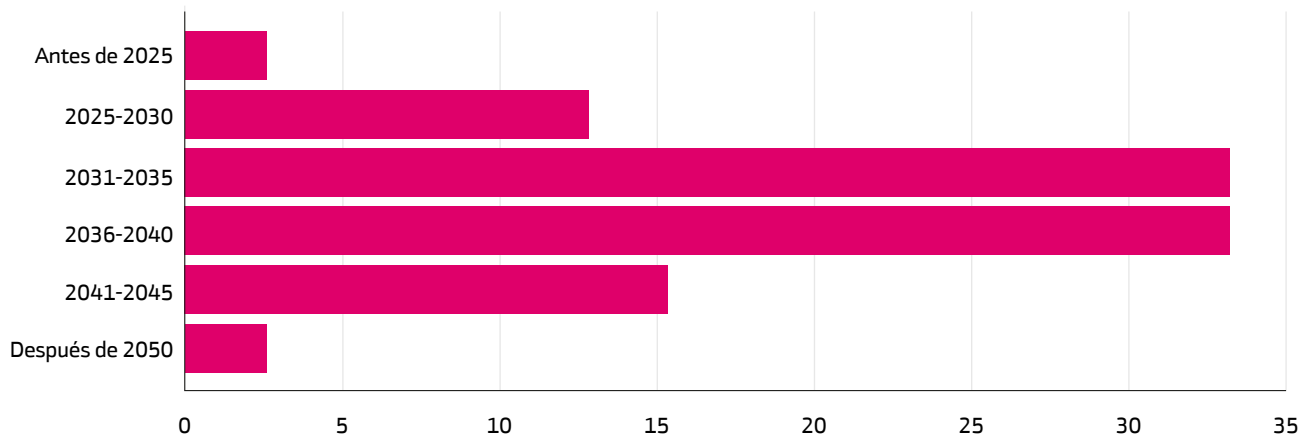
**Corea del Sur** Desarrolla el **K-DEMO**, con diseño conceptual desde 2012, construcción iniciada posiblemente en **2037** y conexión a red proyectada hacia **2050**.

**Reino Unido** Esta trabajando en el proyecto **STEP**, que está previsto que alcance un plasma autosostenido en 2035. STEP tiene como objetivo producir electricidad neta a partir de la fusión en 2040. Producirá 100 MWe y producirá su propio tritio (breeding).



Varios países (EE.UU., India, Rusia, entre otros) también tienen iniciativas propias en diferentes etapas de desarrollo, a menudo bajo enfoques nacionales o colaboración público-privada.

Sin embargo, los plazos del sector privado son más ambiciosos. Según se desprende de la reciente encuesta de la Fusion Industry Association, más del 50% de las startups espera que la viabilidad comercial de una planta de fusión sea antes de 2035 y una abrumadora mayoría, pronostica la viabilidad comercial antes de 2040.



Las startups representadas en el foro marcan hitos relevantes ya desde 2026:

**Tokamak Energy** Planea tener su dispositivo ST80 HTS listo en 2026 y que su siguiente planta piloto, ST E1, esté diseñada para entregar electricidad a la red a comienzos de los años 30.

**Xcimer Energy:** Planea validar su prototipo láser Phoenix en 2026, conseguir que el dispositivo inercial genere tanta energía neta como la que se usa para hacerlo funcionar en 2030 y lanzar su primera instalación comercial en 2035.

**Renaissance Fusion** Está inmersa en un desarrollo intensivo de paredes líquidas de metales (litio/galinstano) para stellarators, con prototipos de laboratorio en funcionamiento desde 2023 y objetivos de evolución técnica hasta 2027. Estas estructuras cumplen funciones críticas -blindaje neutrónico, extracción de calor y breeding de tritio- pero no implican en sí mismos una conexión a red ni una fase de demostración energética directa.

**Kyoto Fusionneering** Se centra en la puesta en marcha de sus instalaciones UNITY 1 y UNITY 2 en 2026, fundamentales para el desarrollo del ciclo térmico y del combustible tritio. Su objetivo es alimentar plantas piloto de fusión —propuestas en la última parte de la década de 2020— con tecnologías probadas en pruebas integradas.

**Gauss Fusion** Proyecta su fase de ingeniería entre 2026–2032, seguido de construcción entre 2031–2038 y primeras operaciones entre 2037–2044, con la ambición de convertirse en la primera planta de fusión de 1 GW conectada a red en mediados de los 2040s.

**Proxima Fusion** Avanzará con su demostrador Stellarator Model Coil (SMC) en 2027, seguido del prototipo Alpha en 2031, destinado a alcanzar ganancia neta ( $Q > 1$ ), y aspira a conectar su planta comercial a la red en algún momento de la década de 2030.

Y otras startups destacadas a nivel mundial también tienen planes en la misma dirección:

**Commonwealth  
Fusion Systems (CFS)**

Lleva adelante el proyecto [SPARC](#), que apunta a producir su primer plasma en 2026 y alcanzar ganancia neta de energía ( $Q>1$ ) en 2027. El siguiente paso es construir la planta ARC de 400 MW para conexión a red prevista a principios de los 2030s.

**Helion Energy**

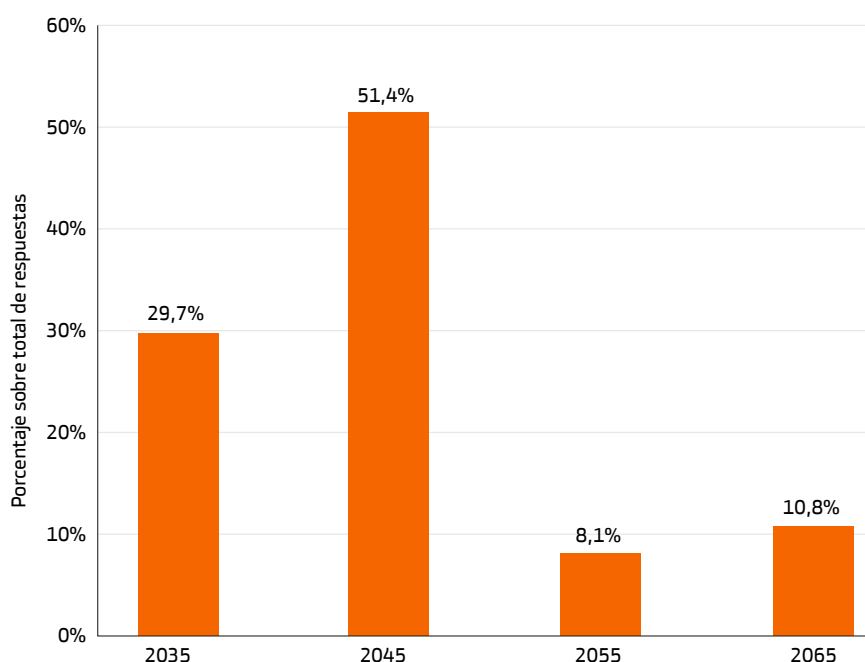
Con un compromiso firmado con Microsoft para vender energía de fusión a partir de 2028, pretende poner en marcha su máquina Polaris ese mismo año, logrando una entrega directa de electricidad a la red.

**TAE Technologies**

Ha desarrollado cinco unidades demo. TAE ofrece fusión de hidrógeno-boro y plantea alcanzar un prototipo operativo para principios de los 2030s, además de usar tecnologías desarrolladas para fusión en otros sectores como movilidad y almacenamiento energético.

Este conjunto de desarrollos configura una década de 2030 especialmente intensa en validación tecnológica, con prototipos operativos, primeros sistemas conectados a red y experimentación en entornos cuasi-comerciales. Aunque los calendarios son ambiciosos, están respaldados por avances concretos en simulación, materiales, láseres y magnetismo, como se ha detallado en capítulos anteriores.

La percepción general del ecosistema refleja un optimismo contenido pero creciente. Si se toma como referencia la pregunta planteada en el foro -"¿Para qué año calcula que se empezará a suministrar comercialmente energía de fusión a la red eléctrica?"-, los resultados son reveladores:



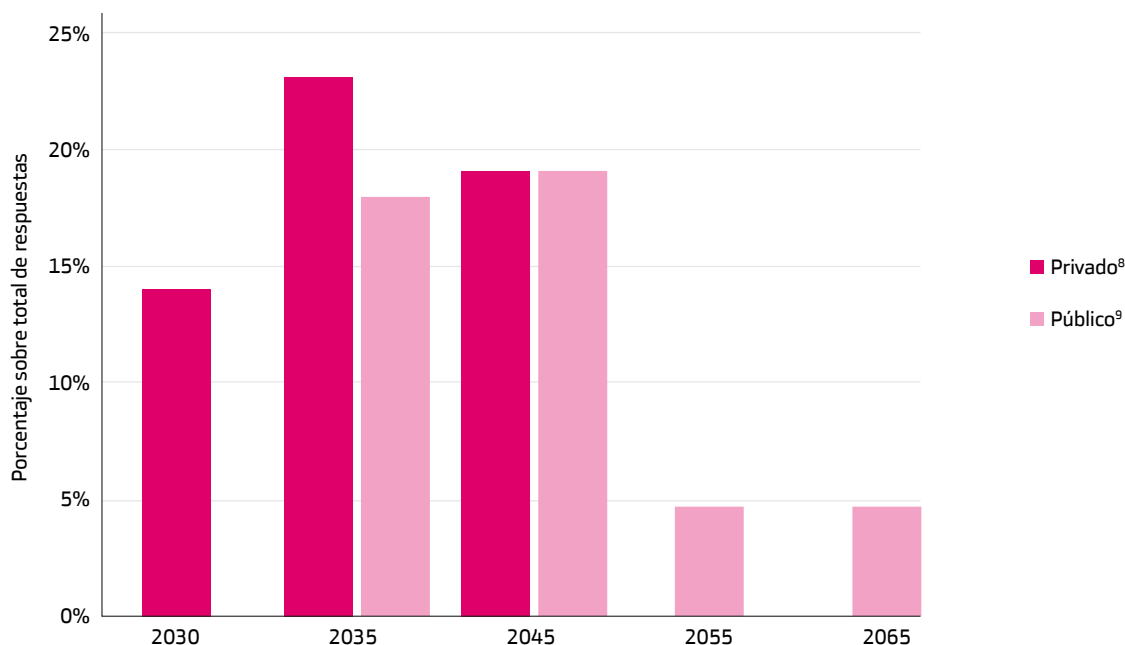
Fuente: elaboración propia basada en una encuesta a los expertos durante el foro

## Más del 80 % de los expertos asistentes considera que la fusión podrá empezar a suministrar energía a la red eléctrica antes de 2045.

Este dato, reforzado por el contraste entre los horizontes temporales del sector público (más allá de 2045) y del privado (antes de 2035) respecto a la primera planta piloto conectada a la red, dibuja una convergencia hacia 2040 como punto de inflexión realista. En conjunto, estos datos revelan una expectativa sólida: entre 2035 y 2045 será el momento en que la fusión puede comenzar a integrarse en el mix energético, al menos en forma de primeras instalaciones comerciales.

En definitiva, la llegada de la fusión a la red no será un evento único, sino un proceso progresivo con múltiples demostradores intermedios. Lo que sí parece claro es que la ventana de oportunidad se abre ya, y que la próxima década será decisiva para convertir la promesa de la fusión en una realidad industrial.

Ante la pregunta "¿Cuándo tendremos la primera planta piloto en real? Es decir, con suministro de energía durante al menos diez horas", los expertos respondieron de la siguiente manera:



Fuente: elaboración propia basada en una encuesta a los expertos durante el foro

<sup>8</sup>Privado: startups y corporaciones

<sup>9</sup>Público: laboratorios y centros de investigación públicos



# 03

COLABORACIÓN  
PÚBLICO-PRIVADA  
E INVERSIÓN

# Colaboración público-privada e inversión

La energía de fusión es un desafío industrial y una carrera hacia la ejecución exitosa. Como se ha analizado en capítulos anteriores, los avances tecnológicos se están acelerando, y las hojas de ruta empiezan a tomar forma. Pero ningún actor puede recorrer este camino en solitario. La escala, complejidad y horizonte temporal de la fusión exigen un **modelo de colaboración público-privada robusto, dinámico y eficaz**.

En este nuevo escenario, el capital privado -empujado por una creciente confianza en la viabilidad técnica- está desempeñando un papel cada vez más relevante. Startups de fusión han atraído más de 7.000 millones de dólares en inversión en menos de una década, y los reguladores empiezan a definir marcos específicos para este sector emergente. Sin embargo, aún persisten **brechas fundamentales: en tiempos, lenguajes, expectativas y marcos de riesgo**.

Este capítulo explora cómo construir puentes entre ciencia, administración pública, industria e inversión. Desde los modelos de colaboración que han funcionado en otros sectores -como el aeroespacial- hasta las claves que hacen que un proyecto de fusión sea "invertible", el objetivo es identificar los factores que permitirán escalar esta tecnología con velocidad, rigor y credibilidad.

## 3.1 Modelos de colaboración público-privada

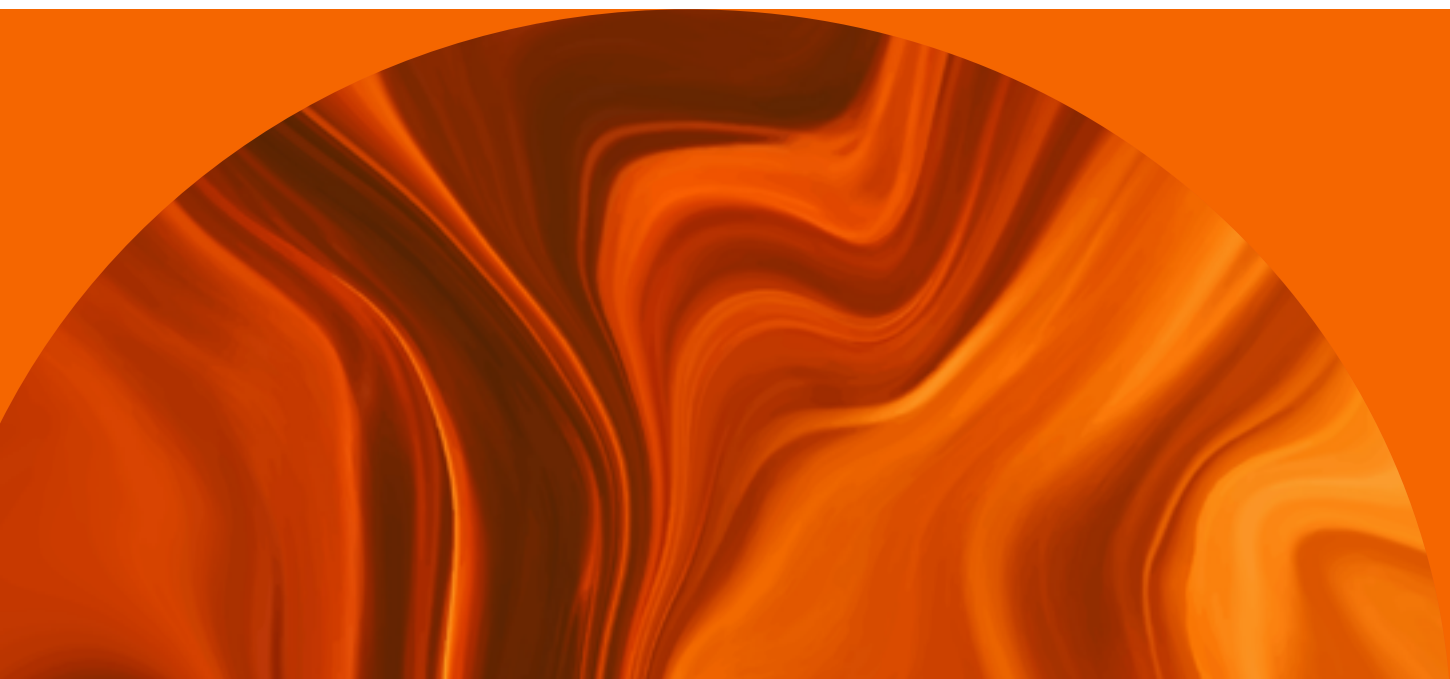
La colaboración público-privada (PPP por sus siglas en inglés - Public-Private Partnerships-) emerge como un componente crítico para acelerar el despliegue de la energía de fusión. Como subraya **Carlos Alejandro** (Fusion for Energy), sin una coordinación eficaz entre instituciones públicas y actores privados será imposible cerrar la brecha entre la investigación básica y la aplicación comercial. El sector público puede aportar infraestructuras, conocimiento acumulado y estabilidad institucional, asumiendo más riesgo en las primeras fases; el privado, agilidad, innovación tecnológica y capacidad para asumir riesgos medidos en el momento de escalar.

### María Teresa Domínguez

 Ver vídeo



En esta misma línea, [María Teresa Domínguez](#), Directora de Área de Negocio de Proyectos Avanzados, I+D y Negocio Nuclear en [Empresarios Agrupados](#), defiende que el sector privado está dispuesto a invertir en la fusión, pero necesita condiciones habilitantes: seguridad regulatoria, visibilidad de mercado y colaboración temprana con instituciones científicas. Subraya que la transición energética requiere construir un nuevo sistema energético, y eso exige colaboración entre todos los actores.



## Entre los expertos hay consenso: identifican cinco factores clave para que las PPP en fusión sean exitosas:

**Momento adecuado** Las PPP son más eficaces cuando se establecen en fases intermedias de desarrollo tecnológico (TRL 4-6), donde ya existe una base científica sólida y comienza la validación de sistemas aplicados. Una intervención demasiado temprana puede ser arriesgada; una demasiado tardía, rígida o adversa al riesgo.

**Infraestructura compartida** Es esencial aprovechar instalaciones públicas ya disponibles -como centros de prototipado rápido, líneas de prueba de materiales o entornos de fabricación avanzada- para apoyar a las startups. Esto reduce costes y acelera la madurez de los componentes en condiciones reales de operación.

**Flexibilidad en la propiedad intelectual (PI):** La PI no debe ser un obstáculo. Las mejores prácticas recomiendan que los derechos se definan antes del inicio del proyecto, permitiendo a las empresas conservar o licenciar desarrollos generados en colaboración.

**Bancos de ensayo distribuidos** Crear plataformas multiusuario para validar componentes, probar sistemas de breeding de tritio o ensayar la integración de subsistemas permitiría reducir barreras de entrada, especialmente para pymes tecnológicas.

**Comercialización integrada** Los mecanismos de escalado comercial y preparación para el mercado deben integrarse desde el diseño de las PPP, y no como añadidos posteriores. Esto incluye certificación, soporte regulatorio, validación con clientes y planificación para la industrialización.

Estos principios también se reflejan en sectores como el aeroespacial (NASA-SpaceX) -que se analiza más adelante-, los semiconductores (programas como [DARPA](#) y consorcios como [IMEC](#)) o la biotecnología (proyectos con Moderna o BioNTech en sus fases iniciales). Todos ellos han utilizado asociaciones público-privadas para para lograr objetivos ambiciosos en plazos más cortos y con mayor eficiencia.

Las lecciones aprendidas muestran que los modelos de colaboración deben ir más allá de la subcontratación puntual. Requieren marcos de gobernanza compartidos, objetivos comunes, cofinanciación y estructuras contractuales que repartan los riesgos tecnológicos.

**Como concluye Alejandro, "la colaboración no es solo deseable, es estructural para que la fusión llegue a ser una realidad energética".**

Las recomendaciones para el escalado -que se desarrollan con más detalle en el [capítulo 6](#)- apuntan a la necesidad de crear plataformas de colaboración estables, combinar fondos europeos, nacionales y privados, y reforzar el papel de las asociaciones industriales como interlocutores estratégicos. En suma, si se quiere que la fusión llegue al mercado, **la colaboración público-privada es una condición imprescindible de viabilidad.**



**Carlos  
Alejandro**



Ver vídeo

## 3.2 Lecciones desde otros sectores tecnológicos

El desarrollo de la energía de fusión requiere coordinación institucional, escalado industrial, colaboración público-privada y, sobre todo, una estrategia clara para transitar de la investigación básica al mercado.

### Charles Bolden

 Ver vídeo



En este sentido, aprender de otros sectores tecnológicos avanzados puede acelerar el proceso y evitar errores ya conocidos. El caso más citado en el foro fue el del sector espacial, en particular el modelo de colaboración desarrollado entre la NASA y empresas privadas como SpaceX. **Charles Bolden**, ex-administrador de la NASA, fundador y consejero delegado emérito de The Charles F. Bolden Group LLC y Patrono de la Fundación Innovación Bankinter, comparte las claves de esta transformación: cuando la agencia decidió abrirse a actores privados, no bastó con transferir tecnología.

Durante dos años, reunieron a todas las empresas interesadas en operar comercialmente para revisar, adaptar y reconstruir conjuntamente los estándares de seguridad, ingeniería y certificación de la NASA. "Nos dimos cuenta de que muchas de nuestras exigencias no tenían sentido para las nuevas tecnologías. Así que las reformulamos juntos. Eso permitió que los proveedores pudieran hacer su trabajo", explica Bolden.

### Esta experiencia ofrece tres lecciones clave para la fusión:

#### **Flexibilidad regulatoria inteligente:**

No se trata de relajar las exigencias, sino de adaptarlas al nuevo contexto tecnológico. En fusión, como señala Alberto Loarte (ITER), aplicar normas pensadas para reactores de fisión a dispositivos de fusión puede generar ineficiencias y sobrecostes innecesarios. Lo esencial es establecer marcos de seguridad proporcionales, claros y adaptados.

#### **Codiseño institucional-industrial:**

Bolden subraya la importancia de implicar desde el inicio a los futuros operadores en el diseño de normas, procesos y objetivos. Este enfoque compartido reduce errores de interpretación, mejora la eficiencia y fortalece la confianza entre sectores público y privado.

#### **Una narrativa inspiradora y estratégica:**

La experiencia de la Estación Espacial Internacional -una colaboración internacional y política complejísima- demuestra que los grandes proyectos pueden ser catalizadores de cooperación y progreso global. En palabras de Bolden, "la colaboración internacional es un milagro cuando hay una misión común".

## Otro caso relevante para la industria de la fusión es Airbus.

La creación de esta empresa en los años 70 supuso una apuesta estratégica por compartir riesgos y capacidades a escala internacional en un momento crítico para Europa. Más allá de sus éxitos comerciales, Airbus ha dejado lecciones valiosas: cómo establecer estándares comunes de ingeniería, calidad y certificación para competir globalmente; cómo crear una cadena de valor paneuropea preparada para innovar y adaptarse a nuevos mercados; y cómo fomentar una cultura de gestión, negociación y adaptación multinacional.

La experiencia con el A380 -un hito tecnológico que también expuso la complejidad de integrar procesos entre países- subraya la necesidad de estructuras colaborativas robustas cuando se manejan tecnologías avanzadas. La fusión, como la aviación en su momento, requiere una arquitectura industrial compartida, con visión de largo plazo y gobernanza multinacional.

Además de los marcos de colaboración institucional, los mecanismos de financiación también ofrecen lecciones relevantes. Además de los marcos de colaboración institucional, los mecanismos de financiación también ofrecen lecciones relevantes. Uno de los más transformadores es el **modelo de pago por hitos** ([milestone-based funding](#)).

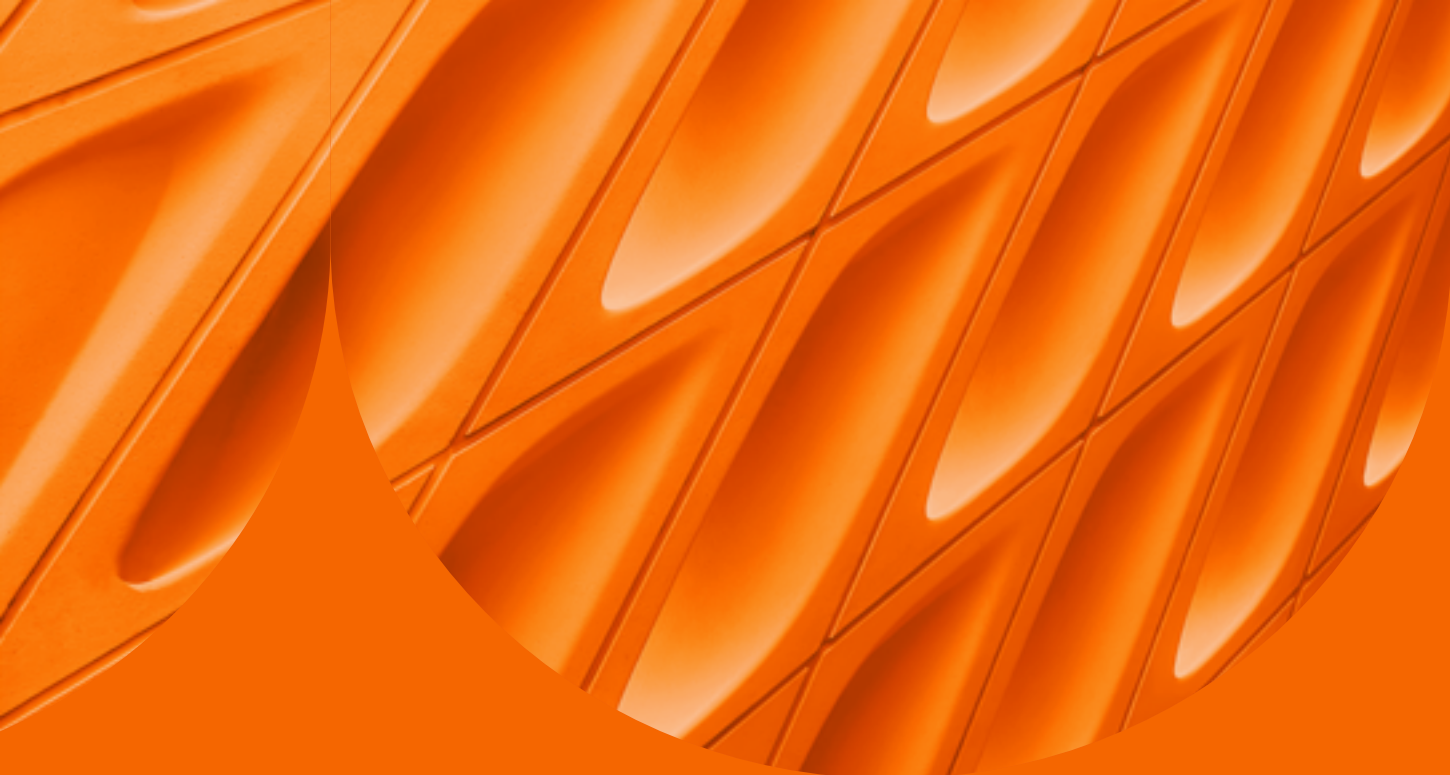
Los expertos destacan que este modelo ha sido adoptado por sectores como el aeroespacial y hace pocos años, está siendo adaptado a la fusión desde EE.UU. Inspirado en los programas satelitales de los años 60 y perfeccionado por la NASA durante el programa Apolo, este enfoque vincula los desembolsos a objetivos técnicos previamente definidos, evaluados por expertos independientes.

Al menos el 10 % del contrato se reserva para la fase final, incentivando el cumplimiento completo del proyecto.

**"La financiación basada en hitos ("milestone-based funding"), aplicada al sector espacial a través del programa COTS, ha sido un caso de éxito. SpaceX y Boeing recibieron pagos condicionados al cumplimiento de hitos concretos, permitiendo impulsar la innovación sin renunciar a la responsabilidad financiera."**

Este modelo ha sido adaptado recientemente por el Departamento de Energía de EE. UU. en el marco del Energy Act (2020), mediante un [programa de hitos para prototipos de fusión conectados a la red](#). En 2023 se asignaron 50 millones de dólares a ocho empresas (como Commonwealth Fusion Systems, Focused Energy, Tokamak Energy y Xcimer), generando más de 350 millones en inversión privada adicional. Este mecanismo ha permitido:

- Reducir el riesgo para empresas emergentes.
- Garantizar avance medible hacia prototipos reales.
- Aumentar la participación del sector privado.
- Fomentar negociaciones tempranas sobre propiedad intelectual y propiedad de datos.



Europa no se queda atrás: iniciativas como [GO4FUSION](#) y los programas [Euratom / Horizon Europe](#) están incorporando esquemas basados en hitos para atraer inversión privada en los primeros contratos, como el proyecto [RODAS](#) en España, que impulsa la fabricación de componentes junto a pymes y centros de I+D.

En definitiva, el pago por hitos representa una palanca muy potente para vincular la innovación tecnológica con la exigencia de avance efectivo hacia soluciones industrializables. Es, sin duda, un modelo que la fusión debe seguir desarrollando.

Expertos como **Itxaso Ariza** (Tokamak Energy) y **Miguel Ángel Carrera** (AVS) refuerzan esta idea, reclamando modelos de gestión más integradores, una mayor presencia industrial en la definición de proyectos y una **estrategia de comunicación que fomente la inspiración social**. "Si creemos que la fusión es el futuro, necesitamos comunicarlo desde ya -concluye Carrera-. No solo con datos, también con historias que ilusionen y movilicen talento".

**Adoptar estos aprendizajes acelerará el despliegue de la fusión, aumentando su atractivo para inversores, reguladores y el mercado en general.**

### 3.3 Criterios para que una empresa o proyecto de fusión sea atractiva para el capital riesgo

La inversión en energía de fusión ha dejado de ser un ejercicio de futurismo técnico para convertirse en una apuesta concreta dentro del portafolio de capital riesgo, especialmente en el contexto climático y geopolítico actual. Pero ¿qué hace que una empresa de fusión sea realmente invertible?

#### Objetivos del proyecto: visión clara y propuesta de valor diferenciada

Uno de los factores clave que definen la vertibilidad de un proyecto de fusión es la claridad de su visión estratégica. Los inversores buscan equipos capaces de articular un objetivo final realista y medible, y de situar su tecnología en un contexto de mercado concreto. Los expertos en inversión destacan que "las empresas más prometedoras no son aquellas que aseguran poder resolver todos los problemas del mundo con la fusión, sino las que tienen claro qué valor aportan y a quién va dirigido."

Esta visión debe estar acompañada de una propuesta de valor clara y diferenciada. [Rory Scott Russell](#), Socio Director en [East X Ventures](#), señala que las startups de éxito identifican desde el inicio un "beachhead market" -un primer nicho donde pueden demostrar valor antes de escalar- y conectan su tecnología con problemas reales no resueltos en sectores como la generación eléctrica, el calor industrial, el hidrógeno o los isótopos médicos.



**Rory Scott Russell**

 Ver vídeo

Para ser atractiva, una empresa debe demostrar que, además de tener una tecnología prometedora, está construida en torno a una misión concreta y bien enfocada.

## Eden Shochat

 Ver vídeo



Esto implica responder con precisión a preguntas fundamentales: ¿Qué problema resuelvo? ¿A qué sector me dirijo? ¿En qué soy distinto? ¿Por qué ahora?

En el caso de la fusión, donde muchas propuestas aún están lejos de la comercialización, articular una hoja de ruta que conecte la etapa actual con un futuro producto o servicio viable es esencial para ganarse la confianza del capital.

Además, los inversores valoran especialmente aquellas propuestas que logran **alinear la narrativa tecnológica con los grandes desafíos sociales y climáticos**. Una visión bien definida orienta al equipo interno y también actúa como catalizador para atraer talento, alianzas y recursos. En este sentido, como señala [Eden Shochat](#), Socio en [Aleph VC](#) y patrono de nuestra Fundación, una buena narrativa puede convertir un reto científico complejo en una oportunidad comprensible y atractiva para el mercado.



## Cómo estructurar un proyecto de fusión que inspire a inversores

La estructura organizativa de un proyecto de fusión es tan importante como su tecnología.

Los inversores examinan con detalle cinco elementos clave:

### Liderazgo sólido y multidisciplinar

El equipo fundador debe **combinar expertise técnico con experiencia en gestión, regulación y desarrollo de negocio**. Según **Rory Scott Russell**, los equipos más convincentes integran físicos del plasma, ingenieros de materiales, expertos en cadena de suministro y gestores con experiencia en proyectos grandes y complejos.

### Modelos de gobernanza y estrategias claras

La startup debe demostrar una **gobernanza corporativa profesional**, con estructuras como juntas directivas, comités y métricas de avance técnico y financiero. Aunque los proyectos de fusión aún están en desarrollo, la organización debe estar preparada para escalar, incorporar capital externo y colaborar con actores públicos y privados. Los inversores requieren claridad en derechos de voto, propiedad intelectual y reparto de beneficios.

### Roadmap técnico e hitos medibles

Es esencial elaborar un plan de desarrollo definido y realista -con etapas, plazos, costes asociados y riesgos evaluados-. Muchas startups de fusión pierden atractivo porque no saben cómo articular sus objetivos técnicos de forma secuenciada y comprobable. Aquí entran en juego herramientas como la financiación por hitos o los prototipos escalables, que permiten evaluar progresos y mantener la credibilidad.

### Respaldo industrial y alianzas estratégicas

La estructura del proyecto debe incluir **alianzas con centros de I+D, proveedores, alianzas corporativas o plataformas conjuntas de desarrollo**, capaces de acelerar la construcción de componentes, testado de materiales e integración de sistemas. Las corporaciones ven con mejores ojos aquellas startups que ya cuentan con cooperación técnica real y no funcionan en solitario.

### Capacidad para escalar y diversificarse

Aunque el enfoque principal sea desarrollar una planta de energía de fusión, los inversores valoran la **transferibilidad técnica**: la posibilidad de aplicar la tecnología en otras áreas mientras se avanza hacia el objetivo principal (calor industrial, isótopos médicos, sistemas de control, etc.). Este enfoque multiplica las fuentes de ingresos y distribuye el riesgo tecnológico.

De forma resumida: la **estructura del proyecto** debe demostrar que el equipo sabe lo que hay que construir, cómo hacerlo, con quién, en qué condiciones y hacia dónde escalar. Esa visión integral es la que transforma una idea de laboratorio en un proyecto empresarial atractivo, sólido y financieramente viable.

## Diferencias de tiempos entre inversores e investigadores/desarrolladores: sincronizar expectativas

Una de las principales tensiones en el ecosistema de la fusión radica en los horizontes temporales. Mientras que la ciencia y el desarrollo tecnológico de la fusión requieren entre 10 y 20 años de maduración, los inversores -especialmente los fondos de venture capital- operan con ciclos más cortos, generalmente de entre 5 y 10 años.

**Rory Scott Russell** lo resume así: "Para ser invertible, un proyecto de fusión debe ofrecer visibilidad de hitos significativos en los primeros 5 años. No es razonable exigir rentabilidad inmediata, pero sí tracción técnica y credibilidad en la hoja de ruta". Esto obliga a las startups a diseñar itinerarios que permitan validar tecnologías, atraer talento y movilizar capital antes de alcanzar la meta final de la planta comercial.

Desde la perspectiva inversora, como señala **Eden Shochat**, los equipos fundadores deben demostrar que son capaces de aprender, adaptarse y ejecutar con rapidez, incluso en proyectos de largo recorrido. "En el venture capital no invertimos en ideas, sino en la capacidad del equipo de llegar a puerto", enfatiza.



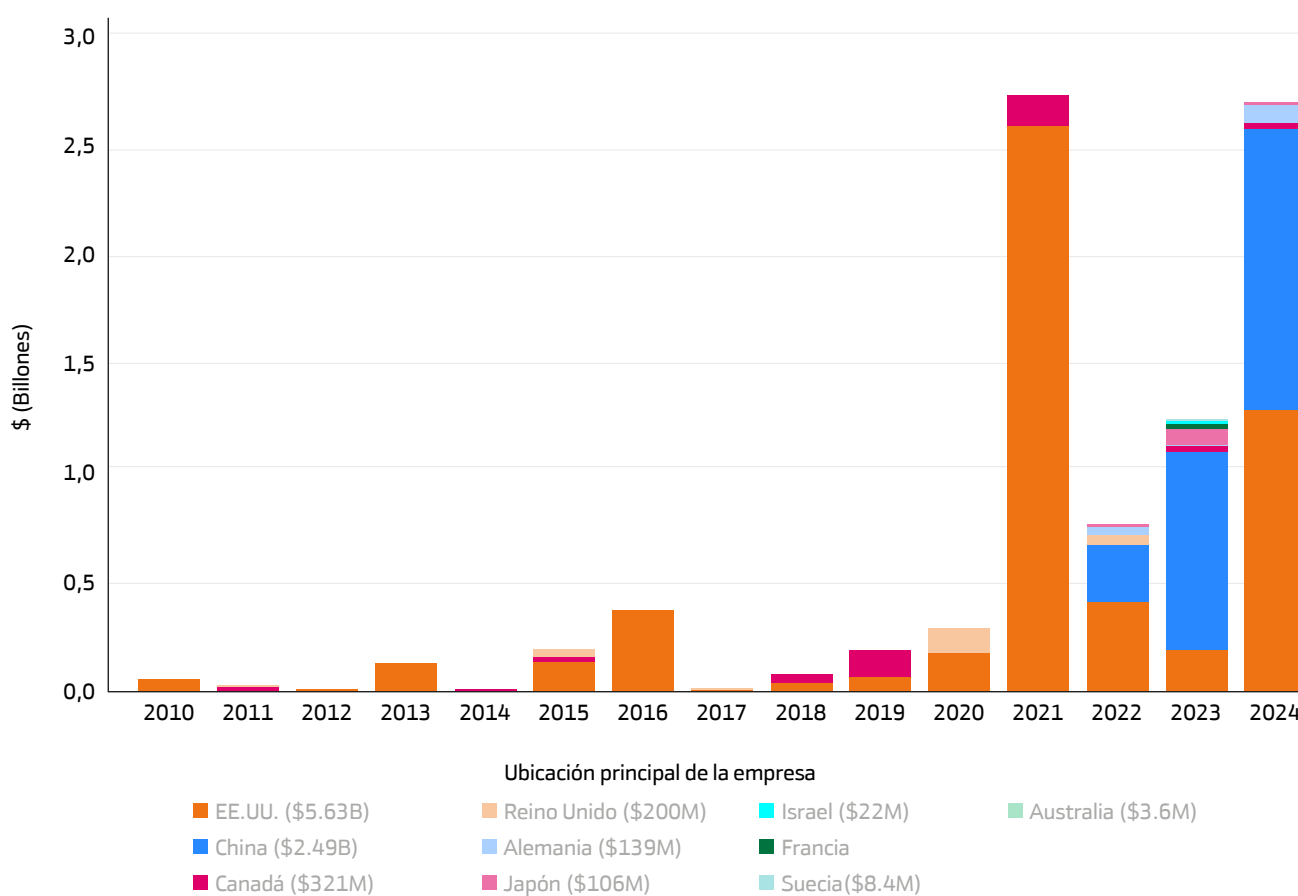
Un matiz importante que destacan especialistas en inversión es que para que un proyecto de fusión sea viable financieramente, debe articular con claridad las "ventanas de oportunidad" que se abren antes de la comercialización final, incluyendo licencias intermedias, ingresos en mercados auxiliares o validaciones regulatorias. La clave está en **estructurar la innovación en etapas que reduzcan el riesgo y alineen el progreso técnico con las expectativas financieras**.

En este contexto, muchos expertos proponen que los calendarios tecnológicos de la fusión integren desde el inicio hitos medibles, resultados técnicos verificables y mecanismos de revisión externa, como ya ocurre en los programas públicos de financiación por hitos (milestone-based funding). Esta alineación es crítica para sincronizar la lógica científica con las reglas del capital.

## El ecosistema inversor y las startups

El dinamismo de la industria de la fusión queda reflejado en la diversidad y ambición de las startups, muchas de ellas respaldadas por inversores de primer nivel internacional. Estas compañías representan enfoques tecnológicos distintos (tokamaks esféricos, stellarators optimizados, fusión inercial), y también estrategias de captación de capital ajustadas a los diferentes niveles de madurez.

### Inversiones de capital en empresas de Fusión por país (año parcial)



Fuente: <https://www.fusionenergybase.com/articles/the-global-fusion-race-is-on>

|                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Tokamak Energy</b><br>(Reino Unido)        | Ha recaudado más de <b>\$250 millones</b> , con el respaldo de Legal & General Capital y otros fondos institucionales. Su foco está en tokamaks esféricos con imanes superconductores de alta temperatura.                                                                        | <b>Proxima Fusion</b><br>(Alemania)                    | Ha completado una Serie A de <b>€130 millones</b> en junio de 2025, co-liderada por Cherry Ventures y Balderton Capital. Su financiación total supera los <b>€185 millones</b> , tras rondas anteriores con Plural Platform y UVC Partners.                                                                                                                                                                     |
| <b>Xcimer Energy</b><br>(EE. UU.)             | Ha captado más de <b>\$100 millones</b> , con Breakthrough Energy Ventures como inversor principal.                                                                                                                                                                               | <b>Commonwealth Fusion Systems</b><br>– CFS (EE. UU.): | Ha superado los <b>\$2.000 millones en financiación acumulada</b> , con inversores como Breakthrough Energy, Tiger Global, Temasek y Google. En junio de 2025, Google firmó un acuerdo estratégico para adquirir 200 MW de electricidad de su futura planta ARC en Virginia. Además, en agosto de 2025, CFS cerró una ronda Serie B2 de \$863 millones, elevando su financiación total a casi \$3.000 millones. |
| <b>Gauss Fusion</b><br>(Alemania)             | Ha obtenido <b>€8 millones</b> en fase pre-semilla (2023) y <b>€9 millones adicionales en 2024</b> a través del Ministerio Federal de Educación e Investigación de Alemania (BMBF).                                                                                               |                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Renaissance Fusion</b><br>(Francia)        | Tras una ronda semilla de <b>€15,5 millones</b> (2022) y una subvención de €10 millones de BPI France, cerró en 2025 una Serie A de <b>€32 millones</b> liderada por Crédit Mutuel Impact y Lowercarbon Capital, alcanzando más de <b>€60 millones</b> de financiación acumulada. | <b>Helion Energy</b><br>(EE. UU.)                      | Ha cerrado una Serie F de <b>\$425 millones en 2025</b> , con participación de Lightspeed, SoftBank Vision Fund 2 y Sam Altman. Su financiación total supera los \$1.000 millones. Su prototipo Polaris busca ser el primero en generar electricidad a partir de fusión.                                                                                                                                        |
| <b>Kyoto Fusioneering</b><br>(Japón/ EE. UU.) | Ha levantado más de <b>¥13,7 mil millones</b> (unos <b>\$90 millones</b> ), con el respaldo de Marubeni, Nichicon e In-Q-Tel (vehículo de inversión estratégico vinculado a la inteligencia estadounidense).                                                                      |                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |

Según un [análisis de F4E Fusion Observatory](#), la inversión acumulada pasó de poco más de €1,5 mil millones en 2020 a aproximadamente €9,9 mil millones en junio de 2025. El desglose regional refleja el liderazgo de Estados Unidos (61 %), seguido de China (24 %) y Europa (5 %), donde destacan Alemania (€460 M) y Reino Unido (€417 M) como principales receptores de capital.

Como complemento a este impulso privado, los gobiernos, en particular el Departamento de Energía de Estados Unidos, están desplegando mecanismos de financiación basados en hitos que proporcionan señales de validación tempranas y refuerzan la confianza de los inversores.

- China destina alrededor de **1.500 millones de dólares** en fondos estatales al año, según el citado informe.
- Europa va avanzando, aunque a menor escala. Como ejemplo de vitalidad, la alemana [Marvel Fusion ha recaudado 113 millones de euros en una ronda de financiación](#) de serie B respaldada por EQT, Siemens Energy y el Consejo Europeo de Innovación.

En conjunto, estas cifras apuntan a un mercado de la fusión que atrae más de 8.000 millones de dólares de capital privado en todo el mundo, con al menos 43 startups que compiten activamente por el liderazgo del mercado. Esta rápida aceleración, impulsada por el apoyo estatal, las tecnologías innovadoras y la urgencia climática, está redefiniendo la fusión, que pasa de ser una aspiración lejana a un sector competitivo y apto para la inversión.

## \$8.000 mill.

de capital privado en todo el mundo

## 43 startups

compiten activamente por el liderazgo del mercado

Este mapa evidencia la creciente sofisticación del ecosistema, donde el capital riesgo (VC) convive con iniciativas de inversión corporativa (CVC) y programas públicos de cofinanciación. La diversidad geográfica -con actores clave en Europa, Asia y Norteamérica- anticipa un escenario global altamente competitivo. En este contexto, fomentar la conexión entre talento, financiación y capacidades tecnológicas será determinante para acelerar el camino hacia la fusión comercial.

# 04

**HACIA UN MARCO  
REGULATORIO PARA  
LA FUSIÓN**

# Hacia un marco regulatorio para la fusión

La fusión no es fisión. Este principio, compartido por todos los expertos del foro, debe estar en el corazón de cualquier marco regulador. Las diferencias son sustanciales: la fusión no genera reacciones en cadena, ni residuos de larga vida, y su riesgo radiológico es notablemente inferior. Ignorar esta especificidad conduce al error de aplicar modelos heredados que pueden frenar la innovación sin aportar beneficios reales en seguridad.

## Una herramienta estratégica, no un obstáculo técnico

La regulación debe entenderse como una herramienta estratégica capaz de acelerar el desarrollo de una nueva industria, y no como un freno. Este proceso es, ante todo, social, político y técnico, por lo que no puede diseñarse de forma aislada ni limitarse a aplicar modelos heredados de otras tecnologías como la fisión o los aceleradores de partículas. Así lo subraya [Patrick White](#), responsable de Seguridad y Regulación de la Fusión en [Clean Air Task Force \(CATF\)](#), quien defiende que una regulación bien planteada es clave para el éxito de la energía de fusión.

Desde CATF, este experto lidera un grupo internacional que busca **consensos regulatorios globales** para facilitar el despliegue de la fusión sin sacrificar la seguridad. Su enfoque se apoya en tres principios:



### Proporcionalidad al riesgo real

No es lo mismo una instalación de laboratorio con microgramos de tritio que una planta tipo DEMO que necesita varios kilos.



### Inclusividad tecnológica

El marco debe ser válido para todas las tecnologías de fusión, sin favorecer diseños concretos.



### Regulación por desempeño

La seguridad debe medirse por resultados, no por esquemas técnicos predefinidos.

## Patrick White

 Ver vídeo



**White** advierte contra dos extremos: sobre regular una máquina de fusión como si fuera de fisión y, por el contrario, sub regularlo aplicando normativas de aceleradores de partículas en contextos con mayor riesgo radiológico.

**"La clave está en escalar la regulación con inteligencia, según la tecnología y el momento".**

## El valor de la certidumbre: Visión desde la industria

Los expertos coincidieron en un punto crítico: la certidumbre regulatoria es esencial para movilizar inversión, reducir riesgos y acelerar la llegada al mercado.

Así, **Susana Reyes** (Xcimer Energy) defiende la importancia de marcos como el [10 CFR Part 30](#) de EE. UU., que permiten adaptar requisitos a cada tecnología. Su empresa integra la lógica regulatoria desde el diseño, minimizando dosis ocupacionales y riesgos accidentales, y colabora con instituciones como la [UNED](#), [Savannah River](#) o el programa británico [LIBRTI](#) para validar soluciones en breeding y neutrones de alta energía.

### Susana Reyes

[Ver vídeo](#)

Por su parte, **Lucio Milanese** (Proxima Fusion), pone el acento en el equilibrio entre rigor y agilidad. Desde su experiencia, señala que en algunos proyectos dentro del ITER hasta un 70 % del coste de ciertos componentes se debe a requisitos regulatorios, no al valor técnico. "Estamos pagando más por el papel que por el metal". Propone marcos escalonados que acompañen la evolución del sector, evitando cargas desproporcionadas en etapas tempranas y anticipando exigencias de la fase comercial.

## Lucio Milanese

 [Ver vídeo](#)



## Richard Pearson

 [Ver vídeo](#)



Ampliando la perspectiva, **Richard Pearson**, entonces representante de Kyoto Fusioneering, insiste en que **regular bien también es comunicar bien**. El ejemplo británico, donde el [Energy Act 2023](#) excluye a la fusión del régimen nuclear convencional, ofrece una vía flexible con supervisión civil.

## Una visión global: armonización y aprendizaje mutuo

Construir un **marco global de regulación para la fusión**, inspirado en los modelos existentes en aviación civil, permitiría acelerar el desarrollo de la industria y facilitar el intercambio de buenas prácticas. Por otro lado, muchos componentes de la fusión magnética –imanes superconductores, criogenia, vacío– son comunes con los aceleradores de partículas y podrían beneficiarse de criterios regulatorios compartidos.

Esta es la propuesta que defiende [Ralf Kaiser](#), Director de Programas en el [Centro Internacional de Física Teórica \(ICTP\)](#), quien subraya la necesidad de armonización y aprendizaje mutuo.

### Sus siete recomendaciones articulan una hoja de ruta realista:

- Reconocimiento mutuo de licencias entre países productores.
- Acuerdos multilaterales para que países sin capacidad reguladora adopten marcos externos.
- Creación de una entidad internacional específica para la regulación de fusión.
- Prevención del mal uso de máquinas de fusión con fines armamentísticos.
- Formación técnica y regulatoria a escala global.
- Iniciativas de divulgación para mejorar la percepción pública.
- Armonización de principios sin comprometer soberanía nacional.

En palabras de Kaiser: “La regulación no debe frenar la innovación, sino garantizar su aceptación y escalabilidad global”.



**Ralf Kaiser**

 Ver vídeo

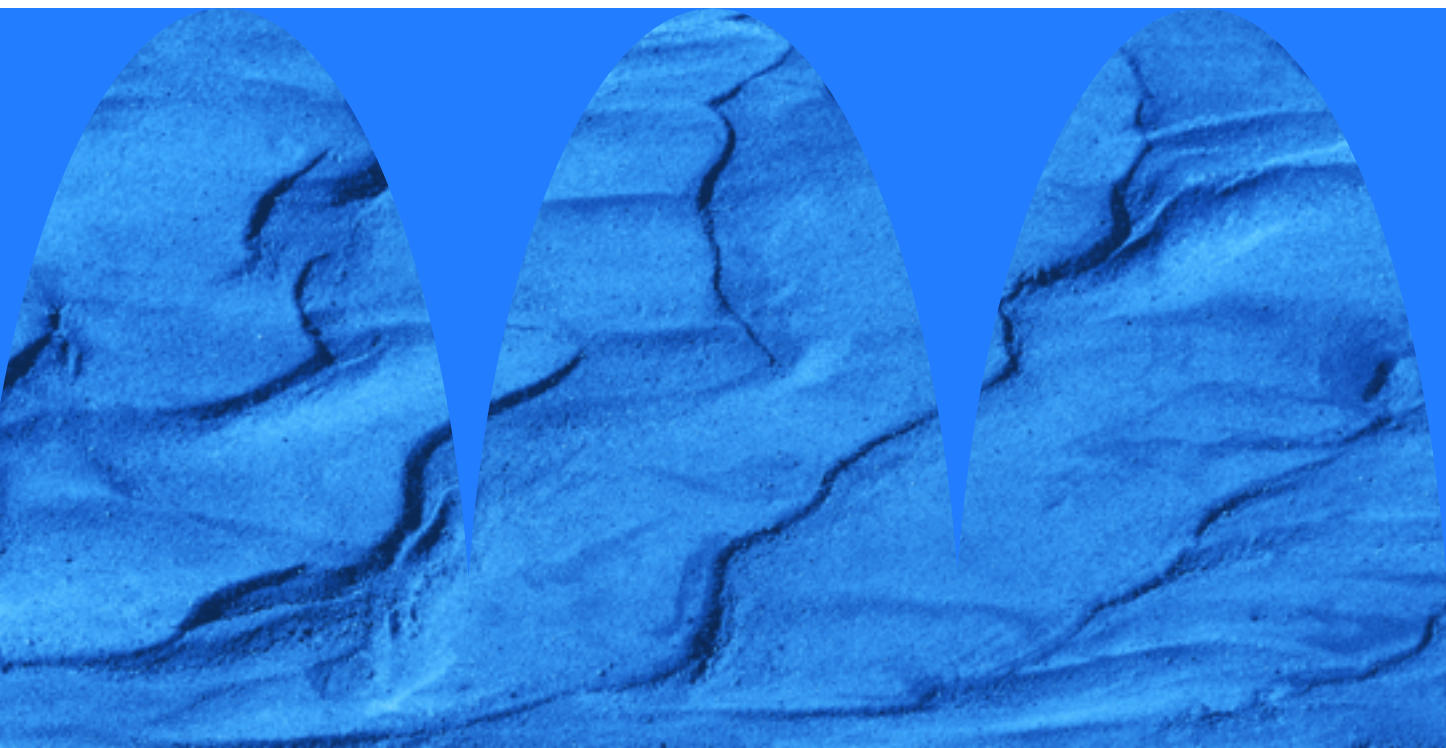
## De la excepción a la normalidad: Una nueva cultura regulatoria

El consenso del foro fue claro: no basta con adaptar normas existentes. La fusión necesita una **arquitectura regulatoria propia**, construida desde su especificidad tecnológica, sus riesgos reales y su vocación industrial. Para ello, se proponen tres líneas de actuación:

|                                    |                                                                                                             |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Diseño<br/>progresivo</b>       | Marcos escalables que acompañen la evolución de laboratorios a plantas industriales.                        |
| <b>Colaboración<br/>anticipada</b> | Regulación como proceso de codiseño entre industria, administración y sociedad.                             |
| <b>Visión<br/>global</b>           | Hacia principios armonizados que garanticen certidumbre y reduzcan barreras para proyectos multinacionales. |

La regulación de la fusión es un **factor estratégico para su despliegue comercial**. Como subraya **Patrick White**, "no podemos aplicar las reglas de ayer a las tecnologías del mañana".

En definitiva, regulación inteligente, proporcional y colaborativa será una de las claves para que la fusión dé el salto de la promesa a la realidad.





05

**CAPITAL HUMANO PARA  
IMPULSAR LA INDUSTRIA  
DE LA FUSIÓN**

# Capital humano para impulsar la industria de la fusión

Sin personas no hay industria. Todos los expertos reunidos en el foro coinciden: el éxito de la fusión no depende solo de avances científicos o capital financiero, sino de la capacidad para formar, atraer y retener el talento capaz de construir, operar y escalar esta nueva infraestructura energética global.

El reto es inmenso. No se trata de reconvertir un sector ya existente, sino de levantar desde cero una industria transversal, altamente especializada y distribuida globalmente. Y el tiempo juega en nuestra contra.

## Un cuello de botella estructural

La formación es hoy uno de los principales cuellos de botella para el desarrollo de la fusión. [Steven Biegalski](#), responsable del Programa de Ingeniería Nuclear y Radiológica y Física Médica en [Georgia Tech](#), lo plantea con claridad: mientras la inversión privada se dispara, la oferta educativa especializada no crece al mismo ritmo. "No estamos capacitando a suficientes personas para operar esta industria. Y los programas actuales no tienen la escala ni la financiación necesarias", advierte.

El desafío es tanto de escala como de enfoque. La mayoría de los programas están diseñados para la investigación, no para la industrialización. El modelo tradicional -centrado en física del plasma o ciencia de materiales- ya no basta.

**Es el momento de los ingenieros.** Hasta ahora la fusión ha sido un terreno casi exclusivo de los físicos, pero el salto a escala comercial requiere perfiles capaces de diseñar, integrar y construir sistemas completos.

La fusión comercial exige un nuevo perfil profesional: híbrido, interdisciplinar, con competencias en ingeniería de sistemas, regulación, sostenibilidad, electrónica de potencia, criogenia, inteligencia artificial o fabricación avanzada.

**"La transición a escala comercial requiere habilidades distintas a las que se forman hoy en día en la universidad", subraya Biegalski.**

**Ralf Kaiser** (ICTP) refuerza esta preocupación con datos concretos: hoy solo trabajan entre 2.000 y 5.000 físicos de plasma en todo el mundo. Y aproximadamente un 40 % del personal implicado en proyectos de fusión tiene o está realizando el doctorado. Pero una industria energética global -capaz de producir electricidad, hidrógeno, calor industrial y materiales avanzados- necesitará cientos de miles de profesionales especializados en menos de dos décadas. Ingenieros, técnicos, operadores, especialistas en normativa, expertos en sostenibilidad o fabricación avanzada.

Ambos expertos coinciden en que no se trata solo de aumentar la oferta educativa. Es necesario construir una nueva infraestructura formativa, con alianzas internacionales, modelos flexibles, centros acreditados para prácticas reales y suficiente profesorado cualificado. **Biegalski** alerta de que muchos departamentos universitarios no tienen capacidad para desarrollar cursos específicos, y que tampoco existen suficientes centros técnicos acreditados.

**Además, insiste en que la educación debe estar integrada desde el principio en la estrategia industrial de la fusión, no como una consecuencia, sino como un habilitador clave.**

### Ralf Kaiser

 Ver vídeo

### Steven Biegalski

 Ver vídeo

En este contexto, redes como [ENEN \(European Nuclear Education Network\)](#) buscan impulsar el desarrollo de capacidades en nuclear y fusión desde una lógica europea. Georgia Tech es una de las pocas instituciones estadounidenses integradas en este ecosistema, participando activamente en el proyecto [ENEN2+](#), orientado a estandarizar programas y facilitar la movilidad del talento.

**Kaiser** advierte además de una desconexión preocupante: gran parte del talento actual se concentra en centros de investigación pública, mientras que el crecimiento de la industria vendrá impulsado por el sector privado, que compite por profesionales en un mercado cada vez más exigente y global. Esto plantea un desafío de atracción y retención de talento cualificado, especialmente en regiones con menor densidad de instituciones científicas.

**La revolución de la fusión será también una revolución educativa: cualitativa y cuantitativa: hay que formar a más personas y hay que formarlas de otra manera y a otra velocidad.**



## Innovar también en formación

**Steven Biegalski** defiende la necesidad de una **hoja de ruta educativa específica para la fusión**, basada en (i) financiación estable, (ii) colaboración internacional y (iii) reconversión profesional desde sectores afines. Se trata de repensar todo el modelo de capacitación con una lógica industrial, escalable y global.

**Ralf Kaiser** refuerza esta visión con el ejemplo del ICTP, que ya forma al 10 % de los físicos médicos en países en desarrollo mediante programas conjuntos con hospitales, universidades y agencias internacionales. Ese modelo híbrido -formación académica combinada con experiencia práctica- puede aplicarse a la fusión: entrenamiento técnico, rotaciones industriales, licencias internacionales y capacitación continua.

**Kaiser** propone además mirar al sector aeroespacial como referencia para construir capacidades. En el futuro, no todos los países serán líderes tecnológicos en fusión, pero sí podrán jugar distintos roles dentro del ecosistema global. **Sehila González** distingue tres tipos de países:

- **Usuarios**  
Disponen de marco regulatorio, conocimiento técnico básico y capacidad para operar instalaciones en colaboración con empresas de fusión.
- **Contribuidores**  
Añaden capacidades industriales, desarrollo de tecnologías habilitadoras y fuerza laboral local.
- **Desarrolladores**  
Lideran programas tecnológicos nacionales capaces de diseñar, construir y operar dispositivos prototipo de fusión.

Este modelo implica crear trayectorias educativas adaptadas a cada perfil: desde operadores de planta y técnicos de mantenimiento hasta científicos de frontera y gestores de programas regulatorios. Y eso exige innovar también en cómo, dónde y con quién se forma el talento.



## Invertir en personas, no solo en proyectos y startups

Wilfried Vanhonacker, patrono de la Fundación, lanza una reflexión de fondo: "Si creemos que la fusión va a cambiar el mundo, no podemos seguir formando profesionales como si nada fuera a cambiar". **Vanhonacker** defiende que, igual que se invierte en infraestructuras o startups, los fondos públicos y privados deben apostar también por el talento. "Necesitamos una lógica de inversión en capital humano, no solo en capital físico", subraya. Propone crear un "Fusion Business School": un entorno académico y profesional que integre visión industrial, conocimiento técnico, formación ejecutiva e innovación.

La inteligencia artificial emerge también como una palanca clave. Juan Zufiría, Presidente de la Fundación, propone formar perfiles híbridos, con dominio tanto de la física de la fusión como de la inteligencia artificial. Esta convergencia puede multiplicar la productividad del talento y acelerar el desarrollo del sector. **Steven Biegalski** (Georgia Tech) lo confirma: muchos de sus estudiantes ya utilizan IA para analizar grandes conjuntos de datos en dispositivos como el DIII-D. Y lo hacen como herramienta complementaria al conocimiento físico tradicional. "Es un 'con' y no un 'o'", resume.

**Ralf Kaiser** (ICTP) matiza que, aunque la IA puede acelerar procesos y ampliar capacidades, no reemplaza la ingeniería clásica ni a los expertos en tecnologías críticas como criogenia, materiales o sistemas de vacío. Pero sí **puede liberar recursos, acortar tiempos de experimentación y abrir nuevas formas de colaboración científica.**

**El consenso es claro: sin talento no habrá industria. Y ese talento requiere inversión, planificación y nuevas estructuras educativas adaptadas a los desafíos de la fusión.**

## Reconversión, ecosistema y aprendizaje continuo

Como hemos visto, la transición hacia una industria de fusión comercial no puede esperar décadas a que se forme una nueva generación desde cero. Una vía inmediata es la reconversión de profesionales procedentes de sectores afines como el espacial, el nuclear, el aeroespacial o el de semiconductores. Muchos de los conocimientos, metodologías y competencias que ya existen en estas industrias pueden aplicarse directamente al ecosistema de la fusión, con procesos de reskilling específicos y orientados a los retos reales del sector.



En este esfuerzo, España ya dispone de activos relevantes. Centros como el CIEMAT o la Universidad de Sevilla han acumulado décadas de experiencia en tecnologías de fusión, materiales avanzados y formación técnica especializada. Iniciativas como [FUSION-EP](#) del CIEMAT forman ingenieros especializados en fusión magnética a escala paneuropea, mientras que el proyecto [Fusion2Grid](#) de la Universidad de Sevilla se apoya en tecnología real para capacitar profesionales con experiencia práctica.

Además, existen programas de máster y posgrado en distintas universidades que podrían escalarse y adaptarse con mayor agilidad si se establece una hoja de ruta coordinada a nivel nacional.

Pero no basta con reconvertir perfiles o lanzar programas puntuales. La velocidad del cambio tecnológico exige una lógica de [upskilling y reskilling](#) continuos.

**Las competencias deben actualizarse al ritmo de la innovación, con modelos ágiles, colaborativos y centrados en las necesidades reales de la industria de fusión.**

# 06

**CONCLUSIONES Y  
RECOMENDACIONES**

# Conclusiones y recomendaciones

Como se ha podido constatar a lo largo del presente informe, La energía de fusión ya no está en un horizonte lejano; es una industria emergente que concentra capital, talento y avances científicos sin precedentes. Convertir esta promesa en realidad requiere algo más que innovación tecnológica. Desde la Fundación Innovación Bankinter, tras escuchar y debatir con los principales expertos del Think Tank Future Trends Forum, hemos constatado que estamos ante un punto de inflexión: la ventana de oportunidad es ahora.

La fusión, además de ser una respuesta a la crisis climática y a la necesidad de descarbonizar el sistema energético, es una palanca estratégica para la competitividad global, la autonomía energética y la creación de nuevas industrias capaces de transformar la economía. Sus beneficios pueden multiplicarse en otros sectores -materiales avanzados, IA aplicada, robótica remota, fabricación aditiva-, pero solo si somos capaces de acelerar el salto desde el laboratorio y las plantas experimentales a la escala industrial.

La Fundación, a partir de las aportaciones de los expertos del think tank, propone actuar de forma coordinada en cinco ejes estratégicos que deben abordarse con urgencia:

**Tecnología** Acelerar el paso de los desarrollos al mundo real, desplegando infraestructuras críticas de ensayo, resolviendo los retos de integración de subsistemas y aprovechando tecnologías externas.

**Inversión y colaboración público-privada** Movilizar capital y alianzas estratégicas para acelerar que la fusión esté conectada a la red, generando electricidad de forma fiable.

**Talento** Planificar y ejecutar una estrategia global de formación y reconversión de perfiles técnicos y de liderazgo para el sector.

**Regulación** Diseñar marcos regulatorios ágiles, seguros y globales, adaptados a los riesgos reales de la fusión y no a los de la fisión.

**Comunicación** Construir una narrativa potente y honesta que genere confianza social, legitimidad y licencia para desplegar la industria.

Lo que está en juego es mucho más que una nueva fuente de energía. Si no avanzamos con la velocidad adecuada, corremos el riesgo de perder una **oportunidad histórica de liderazgo tecnológico, industrial y social**. La fusión puede redefinir el futuro energético mundial y Europa debe situarse en primera línea. El camino está claro: apostar por proyectos ambiciosos, fomentar la cooperación internacional y movilizar todos los recursos disponibles para que la energía de fusión llegue a tiempo.



## Eje 01

# Tecnología: de los laboratorios al mundo real

El reto tecnológico de la fusión pasa por dar un salto decidido hacia la construcción de una planta de fusión completa e integrada que permitan abordar los desafíos de integración y operación de los sistemas.

Estos proyectos son esenciales para acelerar el camino hacia la creación de una industria sólida.

# Recomendaciones

## **Impulsar proyectos de dispositivos de fusión experimentales**

Que permitan validar diseños, procesos y sistemas bajo condiciones reales de operación, resolviendo los retos de integración.

## **Acelerar el progreso de los componentes críticos**

Desde el despliegue de infraestructuras de ensayo hasta el desarrollo de materiales y refrigerantes avanzados. Es clave aprovechar el papel de ITER como laboratorio de aprendizaje y banco de pruebas de componentes.

## **Fomentar la creación de la cadena de suministro**

Desde el principio, identificando las necesidades futuras de componentes y promoviendo alianzas con la industria para garantizar capacidad de producción a escala.

## **Aprovechar tecnologías**

Tanto tecnologías externas y las experiencias de otras industrias (aeroespacial, nuclear de fisión, etc.) para integrar sistemas complejos con mayor eficiencia.

## **Explorar y clarificar la aplicabilidad de las tecnologías**

Explora las tecnologías desarrolladas alrededor de la fusión en otras industrias (materiales avanzados, robótica remota, electrónica resistente a la radiación, criogenia...), generando oportunidades de transferencia que faciliten inversión, colaboración industrial y apoyo político sostenido.

## Eje 02

# Inversión y colaboración público-privada

Para que la energía de fusión esté conectada a la red lo antes posible, es imprescindible movilizar capital a gran escala y construir alianzas estratégicas entre el sector público y el privado.

No basta con financiar proyectos de manera fragmentada: necesitamos un enfoque ambicioso que acelere la construcción de dispositivos de fusión es experimentales y reduzca los riesgos de inversión.

# Recomendaciones

## Convertir al sector público en socio estratégico

No solo en financiador, participando activamente en la definición de objetivos y en el seguimiento de los avances.

## Lanzar programas piloto de colaboración público-privada

Lanzar programas piloto de colaboración público-privada (PPP) centrados en la construcción de dispositivos de fusión experimentales completos, aunque los subsistemas tengan niveles de madurez diferentes. Este enfoque permitirá validar diseños y acelerar la conexión de la fusión a la red.

Incluir mecanismos claros de seguimiento y métricas de éxito verificables (certificaciones, inversión movilizada, validación de clientes).

## Adoptar modelos competitivos de financiación

Adoptar modelos competitivos de financiación similares a los utilizados por NASA, por ejemplo, convocatorias europeas para financiar varios proyectos de prototipos de dispositivos de fusión, con financiación por hitos para los que alcancen mejores resultados.

## Unificar los marcos de propiedad intelectual y de acceso a infraestructuras

Simplificar y unificar los marcos de propiedad intelectual y de acceso a infraestructuras, eliminando barreras para la colaboración y atracción de nuevos actores industriales.

## Impulsar hubs regionales de innovación

Impulsar hubs regionales de innovación en torno a la fusión, donde confluyan empresas, startups, centros de investigación y capacidades industriales necesarias para escalar la tecnología.

Este enfoque permitirá a Europa posicionarse como líder en un mercado con un enorme potencial de retorno. Quien lidere hoy las alianzas atraerá el talento, definirá las reglas del juego y captará la industria que hará posible que la fusión genere electricidad fiable en la próxima década.

## Eje 03

# Talento: formar a la fuerza laboral del futuro

El desarrollo de la fusión requiere un esfuerzo decidido de concienciación y planificación en materia de talento.

La velocidad a la que evoluciona la tecnología obliga a actuar ahora para garantizar que existan los perfiles necesarios en cada etapa del proceso.

Uno de los retos principales es la reconversión de perfiles técnicos procedentes de sectores afines (aeroespacial, nuclear, automoción, energía, etc.). Estos profesionales ya cuentan con una base sólida de ingeniería y pueden adaptarse con rapidez a las necesidades del sector de la fusión.

# Recomendaciones

## **Definir una hoja de ruta educativa**

Definir una hoja de ruta educativa global para la fusión, coordinada a nivel internacional, que anticipe las necesidades de perfiles técnicos, científicos y de liderazgo a corto, medio y largo plazo.

## **Programas de reconversión específicos**

Poner en marcha programas de reconversión específicos para atraer talento de industrias afines. Estos programas deberían ser flexibles, de rápida implantación y con participación activa de la industria.

## **Promover alianzas entre universidades, centros tecnológicos y empresas**

Con programas comunes que combinen formación académica, prácticas en startups y empresas del sector, becas y certificaciones internacionales.

## **Facilitar la movilidad internacional**

Creando redes que permitan a estudiantes y profesionales formarse en centros punteros de distintos países. Estas iniciativas deben ir más allá de los programas existentes y adaptarse a las necesidades específicas de la fusión.

**Invertir en talento es una ventaja competitiva a largo plazo. Los países y organizaciones que lideren la formación en fusión se convertirán en polos de excelencia capaces de atraer inversión, industria y alianzas internacionales.**

**Además, permitirá reforzar la narrativa de la fusión como motor educativo, innovador y tecnológico con impacto directo en la sociedad.**

## Eje 04

# Regulación: diseñar un marco ágil, seguro y global

La regulación será un factor determinante para el despliegue de la energía de fusión. Aunque sus riesgos radiológicos son distintos a los de la fisión, muchos países continúan aplicando criterios heredados que ralentizan el desarrollo de proyectos.

Además, los enfoques dispares entre jurisdicciones generan costes adicionales, incertidumbre jurídica y barreras a la comercialización global.

# Recomendaciones

## Marco global de referencia para licencias y certificaciones

Crear un marco global de referencia para licencias y certificaciones, tomando como ejemplo sectores como la aviación, donde EE. UU. y Europa reconocen mutuamente sus licencias técnicas. Este acuerdo permitiría acelerar la conexión de la fusión a la red y facilitar el acceso de países en desarrollo a la tecnología.

## Impulsar una regulación basada en riesgos reales

Impulsar una regulación basada en riesgos reales, flexible y adaptativa, que defina objetivos de seguridad y permita a los operadores demostrar cómo cumplirlos sin imponer reglas cerradas que dificulten la innovación.

## Evitar sesgos regulatorios heredados de la fisión

Formando nuevos expertos y capacidades regulatorias específicas para fusión.

## Diseñar incentivos regulatorios

Que permitan avanzar sin comprometer la seguridad: espacios de prueba (regulatory sandboxes), procedimientos acelerados para tecnologías con bajo riesgo y marcos flexibles para demostradores.

## Consolidar un liderazgo institucional global

Con una entidad capaz de coordinar regulación, salvaguardas, formación de capacidades y comunicación pública, al estilo de lo que hoy representa [IRENA](#) (Agencia Internacional de Energías Renovables) para las renovables

Un marco regulatorio ágil, transparente y coordinado acelerará la llegada de la fusión, reforzará la confianza pública, atraerá inversión y facilitará su adopción global. Actuar ahora es clave para evitar que las barreras jurídicas y normativas se conviertan en un freno estructural.

## Eje 05

# Comunicación: construir narrativa, confianza y licencia social

La fusión aún es una gran desconocida para la mayoría de la sociedad. Pese al aumento de inversión y al avance científico, su narrativa pública es débil, dispersa y poco conectada con los intereses ciudadanos. La confusión con la fisión, el miedo al tritio y las dudas sobre su viabilidad alimentan el escepticismo.

Esta falta de relato tiene un coste: sin confianza pública no habrá legitimidad social ni condiciones para un despliegue industrial sostenido. Y esa confianza no se hereda: se construye con pedagogía, transparencia y diálogo desde ahora.

La sociedad necesita conocer que la fusión existe, que está en un horizonte cercano y que tiene el potencial de cambiar por completo el modelo energético mundial, reforzar la independencia energética de Europa y reequilibrar el tablero geopolítico.

Una narrativa clara y ambiciosa puede posicionar a la fusión como la clave de la transición energética: una tecnología capaz de complementar e incluso superar el papel de las energías renovables actuales.

# Recomendaciones

## Crear una narrativa compartida

Más allá de lo técnico, la fusión necesita contar una historia: cómo transforma el modelo energético, cómo contribuye al clima, cómo puede generar oportunidades industriales, empleo y liderazgo tecnológico.

## Hacer pedagogía desde ahora

No esperar a que la primera planta esté operativa. Comunicar de forma proactiva, con mensajes claros y accesibles, reforzando la diferenciación respecto a la fisión y explicando la lógica de seguridad desde el diseño.

## Involucrar a agentes sociales y educativos

Centros escolares, universidades, periodistas, líderes de opinión, sector cultural... La licencia social no se logra en una nota de prensa, se construye en cada conversación pública.

## Gestionar expectativas con honestidad

Evitando el triunfalismo. La credibilidad se construye explicando tanto los avances extraordinarios como los retos pendientes.

La fusión se gana también en la mente y el corazón de las personas. Una narrativa potente puede acelerar el cambio institucional, atraer talento, movilizar inversión y generar un efecto red.

## Un momento histórico para España y para Europa

Europa no lideró la revolución digital. Tampoco domina hoy la carrera de la inteligencia artificial. Pero en la carrera por la energía de fusión, aún no hay ganadores. Estamos ante un terreno abierto, donde el conocimiento, la cooperación científica y la visión industrial pueden marcar la diferencia.

Aquí, Europa, y España especialmente, parte con ventajas: una base investigadora de excelencia, proyectos públicos de referencia como IFMIF-DONES, ITER o DEMO, y un ecosistema emergente de empresas con ambición global. Pero esas ventajas no son estructurales ni garantizadas. Son ventanas de oportunidad que se pueden cerrar -y rápido- si no se traducen en acción.

El momento de decidir es ahora. ¿Queremos ser mercado o motor? ¿Compradores de tecnología ajena o impulsores de una industria propia, estratégica y exportable?

**La energía de fusión es una enorme promesa energética. Y es hoy una apuesta de soberanía, de innovación y de futuro industrial para Europa y para España.**



# 07

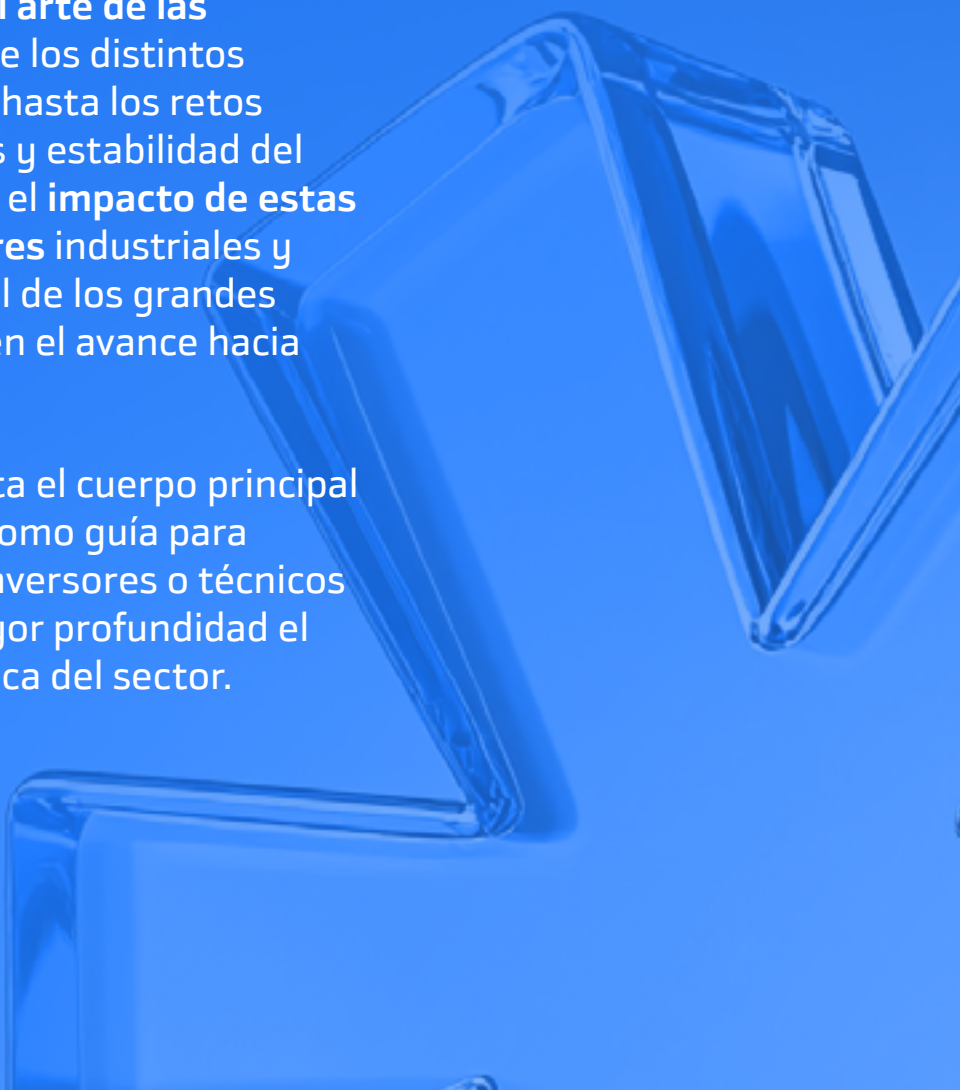
**ANEXO:  
TECNOLOGÍAS DE  
FUSIÓN E IMPACTO  
EN OTROS SECTORES**

# Tecnologías de fusión e impacto en otros sectores

Este anexo está dirigido a los lectores que deseen una comprensión más técnica y detallada del funcionamiento de la energía de fusión y de las tecnologías que la hacen posible. Proporciona el contexto científico y técnico necesario para valorar el potencial transformador de esta fuente de energía y entender los desafíos que condicionan su desarrollo industrial.

Aquí se aborda el **estado del arte de las tecnologías de fusión**, desde los distintos enfoques de confinamiento hasta los retos en materiales, combustibles y estabilidad del plasma. También se explora el **impacto de estas tecnologías en otros sectores** industriales y científicos, así como el papel de los grandes proyectos experimentales en el avance hacia una industria viable.

Este contenido complementa el cuerpo principal del informe y puede servir como guía para responsables de políticas, inversores o técnicos que deseen evaluar con mayor profundidad el grado de madurez tecnológica del sector.



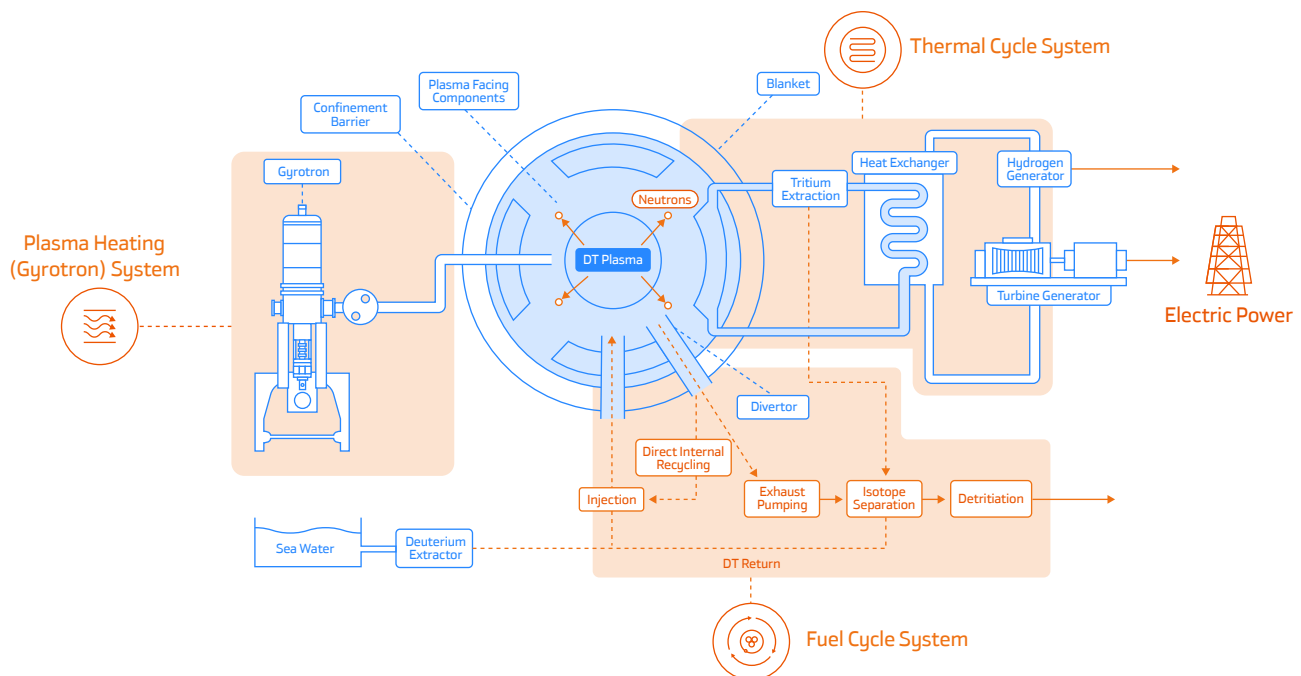
## 7.1 Estado de desarrollo de la tecnología de fusión

**“La fusión ya no es un reto científico. Es un reto de ingeniería integrada”.**

Con esta afirmación categórica, [Gianfranco Federici](#), Director de Programa del consorcio [EUROfusion](#), resumía el cambio de paradigma que vive la energía de fusión. Tras décadas de investigación en física de plasmas y de validación experimental con dispositivos como el [JET](#) (Joint European Torus, el mayor dispositivo experimental de fusión por confinamiento magnético en Europa) o el [NIF](#) (National Ignition Facility en EE. UU., el mayor experimento de fusión por confinamiento inercial del mundo), el desafío actual se sitúa en el dominio del diseño, la fiabilidad y la integración tecnológica.

Para **Federici**, avanzar hacia una planta operativa exige algo más que producción de energía puntual: exige construir un sistema complejo, capaz de generar electricidad de forma sostenida, segura y económicamente competitiva. Y para lograrlo, identifica cinco barreras técnicas interdependientes que deben resolverse de forma integrada:

### Kyoto Fussioneering Blog The Fusion Era



### Gestión del calor extremo

El plasma deposita energía en regiones muy localizadas, generando flujos térmicos superiores a  $10 \text{ MW/m}^2$ , unas diez veces más intensos que el calor en la superficie del Sol. El diseño y validación de componentes como el [divertor](#)<sup>5</sup> (la pieza del dispositivo encargada de extraer el calor y las impurezas del plasma, funcionando como una especie de "escape térmico") - capaz de soportar este estrés térmico durante ciclos prolongados- es uno de los problemas de ingeniería más críticos.

### Materiales estructurales resistentes a neutrones

Los materiales que forman las paredes de la máquina sufrirán daños acumulativos bajo bombardeo neutrónico intenso. A pesar de los avances en aleaciones avanzadas y recubrimientos, aún no existen materiales completamente cualificados para mantener su integridad estructural bajo estas condiciones.

### Producción y control del tritio

Usando el modelo de [DEMO europeo](#), una planta de 1 GW necesita unos 55 kilos de tritio por año de operación. Los diseños comerciales propuestos por las diferentes startups contemplan cantidades mucho más reducidas, del orden de 1 kilogramo o menos. En cualquier caso, el tritio debe ser producido en la misma máquina de fusión por los sistemas de [breeding](#)<sup>6</sup> (mecanismos que "fabrican" tritio dentro del propio dispositivo), usando materiales como litio líquido o cerámicas -una tecnología aún no demostrada a escala industrial-. Además, hay que tener en cuenta que para el primer 'encendido' de la máquina se requerirá una inyección de tritio externa y las reservas actuales a nivel mundial son de pocas decenas de kilos y además están decaendo. La vida media física del tritio es de 12,33 años.

### Integración funcional de sistemas

Todos los subsistemas (plasma, materiales, refrigeración, ciclo de combustible, mantenimiento remoto) deben operar en conjunto sin fallos. La validación parcial no es suficiente. Como insiste Federici: "No se puede validar la fusión por piezas. Hay que demostrar que el sistema funciona como un todo".

### Escalado industrial

Pasar de prototipos experimentales como [ITER](#) a máquinas comerciales implica desafíos de construcción, operación remota, disponibilidad y costes.

<sup>5</sup>Divertor: parte del dispositivo de fusión encargada de extraer el calor extremo y las impurezas del plasma. Es una de las zonas más exigentes del diseño, ya que debe soportar temperaturas y flujos de partículas muy elevados.

<sup>6</sup>Breeding: en energía de fusión se refiere al proceso mediante el cual el propio dispositivo de fusión genera el tritio que necesita como combustible. Para ello, materiales como el litio se colocan alrededor de la zona de fusión. Cuando los neutrones producidos por la fusión impactan en el litio, se produce tritio. Este mecanismo es clave porque no existen reservas suficientes de tritio en el mundo y las máquinas de fusión deben fabricarlo mientras operan.

**Federici** también advierte contra la tentación de apostar por tecnologías aisladas. Por ejemplo, reconociendo el valor de los [superconductores de alta temperatura \(HTS\)](#) para lograr máquinas más compactas, señala que aumentar el campo magnético implica también mayores fuerzas estructurales, lo que representa un reto adicional. "La integración lo cambia todo. Una tecnología puede parecer prometedora por sí sola, pero presentar complicaciones al integrarla en el sistema completo", afirma.

En este sentido, subraya la necesidad urgente de contar con plataformas como [IFMIF-DONES](#), que permitan validar materiales y componentes bajo condiciones realistas antes de integrarlos en una planta de fusión.

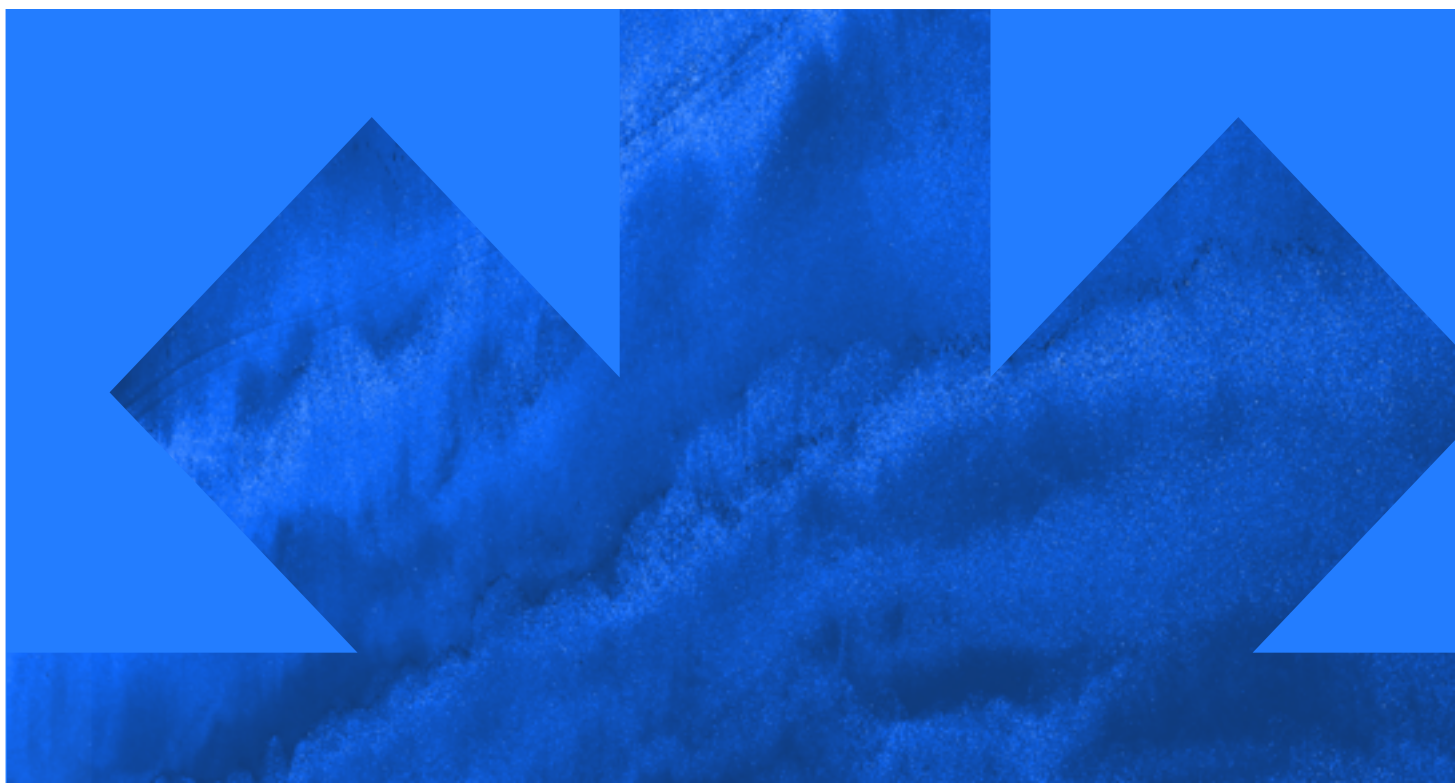
## Gianfranco Federici

 Ver vídeo



Alerta también sobre los plazos: el tritio disponible se agotará si no se avanza rápidamente hacia nuevos dispositivos. Finalmente, hace un llamamiento a mantener la honestidad científica frente a promesas excesivas:

**La fusión debe presentarse como lo que es: un reto técnico formidable, pero alcanzable, si se combinan visión a largo plazo, realismo industrial e inversión sostenida.**





## Competencia tecnológica: Múltiples rutas, un objetivo común

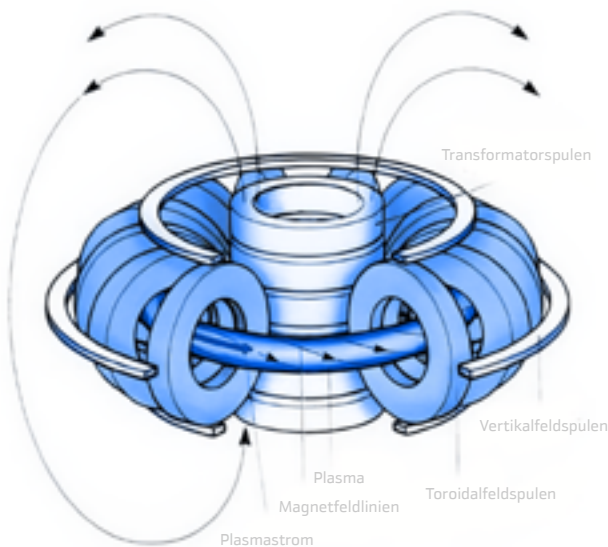
El desarrollo de la energía de fusión se organiza fundamentalmente en torno a dos grandes enfoques físicos: el confinamiento magnético, que estabiliza el plasma mediante intensos campos magnéticos, y el confinamiento inercial, que utiliza pulsos de energía extremadamente concentrados para desencadenar la fusión.

Ambos enfoques comparten los mismos retos fundamentales: **alcanzar temperaturas superiores a los 100 millones de grados** -más calientes que el núcleo del Sol- y **mantener estable la combustión del plasma** el tiempo suficiente para que la reacción de fusión genere más energía de la que se introduce. Este es el gran desafío: evitar que el plasma, que es extremadamente inestable y tiende a enfriarse o escapar, se apague antes de producir energía útil.

A partir de estas dos rutas principales han surgido múltiples configuraciones tecnológicas, con distintos niveles de madurez, escalabilidad y potencial comercial.

## Confinamiento magnético

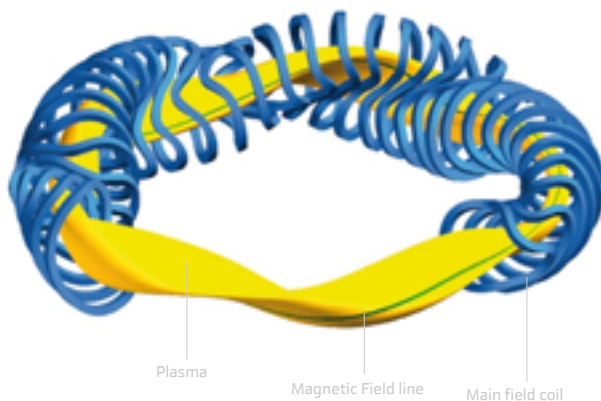
Técnica para mantener el plasma caliente y estable utilizando campos magnéticos que evitan que toque las paredes del dispositivo. Es el principio en el que se basan los tokamaks y stellarators.



### Tokamak

Es la configuración más madura y la base de la mayoría de los proyectos internacionales, como [ITER](#), [JT-60SA](#) o [SPARC](#). Confinan el plasma en forma de anillo mediante campos magnéticos toroidales. Su fortaleza reside en la experiencia acumulada, pero quedan desafíos a resolver en control de inestabilidades, mantenimiento remoto y protección ante el bombardeo de neutrones.

Fuente: <https://www.euronuclear.org/glossary/tokamak/>



### Stellarator

Variante del confinamiento magnético con geometría helicoidal tridimensional que permite operación continua sin necesidad de corriente inducida en el plasma. Aunque históricamente ha sido más difícil de construir y modelizar, dispositivos como [Wendelstein 7-X](#) están demostrando su viabilidad operativa con estabilidad prolongada.

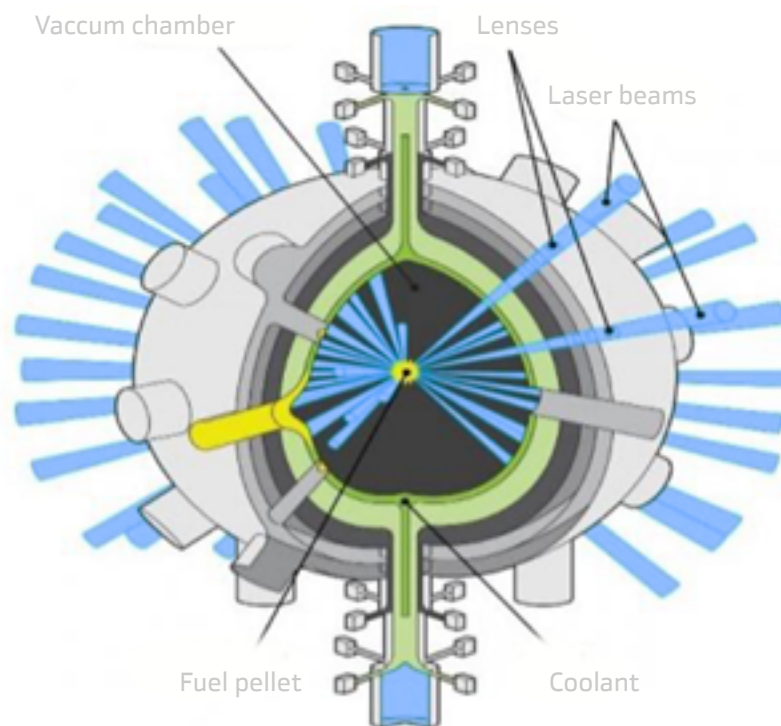
Fuente: [Wendelstein 7-X Wikipedia](#)

### Configuraciones avanzadas

Incluyen tokamaks esféricos (como el español [SMART](#) que además está basado en una configuración del plasma de triangulación inversa) o [Field-Reversed Configuration \(IFRC\)](#). Estas variantes buscan una eficiencia aún más alta de las máquinas de fusión, lo que implica a su vez una reducción de costes finales.

## Confinamiento inercial

Técnica de fusión que utiliza láseres o haces de partículas para comprimir una diminuta cápsula de combustible de forma muy rápida e intensa, logrando que los núcleos se fusionen antes de que la cápsula se desintegre.



Fuente: <https://kdmengineering.com/blog/nuclear-fusion-power-future>

### Láser (ICF)

Usa haces láser de alta potencia para comprimir y calentar cápsulas de combustible en escalas temporales extremadamente breves. El hito del NIF (EE.UU.) al lograr una ganancia neta puntual ha dado nuevo impulso a esta vía. Startups como [Xcimer](#), cuya Vicepresidenta de Diseño de Cámaras y Plantas, [Susana Reyes](#), participó en el foro, exploran versiones más repetitivas y económicamente viables.

### Híbridos inerciales/magnéticos

Tecnologías como el [Magnetized Target Fusion \(MTF\)](#) combinan campos magnéticos con compresión inercial. Aunque están en etapas tempranas, han atraído inversión privada por su potencial de compacidad y modularidad. Un ejemplo es la canadiense General Fusion.

En este contexto, [Pablo Rodríguez](#), Investigador Científico Principal y Jefe de Grupo en el [Centro de Ciencia del Plasma y Fusión del MIT](#), destaca que los tokamaks son, con diferencia, la tecnología de fusión más estudiada, con más de 50 dispositivos operativos y más de 100 construidos históricamente. Subraya que, pese a los avances, aún no se ha alcanzado el régimen de plasma en combustión -condición necesaria para extrapolar a máquinas comerciales-, y que lograrlo es esencial para resolver retos como la integración núcleo-borde o la viabilidad del divertor en condiciones reales de planta.



Rodríguez defiende la viabilidad de diseños más compactos basados en superconductores de alta temperatura y campos magnéticos intensificados, como los que impulsa el proyecto SPARC, en el que colabora activamente.

Señala que estos avances podrían acelerar los ciclos de innovación y reducir costes, pero advierte que persisten limitaciones técnicas críticas -protección del divertor, acumulación de impurezas o validación estructural- que deben resolverse antes de escalar estos diseños. **Pablo Rodríguez** también advierte que muchas proyecciones de rendimiento de futuros dispositivos de fusión se basan en datos empíricos obtenidos en máquinas anteriores.

El problema es que los nuevos diseños se salen del rango para el que esas fórmulas fueron validadas. Por eso defiende que se usen **modelos basados en las leyes de la física del plasma**, apoyados en los avances en **simulación computacional y uso de inteligencia artificial**, que hoy permiten predecir cada vez con mayor fiabilidad cómo se comportará el plasma en el núcleo de un dispositivo antes de construirlo.

**"Esta es una etapa emocionante para la teoría: por fin estamos en condiciones de optimizar el diseño de máquinas a partir de la física, no solo de la extrapolación".**

Como ejemplo de innovación en confinamiento magnético, [Manuel García Muñoz](#), Profesor de la Universidad de Sevilla y Director del [Laboratorio de Ciencia del Plasma y Tecnología de la Fusión](#), presenta el proyecto [Fusion2Grid](#), cuyo objetivo es diseñar la planta de fusión más compacta y económica posible. El proyecto se basa en tres pilares tecnológicos: tokamaks esféricos, superconductores de alta temperatura (HTS) y [plasmas con triangularidad negativa](#), una configuración que reduce la interacción del plasma con las paredes y mejora la distribución del calor.

El dispositivo [SMART](#) -un tokamak compacto ya operativo en Sevilla- sirve como banco de pruebas para validar estas soluciones. **García Muñoz** destaca que esta vía permite acelerar el desarrollo con costes más bajos y plazos reducidos, sin comprometer el rendimiento esperado. Aun así, subraya los retos asociados a esta estrategia:

“No hay magia: cada avance en compacidad exige rediseñar por completo la protección interna del dispositivo”. Las limitaciones de espacio obligan a innovar en el diseño del solenoide, el apantallamiento neutrónico y la producción de tritio.

Pasando al campo de la **fusión inercial**, **Susana Reyes** (Xcimer) considera el hito del **National Ignition Facility (NIF)** como un punto de inflexión: por primera vez, una instalación de fusión ha [superado la ignición científica de forma repetida](#), alcanzando en abril de 2025 una ganancia energética neta de **8,6 MJ** a partir de un pulso láser de **2 MJ**, con un **Q científico = 4**.<sup>7</sup> Esto marca el cierre del capítulo de la validación física.

Reyes identifica dos cuellos de botella clave en el camino hacia la fusión inercial comercial:

- **La fabricación masiva, rápida y económica de blancos (targets)**, que deben pasar de diseños altamente especializados y costosos a formatos industrializables. Hoy el NIF realiza un disparo cada varias horas; una planta comercial necesitará operar a frecuencias de hasta una vez por segundo.
- **El desarrollo de láseres repetitivos, eficientes y de alto rendimiento**, capaces de generar múltiples mega julios de forma fiable y asequible.

## Manuel García Muñoz

 Ver vídeo



<sup>7</sup>Ganancia: también se llama factor Q. Indica cuánta energía se obtiene en relación con la que se inyecta en el combustible. Ejemplo: una ganancia de 1,5 significa que se obtuvo un 50% más de energía de la que se introdujo.

En este contexto, **Xcimer** está desarrollando un nuevo sistema de **láser de gas (eXcimer)**, que supera las limitaciones de los láseres de estado sólido como los del NIF. Esta tecnología permitiría alcanzar **energías de hasta 10 MJ**, con una reducción estimada de **hasta 60 veces en el coste por unidad de energía** gracias a la eliminación de componentes ópticos frágiles y caros.

Además, el diseño conceptual de planta piloto que **Xcimer** plantea introduce mejoras clave respecto a configuraciones anteriores: solo dos haces láser (frente a los 192 del NIF), operación a <1 Hz para facilitar la evacuación de la cámara, uso de **pared líquida (FLiBe)** para proteger las estructuras sólidas y ampliar su vida útil, y un sistema integrado de breeding, extracción térmica y generación eléctrica.

Reyes recalca que esta línea de desarrollo se construye de forma completamente civil y abierta: “Los diseños de fusión civil no utilizan códigos clasificados ni tecnología militar. Estamos construyendo un ecosistema industrial puramente comercial en torno a esta vía”.

En este modelo, la colaboración público-privada es clave: Xcimer ya colabora con los laboratorios gubernamentales Savannah River en tritio y Oak Ridge en breeding blankets. Aclaramos que las posibles implicaciones militares no provienen de la fusión, sino del uso de láseres de alta potencia.

El paso de los logros científicos a la escala industrial requiere, además de ingeniería innovadora, un enfoque integrado de diseño, fabricación, operación y mantenimiento. Y, como concluye Reyes: “La historia de NIF demuestra que, cuando se persiste con rigor y visión a largo plazo, la fusión responde”.

## Susana Reyes

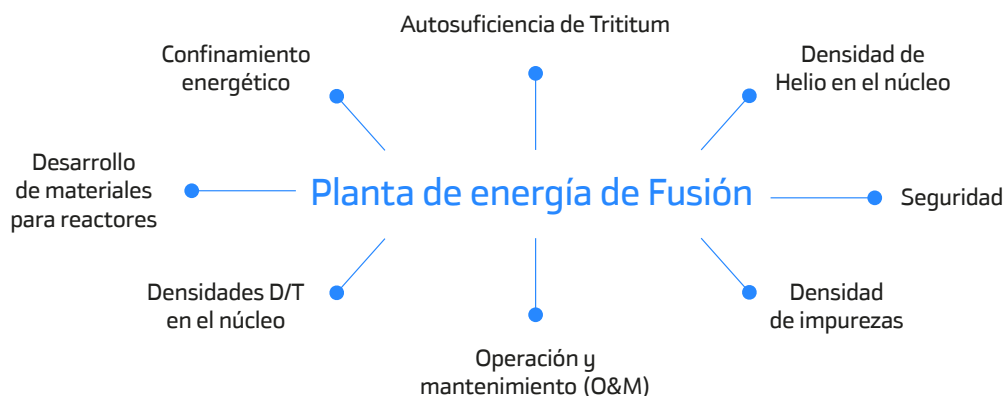
 [Ver vídeo](#)



## Validación modular y enfoque sistémico

Para evaluar el estado real de la fusión, [Carlos Hidalgo](#), Director del [Laboratorio Nacional de Fusión del CIEMAT](#), propone una herramienta estructural clara: una **taxonomía de ocho dimensiones clave** que cualquier diseño viable debe abordar de forma integrada. Estas dimensiones se dividen en **cuatro retos físicos** -confinamiento de energía, control de densidades del combustible (D/T), gestión de impurezas y control del helio residual- y **cuatro retos tecnológicos** -producción autosuficiente de tritio, desarrollo de materiales resistentes, mantenimiento/costes y gestión de la seguridad operativa-. "Podemos tener una física brillante, pero si los flujos de calor del plasma destruyen los materiales de la primera pared de la máquina de fusión o no somos capaces de controlar el nivel de impurezas, el diseño no servirá. La integración efectiva de los mencionados criterios científico -tecnológicos es la única garantía de viabilidad de un concepto de máquina de fusión".

### Fusión para la sociedad Integración en un espaciomulti-dimensional



**Hidalgo** defiende un enfoque de **validación modular**, basado en pruebas progresivas de cada subsistema antes de su integración final. Esta estrategia permite avanzar de forma más ágil y segura, anticipando posibles problemas tecnológicos sin comprometer el conjunto. Como ejemplo, señala que validar los módulos de generación de tritio ([breeding blanket](#)) en condiciones como las que ofrecerá **IFMIF-DONES** permitiría su escalado industrial sin necesidad de rediseñar cada parte de la máquina de fusión.

En la **fusión por confinamiento magnético**, los tokamaks son los principales candidatos a plantas piloto en el corto plazo, gracias a su rendimiento demostrado en dispositivos actuales y al desarrollo de **ITER**, mientras que los stellarators optimizados —de operación intrínsecamente estacionaria y resistentes a las interrupciones— se perfilan como una alternativa sólida para el despliegue comercial de la fusión.

## Carlos Hidalgo

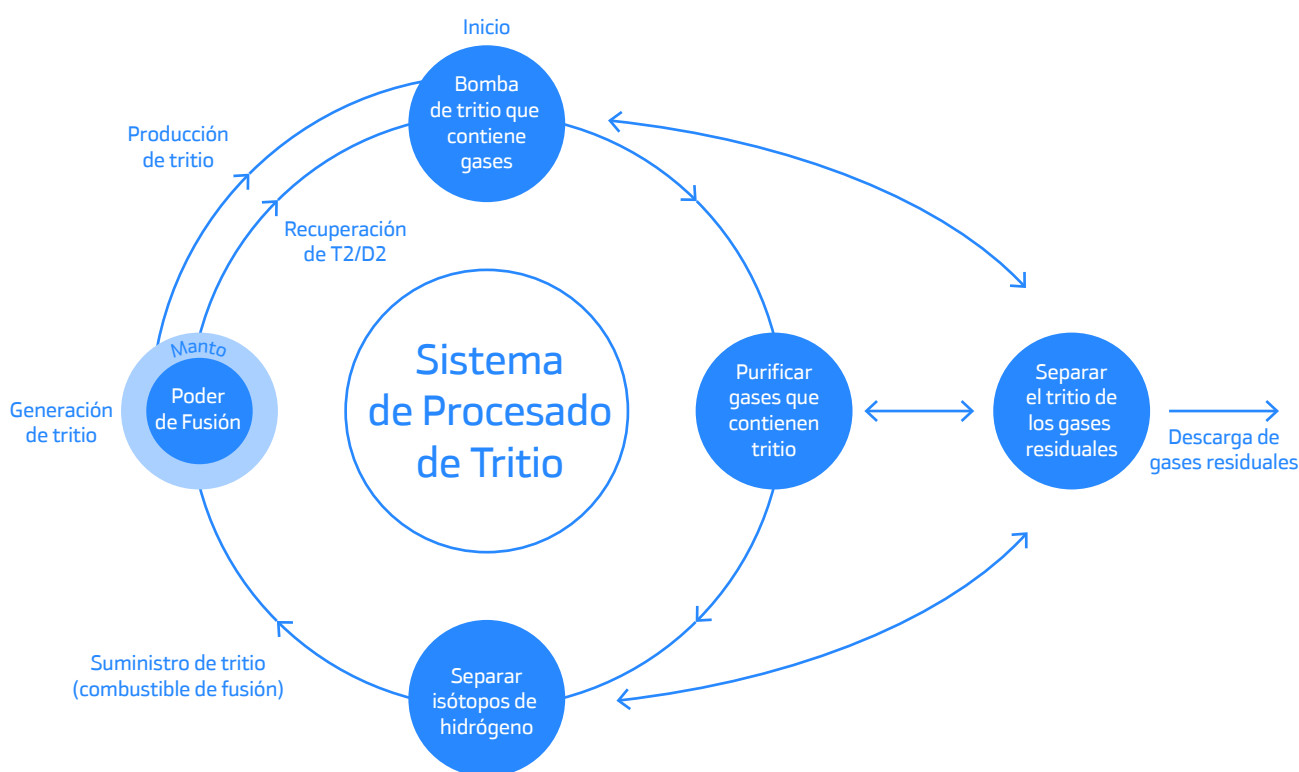
[Ver vídeo](#)



## Materiales y tritio como claves industriales

Los materiales y el combustible -especialmente el tritio- son factores estratégicos que pueden decidir el éxito o el fracaso de esta tecnología. Los materiales deben soportar el bombardeo constante de neutrones de alta energía y temperaturas extremas sin degradarse, mientras que el tritio, escaso y difícil de manejar, es esencial para mantener la reacción. Ambos condicionan el diseño de los dispositivos, su seguridad, sus costes y su escalabilidad industrial.

Como subraya [Richard Pearson](#), entonces representante de Kyoto Fusioneering, el tritio es "el elefante en la habitación". No solo es escaso, sino que su gestión afecta al rendimiento, la seguridad, los costes y la disponibilidad de la planta. "No es un tema que puedas añadir después. Tiene que estar en el centro del diseño desde el principio", explica.



Fuente: <https://www.srnl.gov/fact-sheets/fusion-fuel-cycle-research-and-development/>

El tritio requiere un sistema completo e integrado que funcione como un bucle cerrado: desde el suministro y almacenamiento hasta la separación isotópica, la extracción del breeding blanket y los sistemas de destritiación.

Cada fase implica retos técnicos, operativos y normativos.

## El ciclo del tritio en una máquina de fusión es un proceso clave para que un dispositivo de fusión pueda funcionar de manera autosuficiente.

**1. ¿Por qué es importante el tritio?** Las reacciones de fusión más factibles hoy en día usan una mezcla de deuterio (D) y tritio (T), dos isótopos del hidrógeno. Cuando D y T se fusionan, generan helio, un neutrón y liberan mucha energía. El problema es que el tritio es escaso en la naturaleza, ya que tiene una vida media corta (12 años) y prácticamente no se encuentra libre.

**2. Producción de tritio dentro del dispositivo de fusión (breeding):** Como no está previsto depender de fuentes externas, el dispositivo de fusión debe fabricar su propio tritio. Para ello se utiliza el llamado manto fértil o breeding blanket:

- Este manto rodea el plasma de fusión y está hecho con litio (en forma de litio líquido o sales/líquidos con litio).
- Los neutrones que salen de la reacción D-T impactan en el litio.
- Esa colisión transforma el litio en tritio nuevo, mediante reacciones nucleares.

**3. Extracción y gestión del tritio:** El tritio generado en el manto se extrae mediante sistemas especiales que separan el gas tritio del litio. Luego se purifica y almacena en sistemas seguros, porque es radiactivo. Este tritio se inyecta de nuevo en el plasma como combustible.

**4. Ciclo cerrado:** La idea es que el dispositivo de fusión sea autosuficiente en tritio, es decir, que produzca más tritio del que consume. Esto se mide con el Tritium Breeding Ratio (TBR): el objetivo es que  $TBR > 1$ . Si el dispositivo de fusión no puede generar suficiente tritio, habría que depender de reservas externas, lo cual es inviable a gran escala.

### 5. Retos técnicos:

- Diseñar mantos que generen suficiente tritio mientras soportan temperaturas y radiación extremas.
- Evitar fugas, ya que el tritio es un gas radiactivo que se difunde fácilmente.
- Gestionar el inventario para no quedarse sin combustible.
- Integrar el ciclo del tritio con el resto del dispositivo de fusión (confinamiento, generación eléctrica, seguridad).

## Richard Pearson

 [Ver video](#)



Uno de los elementos clave en ese ciclo es el **breeding blanket**, responsable de producir tritio, disipar calor y proteger los imanes de la máquina. [Klaus Hesch](#), asesor estratégico en el [Karlsruhe Institute of Technology \(KIT\)](#), lo definió como el "drivetrain" -el engranaje clave que transmite la energía- de la fusión. A día de hoy, no existe ningún sistema operativo que haya demostrado su funcionamiento integrado. Esta integración es uno de los principales cuellos de botella para la comercialización de la fusión.

Además, la viabilidad técnica y económica del diseño está condicionada por su eficiencia térmica, directamente relacionada con la temperatura de operación del fluido refrigerante. Cuanto más alta sea, mayor será la eficiencia, pero también las exigencias sobre los materiales.

Esta interdependencia es crítica para cerrar el diseño de la máquina y asegurar su competitividad en costes.

La complejidad aumenta si se consideran los materiales funcionales y estructurales necesarios. No hay un único material clave: se estima que más de una veintena de materiales distintos serán necesarios para funciones específicas (estructura, recubrimientos, multiplicadores, refrigeración, etc.).

Pearson lo resume de forma sencilla: "Todo en fusión es un reto de materiales"

## Klaus Hesch

 Ver vídeo



Validar estos materiales implica mucho más que comprobar su resistencia. [Ángel Ibarra](#), Director de [IFMIF-DONES España](#), destaca que la clave está en demostrar su durabilidad en condiciones operativas reales. "Lo importante no es saber si un material aguanta la radiación, sino si puede durar el ciclo completo de operación. Ese es el salto cualitativo que nos permitirá saber qué es viable y qué no".

En ese sentido, **IFMIF-DONES** será una instalación única a nivel mundial. Su capacidad para generar flujos de neutrones comparables a los de una máquina de fusión en operación, permitirá calificar materiales, simular condiciones de operación y reducir riesgos en el diseño. Según Ibarra, "no basta con una máquina: harán falta varias instalaciones tipo **IFMIF-DONES** en el mundo para obtener todos los datos necesarios".

## Ángel Ibarra

 [Ver vídeo](#)



Finalmente, el ciclo del tritio no solo plantea retos tecnológicos, sino también estratégicos y regulatorios. La seguridad, la trazabilidad, la disponibilidad y la eficiencia del combustible determinarán no solo la viabilidad de la planta, sino también su aceptación pública. Todo esto debe abordarse desde el diseño, no como una fase posterior.

**Como concluye Pearson: "Si no lo integras desde el principio, estás condenado a rediseñar el sistema más adelante".**

## Coordinación estratégica: de la creatividad técnica a la convergencia operativa

Como se puede comprobar, la divergencia técnica existe. Y esto es positivo. [Itxaso Ariza](#), Directora de Tecnología de [Tokamak Energy](#) y experta en sistemas complejos con trayectoria en el sector aeroespacial, recuerda que en tecnologías poco maduras como la fusión, **la pluralidad de enfoques no es un problema; es una condición necesaria para avanzar**. Lo importante es saber gestionarla.

“Cuanto menos madura es una tecnología, más necesario es combinar visiones distintas, escuchar todas las perspectivas y luego... discrepar y comprometerse”.



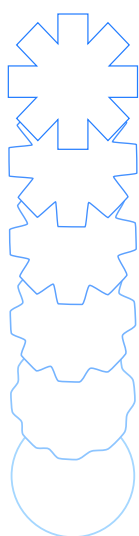
Su propuesta pasa por una estrategia clara: **divergencia técnica, convergencia estratégica**.

Esto implica identificar dos o tres rutas tecnológicas prometedoras, respaldarlas con inversión alineada y enfocar los esfuerzos en su validación, evitando la dispersión de recursos. Ariza también lanza una advertencia clave: “El verdadero reto hacia la fusión no está entre nosotros. Está fuera, entre quienes todavía no creen que esto sea posible”.



## Brechas tecnológicas que marcan el ritmo de la fusión

El diagnóstico de los expertos del Future Trends Forum es claro: los subsistemas críticos para la fusión comercial están aún en niveles bajos de [madurez tecnológica \(TRLs\)](#), y su integración en condiciones reales representa uno de los principales desafíos del sector, tal y como veíamos que apuntaba **Carlos Hidalgo** (CIEMAT) en su propuesta de **validación modular y enfoque sistémico**. Su integración en condiciones reales representa uno de los principales desafíos del sector y obliga a aplicar estrategias de validación progresiva de cada subsistema antes de su integración final.



**TRL 9** Sistema probado con éxito en entorno real

**TRL 8** Sistema completo y certificado a través de pruebas y demostraciones

**TRL 7** Desmostración de sistema o prototipo en entorno real

**TRL 6** Modelo de sistema o subsistema o demostración de prototipo en un entorno relevante

**TRL 5** Validación de componente y/o disposición de los mismos en un entorno relevante

**TRL 4** Validación de componente y/o disposición de los mismos en entornos de laboratorio

**TRL 3** Función crítica analítica y experimental y/o prueba de concepto característica

**TRL 2** Concepto y/o aplicación tecnológica formulada

**TRL 1** Principios básicos observados y reportados

Componentes clave como el breeding blanket (TRL 2), el manejo del tritio, el mantenimiento remoto o los materiales específicos de fusión (TRL 3) están en etapa experimental. Por otro lado, tecnologías transversales como el enriquecimiento de litio o los refrigerantes líquidos se sitúan en TRLs 3-4, aún por debajo del umbral industrial.

Solo algunos sistemas, como el calentamiento del plasma o los divertores en tokamaks, alcanzan niveles cercanos a TRL 6, a falta de la validación integrada bajo condiciones de carga térmica y de neutrones reales.

La puesta en marcha de infraestructuras clave como **IFMIFDONES**, junto con el desarrollo de nuevas plataformas para la validación de breeding blankets o bucles de tritio, representa un paso decisivo para cerrar las brechas de rendimiento e integración. Estas instalaciones van a permitir ensayar componentes críticos bajo condiciones representativas de fusión, algo esencial para avanzar en la madurez tecnológica del sistema. Además, abordar la integración de subsistemas -que no pueden validarse de forma aislada- exige un enfoque holístico desde fases tempranas, ya que las interdependencias técnicas y de seguridad son complejas.

**Avanzar hacia dispositivos viables exige acelerar el paso desde estos TRLs actuales. La madurez tecnológica de estos componentes es condición necesaria para que la fusión entre en su etapa industrial.**

## 7.2 Tecnologías con impacto más allá de la fusión

La investigación en energía de fusión está generando tecnologías con un potencial de aplicación mucho más amplio que el propio sector. Estos desarrollos, conocidos como *spillover technologies*, incluyen **superconductores** de nueva generación, **criogenia avanzada**, **materiales especiales** y **electrónica de potencia**. Su impacto alcanza sectores estratégicos como la **medicina**, el **transporte**, la **industria aeroespacial**, las **redes eléctricas** y la **computación científica**.

Estas tecnologías han surgido de la necesidad de:

- Operar a **temperaturas extremas** y manejar grandes campos magnéticos.
- Garantizar **robustez y precisión** en sistemas complejos.
- Desarrollar nuevos materiales que resistan radiación y condiciones críticas.



Para visualizar mejor el alcance de estas tecnologías derivadas de la fusión y su potencial en otros sectores, resumimos a continuación las principales líneas de desarrollo y algunas de sus aplicaciones más relevantes: antes de su integración final.

| Tecnología                      | Ejemplos                                               | Aplicaciones potenciales                                                      |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Superconductores HTS            | ReBCO, imanes de confinamiento magnético               | MRI, aceleradores, motores y generadores eléctricos, redes eléctricas DC      |
| Criogenia avanzada              | Refrigeración <30 K, helio superfluido                 | Transporte espacial, física de partículas, sistemas industriales              |
| Electrónica de potencia         | Convertidores modulares de gran potencia               | Redes eléctricas, transporte ferroviario y eléctrico, producción de hidrógeno |
| Materiales especiales           | Metales líquidos, blindajes neutrónicos, nuevos aceros | Dispositivos avanzados, aeroespacial, protección radiológica                  |
| Robótica y mantenimiento remoto | Sistemas desarrollados para ITER y DEMO                | Fisión nuclear, defensa, industria aeroespacial                               |

Aunque estas tecnologías nacen del entorno científico, ya están habilitando aplicaciones más allá del sector energético, desde aceleradores hasta sistemas de imagen médica o propulsión eléctrica. El camino hacia su industrialización ya está en marcha.

Entrando en detalle, el desarrollo de imanes **superconductores**, como los utilizados en el acelerador de partículas [LHC](#), ha permitido su aplicación en otros campos como la **resonancia magnética (MRI)** y la **espectroscopía de resonancia nuclear (NMR)**. Hoy, el **mercado mundial de MRI supera los 9.000 millones de dólares**, con previsión de alcanzar los **12.000 millones en 2030**.

En palabras de [Frédéric Bordry](#), ex Director de Aceleradores y Tecnología en el [CERN](#) y actual Director Técnico (CTO) de [Gauss Fusion](#): "La historia de la física de altas energías y la fusión demuestra que los superconductores tienen una enorme capacidad de transferencia tecnológica"

El reto actual está en el **escalado industrial de materiales HTS como el [ReBCO](#)**, que requieren gran precisión de fabricación y presentan desafíos de suministro. **Bordry** subraya la **urgencia de que Europa desarrolle su propia capacidad productiva**, hoy concentrada en China, Japón y Corea.

**"Sin una inversión de entre 100 y 200 millones de euros, Europa no podrá garantizar una cadena de suministro soberana en superconductividad".**

Respecto a la **criogenia**, las exigencias de refrigeración a temperaturas criogénicas -tradicionalmente inferiores a 4 K- han impulsado soluciones que hoy ya se aplican en grandes instalaciones científicas. **ITER**, el **LHC** y otros proyectos han establecido una base industrial sólida para operar con **helio superfluido**, mientras que nuevas líneas de desarrollo buscan trabajar en rangos más altos de temperatura (20–30 K), reduciendo el consumo energético y simplificando el diseño.

Por otro lado, la necesidad de sistemas eléctricos robustos para alimentar los imanes y gestionar cargas reactivas ha derivado en avances en **convertidores de potencia modulares**, con posibles aplicaciones en **transporte eléctrico, infraestructura ferroviaria o redes de distribución**.

## Frédéric Bordry

 [Ver vídeo](#)



## Un ejemplo ilustrativo de transferencia tecnológica

[Renaissance Fusion](#), una de las startups europeas que participó en el foro, ha convertido las tecnologías desarrolladas para dispositivos stellarator en una plataforma con aplicaciones industriales en múltiples sectores, como expone [Diego Cammarano](#), su Director de Operaciones.

La compañía está revolucionando la fabricación de bobinas superconductoras con una técnica muy innovadora que permite producir bobinas continuas, personalizables y más baratas. Este método simplifica radicalmente el montaje y abre la puerta a su uso en **motores eléctricos, equipos de imagen médica (MRI), trenes de levitación magnética o redes eléctricas en corriente continua.**

Además, Renaissance Fusion desarrolla sistemas de metales líquidos con aplicaciones que van desde el blindaje neutrónico hasta la producción de tritio y el control térmico en dispositivos de fusión avanzados (como los reactores de agua a presión [\(PWR\)](#)).

Esta capacidad de diversificación muestra cómo las tecnologías nacidas para la fusión pueden generar cadenas de valor en sectores tan diversos como el energético, el industrial o el sanitario.

**Cammarano** apunta que incluso dentro del ecosistema de fusión, existe espacio para **spillovers cruzados.**



### Diego Cammarano

 Ver vídeo

**"Más de 24 startups trabajan con litio líquido, y más de 18 desarrollan sus propios sistemas magnéticos HTS. Hay oportunidades reales de cooperación tecnológica entre competidores".**

## Claves para una transferencia efectiva

La transferencia tecnológica no es automática. Requiere:

### Infraestructuras compartidas de ensayo

Donde prototipos puedan evolucionar hacia productos industriales.

### Grandes ingenierías

Que ayuden a escalar sistemas complejos.

### Apoyo de instituciones gubernamentales

Como financiadores y usuarios iniciales.

### Alianzas con sectores estratégicos

Medicina, defensa, energía, aeroespacial y física de partículas.

Como señala Bordry: “Debemos pasar del laboratorio al sistema, y de ahí a la planta. Para ello necesitamos plataformas de validación, talento formado y colaboración público-privada”.

## 7.3 El papel de los proyectos experimentales

Los grandes proyectos experimentales son esenciales para validar tecnologías, consolidar la cooperación internacional y formar talento técnico y científico en torno a la energía de fusión. Su valor va más allá de los resultados físicos que obtienen: permiten construir capacidades industriales, marcos regulatorios y estándares comunes para una futura industria global.

### 01 ITER: una infraestructura para demostrar la viabilidad técnica

[ITER](#) es el mayor experimento de fusión del mundo. Su meta: generar 500 MW de potencia de fusión a partir de 50 MW de entrada, durante varios minutos, sin generación neta de electricidad. Este dispositivo experimental permite validar tecnologías esenciales para la fusión como los imanes superconductores, el control del plasma, el manejo del tritio o el escape de calor. Según [Alberto Loarte](#), máximo responsable de la División Científica del ITER, más del 90 % de los componentes se fabrican fuera del emplazamiento, en una red industrial global sin precedentes. Este modelo ha exigido fábricas dedicadas, estándares propios de limpieza y control de calidad, y protocolos de ingeniería más cercanos al sector aeroespacial que al energético.

Una lección crítica ha sido la necesidad de comenzar con **diseños detallados y completos**: cualquier modificación durante la construcción puede comprometer el calendario y el presupuesto. Otro aprendizaje clave ha sido la importancia de trabajar estrechamente con la industria para ajustar requisitos de diseño, producción e integración, especialmente en sistemas FOAK (First of a Kind). Gracias a la experiencia adquirida por empresas europeas en la construcción de ITER se ha creado en Europa la cadena de suministro de componentes para máquinas de fusión más completa a nivel global que a día de hoy suministran componentes a startups y proyectos de fusión a nivel global.

## 02 JET: pionero en cooperación europea

Otro proyecto clave en la historia de la fusión europea ha sido el [Joint European Torus \(JET\)](#), con sede en el Reino Unido. JET fue pionero en el uso de plasmas de deuterio-tritio y sentó muchas de las bases operativas y tecnológicas que hoy se trasladan a ITER. Su valor como banco de pruebas y como modelo de colaboración científica multinacional ha sido ampliamente reconocido.

## 03 JT-60SA y la cooperación Japón-Europa: lecciones de integración

El tokamak [JT-60SA](#), fruto de la colaboración entre Europa y Japón, ha permitido validar tanto tecnologías de confinamiento magnético como también modelos de gobernanza y trabajo conjunto entre agencias y proveedores. Como explica [Shunsuke Ide](#), Subdirector General del [Instituto Naka para la Fusión de QST](#), la interoperabilidad entre socios ha sido posible gracias a un "lenguaje común técnico" basado en herramientas compartidas, CAD coordinado y gestión conjunta de interfaces.

Ide destaca también la necesidad de establecer **códigos y estándares propios** para fusión, hoy inexistentes, y de formar líderes técnicos que puedan coordinar de forma integrada los múltiples subsistemas que componen una máquina de fusión. Estas competencias serán esenciales cuando la industria tome el relevo en la construcción de plantas comerciales.

## 04 IFMIF-DONES: irradiación para validar materiales

Uno de los cuellos de botella más citados en la hoja de ruta de la fusión es la validación de materiales sometidos a flujos de neutrones similares a los de una máquina de fusión. IFMIF-DONES, la instalación que se construye en Granada, será clave para cerrar esta brecha. A través de una fuente de neutrones de alta intensidad, permitirá probar el comportamiento de materiales estructurales y funcionales bajo condiciones de daño realista.

IFMIF-DONES será además un nodo esencial para la calificación de componentes, la creación de bases de datos de materiales y la preparación de futuras licencias regulatorias para plantas de demostración como [DEMO](#). Es, por tanto, un proyecto estratégico para toda la comunidad internacional.

## 05 NIF: la referencia inercial

En el ámbito de la fusión inercial, el [National Ignition Facility \(NIF\)](#) en Estados Unidos ha marcado, como ya se ha mencionado anteriormente, un hito histórico al lograr, por primera vez, una ganancia energética neta ( $Q > 1$ ). Aunque sus objetivos son diferentes a los de las máquinas magnéticas, su impacto simbólico y tecnológico ha sido clave para revitalizar el interés global en la fusión. El NIF ha demostrado la validez física del proceso y ha abierto la puerta a **nuevas vías tecnológicas que hoy exploran actores privados**.

## 06 CIEMAT y la base científica e industrial española

El CIEMAT, y en particular su [Laboratorio Nacional de Fusión](#)—que acoge una de las [Infraestructuras Científicas y Técnicas Singulares](#) (ICTS) de España—, ha desempeñado un papel clave en la consolidación en España de una comunidad de fusión de referencia internacional.

Esta comunidad reúne capacidades que abarcan la ingeniería y las tecnologías de fusión, así como la física de plasmas en sus vertientes teórica y experimental, y ha propiciado la creación de consorcios industriales que participan en contratos internacionales, desde componentes criogénicos hasta instrumentación de diagnósticos.



El **Laboratorio Nacional de Fusión** construyó y opera el stellarator TJ-II, un dispositivo cuyas características de diseño y conjunto de diagnósticos permiten estudiar aspectos fundamentales de los plasmas confinados magnéticamente. Recientemente, el CIEMAT, junto con IBM y aggit, ha implementado tecnologías de inteligencia artificial generativa en los experimentos del dispositivo.

Además, **CIEMAT** participa en programas experimentales de tokamaks y stellarators en la UE, EE. UU. y Japón, realiza tareas de ingeniería de sistemas para ITER, ha sido clave en el diseño de **IFMIF-DONES** y aborda la integración científico – tecnológica esencial para el desarrollo de una futura máquina de fusión basada en el concepto stellarator.

España ha desarrollado también infraestructuras clave como el [Centro de Láseres Pulsados \(CLPU\)](#), con capacidad para ensayar tecnologías asociadas a la fusión inercial, si así se decidiera. Y emergen nuevas iniciativas como el ya mencionado [SMART](#), el único tokamak en España, y de los pocos operativos en Europa, que busca posicionarse en el desarrollo de conceptos compactos y escalables con una orientación más comercial.

La ubicación de **IFMIF-DONES** España en Granada abre una ventana de oportunidad para crear un ecosistema tecnológico de alto valor, con centros de ensayo, incubadoras, formación avanzada y atracción de inversión internacional, como apunta su Director, **Ángel Ibarra**.

## Formación de talento y construcción de soberanía tecnológica

Más allá de sus logros científicos, estos proyectos son **escuelas tecnológicas**. Han permitido formar a miles de ingenieros, físicos, soldadores, operadores, expertos en vacío o criogenia que hoy trabajan en empresas y centros de investigación por todo el mundo.

En palabras de **Shunsuke Ide**, “el mayor valor de JT-60SA no es solo científico, sino humano: es una **fábrica de talento que será clave para construir el futuro de la fusión**”. Y como subraya **Alberto Loarte**, sin estándares propios, profesionales cualificados y estructuras de coordinación sólidas, no habrá industria viable de fusión.

**Shunsuke Ide**

**Alberto Loarte**

▶ Ver vídeo

▶ Ver vídeo



08

GLOSARIO

# Glosario

## Apantallamiento neutrónico

Conjunto de materiales o estructuras diseñadas para **proteger los componentes del dispositivo de fusión** (especialmente los imanes y sistemas electrónicos) del bombardeo de neutrones de alta energía producidos por la fusión. El apantallamiento reduce el daño en los materiales y ayuda a mantener la seguridad y la longevidad de la instalación.

## Breeding

Proceso mediante el cual el propio dispositivo de fusión genera el **tritio** que necesita como combustible. Se colocan materiales como el litio alrededor de la zona de fusión; cuando los neutrones producidos por la reacción impactan en el litio, este se transforma en tritio.

## Breeding blanket

Estructura que rodea el plasma en un dispositivo de fusión. Contiene litio (en estado líquido o cerámico) para producir tritio mediante **breeding**, además de absorber el calor de los neutrones y transferirlo al sistema de generación de electricidad.

## Confinamiento inercial

Técnica de fusión que utiliza láseres o haces de partículas para comprimir una diminuta cápsula de combustible o blanco de forma muy rápida e intensa, logrando que los núcleos se fusionen antes de que la cápsula se desintegre.

## Confinamiento magnético

Técnica para mantener el plasma caliente y estable utilizando campos magnéticos que evitan que toque las paredes del dispositivo de fusión. Es el principio en el que se basan los tokamaks y stellarators.

## Criogenia

Conjunto de técnicas utilizadas para alcanzar y mantener temperaturas extremadamente bajas (por debajo de  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). En fusión, la criogenia se usa para enfriar los **imanessuperconductores** y en algunos casos el combustible deuterio-tritio en estado sólido.

## Deuterio

Isótopo estable del hidrógeno ( $\text{H-2}$ ) con un protón y un neutrón. Se encuentra en el agua de mar y es abundante. Es el otro combustible básico de la fusión junto con el tritio.

## Destritiación

Proceso mediante el cual se eliminan o recuperan los restos de tritio presentes en los gases, líquidos o materiales del dispositivo de fusión. Es esencial para evitar pérdidas de tritio, reducir riesgos radiológicos y reciclar este combustible escaso dentro del sistema de fusión.

## Divertor

Parte del dispositivo de fusión encargada de extraer el calor extremo y las impurezas del plasma.

Es una de las zonas más exigentes del diseño, ya que debe soportar temperaturas y flujos de partículas muy elevados.

## Energía firme

Energía que puede producirse de forma constante y predecible, independientemente de las condiciones externas (como el viento o el sol). La fusión aspira a proporcionar energía firme.

### Energía neta

La diferencia entre la energía generada por la fusión y la energía total que se emplea para mantener el proceso y todos los sistemas del dispositivo de fusión. Es la condición necesaria para que la fusión sea comercialmente viable.

### Field-Reversed Configuration (FRC)

Tipo de dispositivo de confinamiento magnético que forma un plasma en forma de cilindro compacto, donde el campo magnético del plasma invierte la dirección del campo magnético externo. Los FRC son más pequeños y simples que los tokamaks o stellarators y pueden facilitar el uso de combustibles avanzados como el deuterio-helio-3.

### Ganancia (factor Q)

Relación entre la energía obtenida de la fusión y la energía introducida en el combustible.

$Q = 1$ : se obtiene la misma energía que se introduce.

$Q > 1$ : la reacción produce más energía de la que consume.

### Helio

Elemento resultante de la fusión de deuterio y tritio. Es un gas noble, inerte y no radiactivo.

### Ignición científica

Se alcanza cuando la **energía generada en el combustible de fusión** es igual a la **energía introducida en ese combustible**. Suele expresarse como un **factor  $Q = 1$** . No incluye la energía total usada por los sistemas externos del dispositivo (láseres, imanes, etc.).

### Láser (en fusión)

Dispositivo que emite un haz de luz concentrada y de gran potencia. En **confinamiento inercial**, varios láseres se enfocan simultáneamente sobre la **cápsula de combustible o blanco**, comprimiéndola hasta que el combustible de su interior alcanza las condiciones necesarias para la fusión.

### Magnetized Target Fusion (MTF)

Enfoque híbrido que combina características del **confinamiento magnético** y del **confinamiento inercial**. Un plasma confinado magnéticamente se comprime de forma rápida mediante un revestimiento mecánico o explosivo, logrando las condiciones necesarias para la fusión. MTF permite dispositivos de fusión más pequeños y potencialmente más económicos.

### Madurez tecnológica (TRLs)

Medida que indica el grado de desarrollo de una tecnología. Se basa en los Technology Readiness Levels (TRLs), una escala de 1 a 9:

TRL 1-3: investigación básica y pruebas de concepto.

TRL 4-6: validación y demostración de prototipos en entornos relevantes.

TRL 7-9: sistemas completos probados y listos para su despliegue comercial.

**En fusión, muchos sistemas aún se encuentran en niveles intermedios de madurez tecnológica.**

### Materiales resistentes a neutrones

Aleaciones avanzadas y recubrimientos capaces de soportar el bombardeo de neutrones de alta energía que ocurre en un dispositivo de fusión, evitando que se degraden con rapidez.

### MJ (megajulio)

Unidad de energía equivalente a **un millón de julios**. Para visualizarlo: 1 MJ es la energía necesaria para hervir aproximadamente **3 litros de agua**.

### MW (megavatio)

Unidad de potencia equivalente a **un millón de vatios**. El vatio es la unidad básica de potencia y equivale a **1 julio por segundo (1 J/s)**. Se utiliza para expresar la cantidad de energía que un sistema puede generar o consumir por unidad de tiempo.

## Neutrón

Partícula sin carga eléctrica presente en el núcleo de los átomos. En la fusión, los neutrones liberados transportan gran parte de la energía generada y se aprovechan para producir **breeding** (crear tritio) y generar calor.

## Pared líquida (FLiBe)

Sistema en el que el interior del dispositivo de fusión está recubierto por una **capa líquida** de sales fundidas de flúor, litio y berilio (FLiBe, por sus siglas en inglés). Esta pared líquida absorbe el calor y los neutrones de la fusión, ayudando a generar tritio y protegiendo las estructuras sólidas del dispositivo del intenso bombardeo de partículas.

## Plasma

El **cuarto estado de la materia**. Se forma cuando un gas se calienta tanto que sus electrones se separan de los núcleos, quedando partículas cargadas (iones y electrones) que se mueven libremente. En los dispositivos de fusión, el plasma puede superar los **100 millones °C**.

## Spillover technologies

Tecnologías desarrolladas para la fusión que **encuentran aplicaciones en otros sectores**. Ejemplos: avances en superconductores aplicados a redes eléctricas, nuevos materiales resistentes para aeronáutica o innovaciones en robótica para entornos extremos. Son un beneficio indirecto de la inversión en fusión.

## Stellarator

Tipo de dispositivo de fusión de confinamiento magnético, también con forma de rosquilla, pero más compleja y retorcida que el tokamak. Sus campos magnéticos se generan únicamente con imanes externos, lo que permite un **funcionamiento continuo** sin necesidad de inducir corriente en el plasma.

## Superconductores de alta temperatura (HTS)

Materiales capaces de **conducir electricidad sin resistencia** a temperaturas mucho más altas que los superconductores convencionales.

Los superconductores tradicionales necesitan temperaturas cercanas al cero absoluto ( $-269\text{ °C}$ , con helio líquido).

Los HTS funcionan a temperaturas más "altas" (por debajo de  $-135\text{ °C}$ ), lo que permite usar refrigeración con nitrógeno líquido, más sencilla y barata.

En fusión se emplean HTS para construir **imanes más potentes, compactos y eficientes**, clave en dispositivos como los **tokamaks**.

## Tokamak

Otro tipo de dispositivo de fusión de **confinamiento magnético** con forma de rosquilla. Utiliza campos magnéticos muy potentes para mantener el plasma caliente y estable el tiempo suficiente para que ocurra la fusión. Es el diseño más maduro tecnológicamente.

## Tritio

Isótopo del hidrógeno (H-3) con dos neutrones y un protón. Es uno de los combustibles principales de la fusión junto con el **deuterio**. Es raro en la naturaleza y por eso debe producirse mediante **breeding** en los dispositivos de fusión.

## Tritium Breeding Ratio (TBR)

Relación que mide la cantidad de tritio producido en un dispositivo de fusión en comparación con la cantidad de tritio consumido.

TBR = 1: se produce exactamente la misma cantidad de tritio que se consume.

TBR > 1: se produce más tritio del que se usa, condición necesaria para el autoabastecimiento del dispositivo de fusión.

# Agradecimientos

Nuestro agradecimiento a todos los miembros del Future Trends Forum (FTF) que participaron en la reunión, así como a quienes hicieron posible su organización.

De forma especial, agradecemos a **Sehila M. González** de Vicente, por su valiosa colaboración en la preparación del foro y en la elaboración de este informe.

Reconocemos también la destacada labor de **Frances Stead Sellers**, por su liderazgo y moderación de las sesiones; a **Antonio Gálvez**, autor de este informe; y al equipo de Prodigioso Volcán, por su creatividad e innovación puestas al servicio de este proyecto.

Una mención especial merece el equipo de la **Fundación Innovación Bankinter**, cuyo compromiso y dedicación han sido fundamentales para el desarrollo y el éxito del foro. Gracias a su esfuerzo, seguimos avanzando en nuestra misión de anticipar el futuro a través de la innovación.

Las opiniones expresadas en este informe son del autor y no reflejan la opinión de los expertos que participaron en la reunión del Future Trends Forum.

# Expertos del foro

## Carlos Alejaldre (España)

Presidente del Consejo de Administración de Fusion for Energy. Científico emérito del CIEMAT.

## Itxaso Ariza (España/Reino Unido)

Directora de Tecnología (CTO) en Tokamak Energy.

## Steven Biegalski (USA)

Responsable del Programa de Ingeniería Nuclear y Radiológica y Física Médica en Georgia Tech.

## Charles Bolden (USA)

Ex administrador de la NASA, fundador y consejero delegado emérito de The Charles F. Bolden Group LLC y Patrono de la Fundación Innovación Bankinter.

## Frédérick Bordry (Francia)

Director de Tecnología (CTO) en Gauss Fusion.

## Ivan Calvo (España)

Profesor de Investigación. Jefe de Teoría en el Laboratorio Nacional de Fusión, CIEMAT.

## Diego Cammarano (Francia)

Director de Operaciones en Renaissance Fusion.

## Miguel Angel Carrera (España)

Fundador y CEO de AVS.

## Ana Belén del Cerro (España)

Industrial Liaison Officer (ILO) en el Centro para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (CDTI).

## Dongmin Chen (China)

Decano/Profesor de la Escuela de Innovación y Emprendimiento de la Universidad de Pekín y Patrono de la Fundación de Innovación Bankinter.

## Juan de Dios Hermosín (España)

Director de Innovación y Tecnología en Ayesa.

## Maria Teresa Domínguez (España)

Director del Área de Negocio de Proyectos Avanzados, I+D+i y Nuevas Construcciones Nucleares en Empresarios Agrupados.

## Gianfranco Federici (Alemania)

Director de Programas en el Consorcio EUROfusion.

## Erik Fernández (España)

Director general de Ineustar.

## Jon Fuller (Reino Unido)

Director en Breakthrough Energy.

## Manuel García Muñoz (España)

Profesor de la Universidad de Sevilla y director del Laboratorio de Ciencia del Plasma y Tecnología de la Fusión.

## Grace Xin Ge (China)

Socia Fundadora de G-Bridge Partners, Asesora y ex Vicepresidenta y Chief Financial Officer en Du Xiaomany Patrono de Fundación Innovación Bankinter.

## Sehila Gonzalez (España/USA)

Directora global de Energía de Fusión en Clean Air Task Force.

## Klaus Hesch (Alemania)

Asesor Estratégico del Instituto de Tecnología de Karlsruhe (KIT).

## Carlos Hidalgo (España)

Director del Laboratorio Nacional de Fusión del CIEMAT.

## Ángel Ibarra (España)

Director de IFMIF Dones España.

## Shunsuke Ide (Japón)

Subdirector General del Instituto Naka de Ciencia y Tecnología de Fusión de QST.

# Expertos del foro

## Ralf Kaiser (Italia)

Director de Programas del Centro Internacional Abdus Salam de Física Teórica (ICTP).

## Richard Kivel (USA)

Director General de GrayBella Capital y Patrono de la Fundación Innovación Bankinter.

## Philip Lader (USA)

Ex embajador de EE.UU. ante la Corte de St. James's y patrono de la Fundación Innovación Bankinter.

## Phil Larochelle (USA)

Socio de Breakthrough Energy Ventures.

## Julia Li (China)

Fundadora y Directora General de HCD.

## Alberto Loarte (España/Francia)

Director de la División Científica del ITER.

## Emilio Méndez (España/USA)

Profesor de física en Stony Brook University. y Patrono de la Fundación para la Innovación Bankinter.

## Lucio Milanese (Italia/Alemania)

Cofundador y director de operaciones de Proxima Fusion.

## Tan Chin Nam (Singapur)

Ex Secretario Permanente del Servicio Público de Singapur y Asesor Corporativo y Patrono de la Fundación Innovación Bankinter.

## Richard Pearson (Reino Unido)

En el momento de la celebración del foro en junio era Cofundador y director de innovación en Kyoto Fusioneering.

## Susana Reyes (España/USA)

Vicepresidenta de Diseño de Cámaras y Plantas en Xcimer Energy.

## Pablo Rodríguez-Fernández (España/USA)

Investigador científico principal y jefe de grupo en el Centro de Ciencia y Fusión del Plasma del MIT.

## Rory Scott Russell (Reino Unido)

Socio Director en East X Ventures.

## Jens Schulte-Bockum (Alemania)

Presidente del consejo en Zayo Europa y Patrono de la Fundación Innovación Bankinter.

## Eden Shochat (Israel)

Socio en Alep y Patrono de la Fundación Innovación Bankinter.

## Scott Simon (USA)

Escritor y locutor de radio NPR y Patrono de la Fundación Innovación Bankinter.

## Sheila Stamps (USA)

Experta financiera y profesional de la gestión de riesgos y Patrono de la Fundación Innovación Bankinter.

## Wilfried Vanhonacker (Bélgica/China)

Experta financiera y profesional de la gestión de riesgos y Patrono de la Fundación Innovación Bankinter.

## Patrick White (USA)

Jefe del Grupo de Seguridad y Regulación de la Fusión en Clean Air Task Force.

## David Zaragoza (España)

Director de Fusión en IDOM.

## Juan Antonio Zufiria (España)

Presidente de la Fundación Innovación Bankinter.

