

ARTÍCULO ORIGINAL

# Avances en fusión nuclear y el papel de la inteligencia artificial a través de STRANAI

## *Advances in nuclear fusion and the role of artificial intelligence through STRANAI*

K.A. Raudales \* <sup>1</sup> y D.A. Sosa-Urquía  <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Energía Eléctrica (IEE); Universidad Nacional de San Juan; San Juan Capital J5400; San Juan; Argentina.. Correo electrónico: [kraudales@iee.unsj.edu.ar](mailto:kraudales@iee.unsj.edu.ar) (K.R.)

<sup>2</sup>Departamento de Materia Condensada; Universidad Nacional Autónoma de Honduras-Ciudad Universitaria; Tegucigalpa 11101; Honduras. Correo electrónico: [diego.sosa@unah.edu.hn](mailto:diego.sosa@unah.edu.hn) (D.S.)

\*Autor de correspondencia

Recibido: 30 de septiembre de 2025; Revisado: 8 de octubre de 2025; Aceptado: 25 de marzo de 2026; Publicado: 20 de junio de 2026

### Resumen

La fusión nuclear representa una alternativa energética prometedora, capaz de generar energía limpia, abundante y confiable, con menores impactos ambientales que los combustibles fósiles. No obstante, la implementación práctica de esta tecnología enfrenta desafíos significativos, como el mantenimiento de altas temperaturas y presiones, la estabilidad del plasma, la eficiencia energética y la durabilidad de los materiales. La Red Estratégica STRANAI integra la inteligencia artificial en diversas líneas de investigación para abordar estos retos, incluyendo la identificación automática de eventos físicos mediante imágenes y videos, la automatización del análisis de turbulencia, el desarrollo de modelos de inteligencia artificial explicables y basados en la física, la creación de repositorios y el diseño de modelos predictivos de disrupciones y estrategias de control del plasma. Este enfoque interdisciplinario permite optimizar la seguridad, eficiencia y confiabilidad de los futuros reactores de fusión y acelerar la transición hacia plantas comerciales de energía de fusión. El presente artículo revisa los avances recientes en fusión nuclear, los tipos de reactores existentes y los desafíos tecnológicos superados mediante el uso de inteligencia artificial.

**Palabras clave:** Fusión nuclear; STRANAI; Inteligencia artificial; Reactores de fusión

### Abstract

Nuclear fusion represents a promising energy alternative, capable of producing clean, abundant, and reliable energy with lower environmental impacts than fossil fuels. However, the practical

implementation of this technology faces significant challenges, including maintaining elevated temperatures and pressures, plasma stability, energy efficiency, and material durability. The STRANAI Strategic Network integrates artificial intelligence across multiple research lines to address these challenges, including automatic detection of physical events through images and videos, automation of turbulence analysis, development of explainable and physics-based artificial intelligence models, creation of multi-machine repositories, and the design of predictive disruption models and plasma control strategies. This interdisciplinary approach optimizes the safety, efficiency, and reliability of future fusion reactors and accelerates the transition toward commercial fusion power plants. This article reviews recent advances in nuclear fusion, existing reactor types, and the technological challenges addressed through artificial intelligence applications.

**Keywords:** Nuclear fusion; STRANAI; Artificial intelligence; Fusion reactors

## 1. Introducción

El sector energético global está en profunda transformación por el aumento de la demanda, el crecimiento industrial y la necesidad urgente de soluciones sostenibles, lo que obliga a diseñar estrategias para satisfacer esa demanda con el menor impacto ecológico posible.

El empeoramiento del cambio climático, impulsado por el consumo de combustibles fósiles, intensifica esta necesidad. El carbón, el petróleo y el gas constituyen el 70 % de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> [1].

Las energías solar, eólica e hidráulica se expanden rápidamente, pero afrontan problemas de escalabilidad por su intermitencia y limitaciones geográficas. Su carácter impredecible requiere sistemas de almacenamiento o estrategias de respaldo para mantener un suministro estable. Aunque la infraestructura renovable suele ser más rentable, actualmente no puede reemplazar por completo la energía de base proporcionada por los combustibles fósiles.

La fusión energética surge como una opción prometedora por su potencial de ser abundante, limpia y confiable. Emplea isótopos ligeros como deuterio y tritio para generar energía similar a la del sol [2]. A diferencia de la fisión, la fusión produciría helio como subproducto en lugar de los residuos radiactivos de larga vida asociados a la fisión. Además, el deuterio puede obtenerse del agua de mar, lo que sugiere una fuente potencialmente continua de combustible. Una gran cantidad de combustible de fusión puede generar tanta energía como ocho toneladas métricas de petróleo; genera pocos residuos (el helio es inerte) y utiliza recursos, deuterio del agua y tritio que puede generar litio, que ofrecen una provisión prácticamente ilimitada para el futuro.

No obstante, la fusión afronta importantes retos tecnológicos: crear y mantener las condiciones necesarias (presión extrema y temperaturas superiores a 100 millones de °C) demanda gran cantidad de energía y la tecnología sigue en etapas tempranas de desarrollo. Proyectos multinacionales como el ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) buscan demostrar la viabilidad práctica de la fusión y avanzar hacia plantas comerciales hacia 2050 [2, 3].

Para abordar estos desafíos, la Red Estratégica STRANAI (Red Estratégica para la Aceleración de la Investigación en Fusión Nuclear mediante técnicas de Inteligencia Artificial)

integra el conocimiento de expertos en fusión nuclear e inteligencia artificial (IA). STRANAI combina innovación tecnológica y colaboración interdisciplinaria, explorando seis líneas de investigación clave que abarcan desde el análisis avanzado de datos experimentales hasta el desarrollo de modelos predictivos para garantizar la seguridad y eficiencia de los futuros reactores de fusión [4].

El objetivo de este artículo es analizar los avances recientes en fusión nuclear y los desafíos tecnológicos asociados, con especial énfasis en el papel de la IA a través de STRANAI. Se busca examinar como la integración de técnicas de IA en diversas líneas de investigación contribuye a optimizar la seguridad, eficiencia y confiabilidad de los futuros reactores de fusión. Asimismo, se pretende presentar un panorama del estado actual de los reactores de fusión y de las estrategias tecnológicas para superar los desafíos que limitan su implementación a escala comercial.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2, se presenta una revisión del fenómeno de la fusión nuclear, detallando las condiciones necesarias para que ocurra, sus características fundamentales y las complejidades asociadas a su implementación práctica. La Sección 3 aborda las características que deben cumplir los reactores de fusión y presenta los distintos tipos desarrollados para el confinamiento del plasma, incluyendo tanto los enfoques de confinamiento inercial como magnético y los principales proyectos asociados. En la Sección 4, se introduce la Red Estratégica STRANAI, destacando las seis líneas de investigación que emplean IA para superar los principales desafíos tecnológicos de la fusión nuclear y los resultados hasta el momento. La Sección 5 se dedica a la discusión de los avances y retos presentados en las secciones anteriores, evaluando su relevancia para la viabilidad de la fusión como fuente energética. Finalmente, en la Sección 6 se presentan las conclusiones del estudio, resaltando las perspectivas futuras y la importancia de la integración de técnicas avanzadas de IA en el desarrollo de reactores de fusión eficientes y seguros.

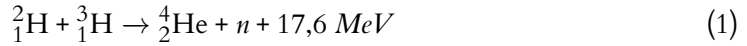
## 2. Física de la fusión nuclear

La fusión nuclear es una reacción en la que dos núcleos atómicos superan la fuerza electrostática repulsiva que los separa, formando nuevos núcleos y partículas subatómicas. La energía liberada es significativa cuando los núcleos iniciales son relativamente ligeros y poseen alta energía de enlace por nucleón [5].

La reacción básica de fusión nuclear que tiene lugar en el Sol es la conversión de dos protones en un deuterio. La conversión de un protón en un neutrón implica la interacción débil, dado como resultado la producción de un positrón y un neutrino, seguida inmediatamente por la aniquilación del positrón, que produce dos fotones gamma. Esta reacción inicial constituye el comienzo de una cadena de procesos, en su mayoría mediados por la interacción fuerte, que finalmente convierte cuatro protones en un núcleo de helio.

Para la investigación en la Tierra, la reacción de mayor interés es la reacción de deuterio ( ${}^2_1\text{H}$ ) y tritio ( ${}^3_1\text{H}$ ), debido a su alta sección eficaz a temperaturas relativamente alcanzables. En esta reacción, un deuterio y un tritio se convierten en un núcleo de helio ( ${}^4_2\text{He}$ ) y un neutrón rápido ( $n$ ). El núcleo de helio producido recibe el nombre de partícula alfa. La reactividad máxima para la reacción deuterio-tritio se obtiene alrededor de 150 millones de grados Celsius y decrece rápidamente fuera de ese intervalo.

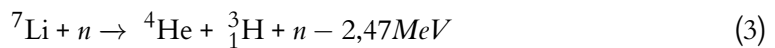
La literatura científica clásica describe esta reacción de la siguiente manera [6]:



Esta reacción libera aproximadamente  $17,6\text{MeV}$  de energía [7], y requiere temperaturas extremadamente altas, del orden de 100 millones de grados Celsius, así como presiones suficientes para superar la repulsión electrostática entre núcleos [6]. Para sostener este proceso se requiere alta temperatura, alta presión y un método de confinamiento eficaz. A dichas temperaturas, la materia existe en forma de plasma, un estado en el que los electrones están separados de los núcleos, favoreciendo las colisiones necesarias para la fusión. Para clasificar los plasmas se consideran principalmente la densidad de partículas y la temperatura, los cuales pueden variar en rangos extremadamente amplios, llegando a abarcar alrededor de 25 órdenes de magnitud en densidad y 7 en temperatura [5].

En las estrellas, la presión requerida proviene de la gravedad; en la Tierra, debe generarse artificialmente mediante métodos avanzados de confinamiento [8].

Además del deuterio, presente en aproximadamente una de cada 6000 moléculas de agua, esta reacción requiere tritio, un isótopo artificial del hidrógeno compuesto por un protón y dos neutrones. Debido a su vida media de aproximadamente 12 años, el tritio debe ser producido dentro del propio reactor a partir del litio (*Li*), aprovechando el neutrón generado en la reacción deuterio–tritio:



Las investigaciones recientes destacan el uso de la mezcla deuterio–tritio debido a su elevada producción de calor [7]. Sin embargo, la dependencia del tritio constituye una de las dificultades fundamentales para la sostenibilidad de esta tecnología [6]. La máxima eficacia de la reacción se alcanza alrededor de 60 keV (aproximadamente 700 millones de grados Celsius), mientras que la temperatura de operación práctica se sitúa comúnmente en 20 keV, aproximadamente 230 millones de grados Celsius [9].

A 20 keV, el plasma es suficientemente caliente como para destruir cualquier contenedor material, por lo que los sistemas de fusión actuales suelen operar de forma pulsada, confinando y calentando el plasma únicamente durante breves intervalos. El confinamiento se logra mediante campos magnéticos capaces de mantener las partículas cargadas dentro de la cámara, mientras que el calentamiento se consigue a través de campos electromagnéticos [9]. No obstante, este calentamiento es ineficiente: una fracción considerable de la energía de entrada se pierde y la conversión de energía térmica de fusión a electricidad también presenta limitaciones. Por ello, un reactor útil debe cumplir el denominado criterio de Lawson, que exige que la energía de salida supere a la energía suministrada externamente.

El calentamiento del plasma es ineficiente, de modo que una fracción sustancial de la energía útil se pierde en este proceso, y la conversión de la energía de fusión en electricidad también es ineficiente. Por tanto, un requisito para un dispositivo útil es que la razón entre la energía de salida con la energía de entrada sea mayor que 1. Esto se conoce como el criterio de Lawson [9].

## 2.1 Criterio de Lawson

Para la reacción deuterio-tritio, un reactor en estado estacionario debe cumplir una condición fundamental: la potencia de calentamiento suministrada por las partículas alfa generadas en la reacción debe ser suficiente para compensar las pérdidas por Bremsstrahlung y por conducción térmica, sin que exista aporte de energía externa. Esta condición se denomina ignición [10]. Para fines prácticos, el criterio se reformula introduciendo el triple producto:

$$nT\tau_E \quad (4)$$

Este producto relaciona directamente las condiciones físicas del plasma, densidad ( $n$ ) y temperatura ( $T$ ), con la calidad del confinamiento (definida como tiempo de confinamiento energético ( $\tau_E$ )). Para la fusión deuterio-tritio en el rango de 10-20 keV, el requisito para alcanzar ignición es [11]:

$$nT\tau_E \geq 3 \times 10^{21} \text{keV s m}^{-3} \quad (5)$$

Este parámetro constituye una métrica esencial para evaluar la capacidad de un dispositivo de fusión de operar en régimen autosostenido, y permite comparar diferentes aproximaciones tecnológicas [5].

El rendimiento de un sistema de fusión se evalúa mediante dos parámetros principales: el factor de ganancia  $Q$  y el factor de ganancia de ingeniería  $Q_e$  [10]. El primero, mide cuanta potencia térmica neta producen las reacciones de fusión en comparación con la potencia externa necesaria para mantener el plasma estable. En la reacción deuterio-tritio, solo una pequeña fracción de la energía, alrededor de 20 %, calienta el plasma; mientras que la mayor parte escapa en forma de neutrones, por lo que se requiere aporte externo hasta lograr la ignición, condición en la que  $Q$  tiene a infinito.

El umbral  $Q = 5$  marca el inicio del régimen de plasma de combustión, donde las partículas alfa generan tanto calor como el sistema de calentamiento externo. Sin embargo, para producir energía útil, se necesitan valores mucho mayores porque la energía térmica aun debe convertirse en electricidad mediante ciclos termodinámicos, que son inherentemente ineficientes.

Por ello, se emplea también el parámetro  $Q_e$ , que compara la electricidad neta obtenida con la electricidad suministrada al reactor. Este indicador es más representativo del desempeño real de una planta de energía basada en fusión [5].

Además, varios factores limitantes plantean desafíos significativos para la producción de energía por fusión: la inestabilidad del plasma (las perturbaciones pueden hacer perder el confinamiento, la temperatura y la presión necesarias), la degradación de materiales debido a temperaturas extremas y al bombardeo de neutrones, y la necesidad de asegurar un suministro sostenible de tritio, que debe producirse a partir del litio en el propio reactor. Debe apreciarse que los problemas de ingeniería asociados tanto al confinamiento magnético como al confinamiento inercial como base para una central eléctrica en funcionamiento son inmensos y, hasta ahora, no se han resuelto en la práctica [9].

## 3. Características del reactor de fusión nuclear y sus tipos

Los aspectos principales para un reactor de fusión se centran en la densidad, el tiempo de confinamiento de energía (cuanto tarda en escapar el calor), la temperatura y la probabilidad

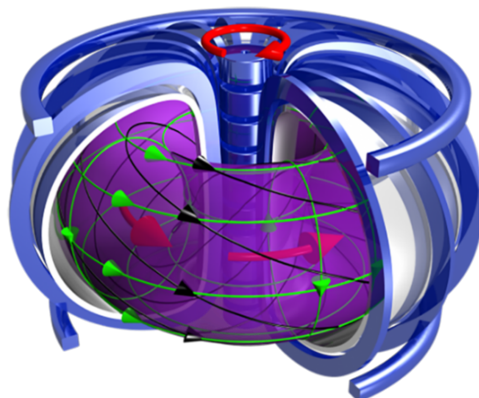
**Tabla 1.** Tipos de reactores con confinamiento inercial, país de desarrollo, método de compresión, combustible y el estado o resultados obtenidos. Elaboración propia.

Proyecto	País	Método de Compresión	Combustible	Estado/Resultados
NIF (National Ignition Facility)	Estados Unidos	Láseres de alta energía.	Deuterio-tritio	Primer plasma con ignición; avances fundamentales.
OMEGA	Estados Unidos	Láseres.	Deuterio-tritio	Instalación experimental de referencia.
Gekko	Japón	Láseres.	Deuterio-tritio	Experimentos avanzados en fusión confinada por inercia.
First Light Fusion	Reino Unido	Proyectil acelerador por gas-gun (no láseres).	Deuterio-tritio, Pruebas deuterio-deuterio	21 disparos con evidencia de fusión; máquinas M3 y BGF construidas.
Marvel Fusion	Alemania	Láseres de muy alta intensidad.	Protón-Boro 11	Investigación temprana; condiciones extremadamente exigentes.

por temperatura. Los enfoques de energía suelen dividirse según el mecanismo para confinar el combustible en reacción [12].

### 3.1 Confinamiento inercial

El confinamiento inercial consiste en comprimir diminutas cápsulas de combustibles de fusión mediante pulsos de nanosegundos, ya sea por ablación directa de sus capas externas o por rayos X generados en un hohlraum [13]. Los principales impulsores son láseres de alta potencia y haces de iones, aunque se han propuesto variantes con campos magnéticos creados por corrientes intensas en cables explosivos. Un reactor de este tipo operaría con varios ciclos de compresión y combustión por segundo para sostener la producción de calor. Su éxito depende de una alta simetría en la compresión, que puede requerir hasta 192 haces. Entre sus ventajas destaca que el equipo complejo se ubica fuera de la cámara de reacción, reduciendo daños y facilitando el mantenimiento. Sin embargo, la energía liberada en cada evento es limitada, por lo que el sistema necesita un impulsor altamente eficiente. En la actualidad, los láseres de alta potencia están más próximos a lograr la ignición, mientras que los haces de iones podrían ofrecer mayor eficiencia en aplicaciones comerciales. En la Tabla 1 se presentan los proyectos que utilizan este tipo de confinamiento, el país encargado de su desarrollo, el método de compresión, el combustible y el estado o resultados hasta la fecha.



**Figura 1.** Ejemplo de diseño de Tokamak. El campo eléctrico inducido por un transformador conduce una corriente (flechas rojas y grandes) a través de la columna de plasma, lo que genera un campo magnético poloidal que tuerce la corriente de plasma formando un círculo (círculo vertical verde). El otro campo magnético que recorre longitudinalmente la dona recibe el nombre de toroidal (círculo horizontal verde). La combinación de estos dos campos crea una curva tridimensional, como una hélice (representada en negro), en la que el plasma se encuentra muy confinado. Tomado de [14].

### 3.2 Confinamiento magnético

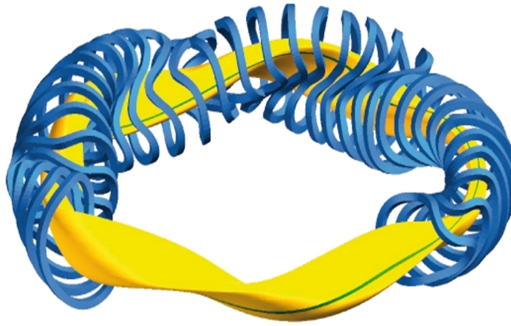
El confinamiento magnético busca mantener la fusión de forma continua en un plasma de baja densidad a temperatura de cientos de millones de grados, imposibles de contener con materiales sólidos. Para ello se emplean campos magnéticos que confinan las partículas cargadas en trayectorias helicoidales, contrarrestando la presión del plasma con campos de alrededor de 0.5 T generados por bobinas [14].

Las configuraciones se dividen en abiertas y cerradas. Las primeras, como los espejos magnéticos, presentan pérdidas excesivas en los extremos, aunque variantes híbridas como la configuración de campo revertido aún se investigan [15]. Las cerradas, en cambio, han sido el enfoque principal: en ellas, las líneas de campo forman un toroide con torsión helicoidal que estabiliza el plasma.

Dentro de estas, destacan dos diseños. El Tokamak, creado en los años cincuenta en la Unión Soviética, combina bobinas externas para el campo toroidal con corrientes internas del plasma para el campo poloidal. Actualmente, se emplean técnicas no inductivas para mantener la corriente y métodos de calentamiento como inyección de partículas neutras y ondas electromagnéticas [16], así como la aparición de superconductores de alta temperatura ha permitido diseñar reactores más compactos, potentes y económicos, aunque el tamaño reducido enfrenta desafíos en confinamiento, potencia de fusión y manejo térmico [5]. En la Figura 1 se explica el funcionamiento de este tipo de diseño.

Por su parte, el Stellarator, desarrollado en la misma época, genera el campo helicoidal solo con bobinas, eliminando la necesidad de corrientes en el plasma y reduciendo riesgos de inestabilidad, aunque a costa de diseños más complejos y menor flexibilidad operativa [17]. En la Figura 2, se ejemplifica este tipo de diseño, contrastando con el Tokamak como el plasma sigue la dirección de la configuración del bobinado.

Los plasmas de interés para la fusión presentan densidades cercanas a  $10^{20} m^{-3}$  para dis-



**Figura 2.** Ejemplo de diseño de Stellarator: Wendelstein 7-X. Un conjunto de bobinas (azul) rodea al plasma (amarillo), donde se resalta una línea de campo magnético (verde). Tomado de [17].

positivos de confinamiento magnético y alrededor de  $10^{31} m^{-3}$  para confinamiento inercial, con temperaturas próximas a 10keV [5]. En la Tabla 2 se presentan los proyectos que utilizan este tipo de confinamiento junto con sus características principales.

En la Tabla 3 se resumen los tipos de reactores con su principio de funcionamiento, sus características y diferencias principales, así como su factor de ganancia de ingeniería ( $Q_e$ ) o su aporte energético esperado:

#### 4. STRANAI y desafíos actuales

La red estratégica STRANAI busca integrar el conocimiento de expertos en fusión nuclear e IA para enfrentar los desafíos más complejos de esta tecnología emergente. Su enfoque combina innovación tecnológica y colaboración interdisciplinaria, explorando seis líneas de investigación clave que abarcan desde el análisis avanzado de datos experimentales hasta el desarrollo de modelos predictivos para garantizar la seguridad y eficiencia de los futuros reactores de fusión. Estas líneas buscan optimizar la monitorización, el control del plasma y la interpretación de resultados [4]. En la Tabla 4, se presenta un resumen de cada línea de investigación, con su objetivo principal, la aplicación de IA buscada y el beneficio que ofrece dicha línea.

##### 4.1 Identificación de eventos físicos a partir de imágenes y videos

Esta línea de investigación se centra en el desarrollo de técnicas avanzadas de análisis de imágenes y videos para la identificación automática de eventos físicos y anomalías en dispositivos de fusión nuclear. A través del uso de algoritmos de IA y aprendizaje profundo, se busca detectar fenómenos relevantes en tiempo real que, de otro modo, requerirían supervisión humana intensiva. Esta capacidad es crítica en instalaciones de gran envergadura como JT-60SA, ITER e IFMIF-DONES, donde los sistemas de diagnóstico visual constituyen una herramienta clave para la seguridad operativa y el monitoreo del plasma. La automatización permite comprender con mayor precisión la dinámica del plasma durante fases críticas de operación, contribuyendo a un control más efectivo de los experimentos y a la prevención temprana de inestabilidades.

**Tabla 2.** Tipos de reactores con confinamiento magnético, sus características principales y su  $Q_c$ . Elaboración propia.

Tipo de dispositivo	Ejemplos/Proyectos	Características principales
Tokamak	ITER, JET, ASDEX-U, DIII-D, EAST, KSTAR, JT-60SA, T-15/T-10	Confinamiento toroidal mediante bobinas y corriente en el plasma; operaciones pulsadas o casi continuas; tecnología más madura.
Tokamak compacto	ARC, SPARC	Uso intensivo de superconductores de alta temperatura; reactor compacto; 190 MW; $Q_c = 3$
Tokamak tipo DEMO	EU DEMO, JA DEMO, K-DEMO, CFETR	Reactores a escala GW; siguen tecnología ITER; uso de imanes superconductores de baja temperatura y posibles superconductores de alta temperatura; inicio de operación previsto para 2050.
Stellarator	Wendelstein 7-X, HSX, LHD	No requiere corriente en el plasma (operación continua); bobinado extremadamente complejo pero muy estable.
Stellarator (privado)	Princeton Stellarators, Renaissance Fusion, Type One Energy	Uso de superconductores de alta temperatura; geometrías simplificadas; objetivos de generación eléctrica para 2030.
Tokamak esférico	NSTX-U, MAST-U, QUEST	Menor relación de aspecto; mejor confinamiento por volumen; espacio reducido.
Tokamak esférico privado	Tokamak Energy (ST25, ST40, ST80-HTS, ST-E1), UKAEA STEP	Avances con superconductores de alta temperatura; objetivos de electricidad en 2030; ruta por etapas.
Configuración de campo invertido	TAE Technologies, Princeton Fusion Systems (DFD)	Configuración compacta sin campo toroidal externo; potencial para combustibles avanzados; aplicaciones en fusión y propulsión espacial.
Spheromak	CTFusion (Dynomak)	Configuración simple sin bobinas toroidales; diseño con superconductores de alta temperatura y Flúor-Litio-Berilio; 1000 MW previstos.
Z-pinch estabilizado	Zap Energy (FuZe)	Confinamiento por corriente propia del plasma, estabilizado por flujo cortante; diseño simple sin superconductores; objetivo de reactor modular de 50 MW.
Fusor	Horne Technologies	Enfoque electrostático; uso de superconductores de alta temperatura; aplicaciones terrestres y espaciales.

Los diagnósticos utilizados en dispositivos de fusión nuclear como JET permiten obtener diversas magnitudes físicas que caracterizan a los TIEs (Eventos Transitorios de Impurezas, que son pequeñas partículas que se producen como subproductos en dispositivos de fusión nuclear), como demuestran [18]; entre ellas la velocidad (calculada a partir del desplazamiento entre fotogramas consecutivos), la composición espectral identificada mediante líneas de emisión que revelan elementos como tungsteno o titanio, y una estimación de sus dimensiones basada en el área y forma observadas en imágenes 2D. También se determina un puntaje

**Tabla 3.** Tipos de reactores de fusión nuclear, sus características principales y su  $Q_e$ . Elaboración propia.

Tipo de Reactor	Principio de funcionamiento	Características y diferencias principales	$Q_e$
Confinamiento inercial	Uso de láseres o haces de partículas para comprimir plasma.	Fusiona el combustible en pulsos muy breves, usando láseres o haces de iones. Más experimental, enfoque diferente al magnético.	Se espera una producción de 150 MW.
Tokamak	Confinamiento magnético en forma de toro.	Diseño más investigado y avanzado. Utiliza campos magnéticos intensos para confinar el plasma. Proyecto ITER es un Tokamak.	3
Stellarator	Confinamiento magnético con bobinas en forma helicoidal.	Configuración distinta que no requiere corriente eléctrica en el plasma, mejor estabilidad a largo plazo, pero más complejo.	> 1
Magneto-inercia	Combinación de confinamiento magnético y compresión inercial.	Combina los beneficios de ambos métodos; aún en fase experimental.	Se espera una producción de 25 MW.

de confianza para cada detección mediante modelos de regresión logística, se analizan intensidades de emisión para identificar elementos presentes y se consideran parámetros de imagen como brillo, circularidad y ruido de fondo, que influyen en la calidad de la caracterización. Estas magnitudes físicas se emplean como variables de entrada en modelos de IA destinados a mejorar la detección y clasificación de TIEs, predecir comportamientos disruptivos, optimizar la configuración de cámaras, analizar tendencias a lo largo de múltiples ciclos de operación, alimentar simulaciones del comportamiento del plasma y desarrollar estrategias de mitigación que reduzcan el impacto de estas partículas en el rendimiento y seguridad del reactor.

#### 4.2 Automatización en el análisis de turbulencia mediante reflectometría Doppler

La reflectometría Doppler proporciona información esencial sobre los flujos perpendiculares y las fluctuaciones de densidad del plasma, elementos fundamentales para entender el transporte turbulento en los dispositivos de fusión. Tradicionalmente, la interpretación de estos datos requiere una intervención manual intensiva, en la que expertos ajustan perfiles gaussianos a señales ruidosas y complejas. Esta línea de investigación aplica técnicas de IA para automatizar y acelerar el procesamiento de datos, reduciendo la dependencia de análisis manual y permitiendo un estudio exhaustivo de grandes volúmenes de información en distintas condiciones de plasma. La automatización no solo optimiza recursos y tiempo, sino que también mejora la consistencia y reproducibilidad de los análisis, facilitando la identificación de patrones y fenómenos relevantes que contribuyen a un mejor control del plasma.

[19] Obtienen un conjunto de magnitudes físicas fundamentales para caracterizar el comportamiento del plasma, entre ellas las fluctuaciones de densidad, el campo eléctrico radial, las temperaturas de iones y electrones, así como sus gradientes asociados. También se miden relaciones entre fluctuaciones y parámetros globales de transporte, la velocidad perpendicular derivada del desplazamiento Doppler y la amplitud total de las fluctuaciones, todas ellas claves para evaluar la estabilidad y el rendimiento del plasma. Estas magnitudes se emplean como variables de entrada en modelos de IA destinados a predicción de comportamiento turbulento, optimización de parámetros operativos, simulaciones de transporte, control en tiempo real, detección de anomalías y mejora de los propios diagnósticos. Su obtención se basa en técnicas como interferometría para densidad promedio, espectroscopia de cristales de imagen rayos X y espectroscopia de recombinación por intercambio de carga para medir temperaturas y rotación, análisis de perfiles de densidad y temperatura electrónica, cálculo de fluctuaciones mediante potencia de señal y calibraciones especializadas, además del estudio de gradientes normalizados. Finalmente, la correcta interpretación de estas magnitudes requiere considerar coherencia entre temperatura de iones y electrones, la dependencia de los perfiles del plasma y la representatividad de los regímenes operativos, todo lo cual permite avanzar en la comprensión de la turbulencia, un fenómeno crucial que se manifiesta a través de fluctuaciones en plasmas y que influye el rendimiento de los dispositivos de fusión, y mejorar el confinamiento en dispositivos de fusión.

#### ***4.3 Aprendizaje automático explicable, IA basada en la física y extracción de ecuaciones a partir de modelos de IA***

Los modelos de IA en fusión nuclear deben equilibrar precisión y comprensibilidad, ya que comprender los mecanismos detrás de las predicciones es crucial para la confianza científica y la aplicación segura de estas herramientas. Esta línea de investigación se enfoca en desarrollar IA explicable y basada en principios físicos, que permita interpretar los resultados y extraer ecuaciones o relaciones subyacentes en los fenómenos de plasma. Esto es especialmente relevante para futuros reactores como ITER, DEMO e IFMIF-DONES, donde los sistemas de diagnóstico y control automatizado basados en IA jugaran un papel central. La interpretabilidad de los modelos no solo facilita la validación experimental, sino que también potencia el conocimiento científico, permitiendo optimizar el control predictivo del plasma y avanzar hacia una operación segura y eficiente de los reactores de fusión.

#### ***4.4 Creación de bases de datos multi - maquina y repositorios de código para su intercambio dentro de la red***

La gestión eficiente de grandes volúmenes de datos experimentales es un componente crítico para la investigación colaborativa en fusión nuclear. Esta línea se centra en el desarrollo de repositorios seguros y centralizados que permitan el intercambio fluido de datos, códigos de análisis y documentación técnica entre los miembros de la red STRANAI. La implementación de servidores encriptados garantiza la integridad, preservación y control de versiones de la información, mientras que la centralización facilita el acceso en tiempo real a recursos actualizados. Este enfoque mejora la colaboración interdisciplinaria, acelera los procesos de investigación y asegura que los avances tecnológicos y metodológicos se compartan de

manera eficiente y confiable entre los distintos grupos de investigación.

#### **4.5 Control del plasma y estudio de los límites operativos**

Alcanzar regímenes operativos de alto rendimiento sin inducir inestabilidades constituye uno de los mayores desafíos de la fusión nuclear. Esta línea se enfoca en la definición, análisis y optimización de estrategias de control del plasma, así como en la identificación de los límites operativos que permiten un funcionamiento seguro y estable. La IA permite simular y predecir escenarios complejos, contribuyendo a diseñar estrategias de control que maximicen la eficiencia y la estabilidad del plasma. Estos avances son esenciales para superar uno de los principales obstáculos hacia la energía de fusión práctica, asegurando que los futuros reactores puedan operar de manera sostenida y confiable bajo condiciones extremas.

#### **4.6 Desarrollo de modelos predictivos para la mitigación, evitación y prevención de disrupciones**

Las disrupciones representan eventos críticos en los que el plasma pierde su confinamiento en cuestión de milisegundos, poniendo en riesgo la integridad de los Tokamaks. Esta línea de investigación se centra en desarrollar modelos predictivos de IA que anticipen la ocurrencia de estas disrupciones, permitiendo intervenir a tiempo mediante acciones preventivas o de mitigación. Los modelos basados únicamente en teoría no logran tasas de predicción suficientemente altas, por lo que la IA ofrece una alternativa poderosa para mejorar la seguridad y la viabilidad operativa de los reactores. La capacidad de predecir y prevenir disrupciones es clave para garantizar la durabilidad de los materiales expuestos al plasma y para avanzar hacia una fusión nuclear confiable y comercialmente viable.

### **5. Discusión**

La fusión nuclear representa una alternativa energética de gran potencial, capaz de ofrecer una fuente limpia, abundante y segura frente a los problemas derivados del uso de combustibles fósiles y la intermitencia de las energías renovables. No obstante, la creación y mantenimiento de condiciones de alta temperatura y presión, necesarias para sostener la reacción de fusión, constituyen un desafío de ingeniería sin precedentes. Los proyectos de confinamiento magnético, como los Tokamaks y Stellarator, y los de confinamiento inercial, mediante láseres o haces de partículas, muestran avances significativos, pero todavía enfrentan limitaciones en términos de eficiencia energética, estabilidad del plasma y durabilidad de materiales.

En este contexto, STRANAI representa un enfoque innovador al incorporar IA para abordar los problemas más complejos de la fusión. La identificación automática de eventos físicos mediante imágenes y videos mejora la monitorización en tiempo real; la automatización del análisis de turbulencia optimiza el procesamiento de grandes volúmenes de datos; y los modelos de IA explicable permiten comprender y validar científicamente los fenómenos del plasma. Asimismo, la creación de bases de datos multi – maquina y repositorios de código facilita la colaboración entre investigadores, mientras que los modelos predictivos de disrupciones y las estrategias de control del plasma contribuyen directamente a la seguridad y estabilidad operacional de los reactores. La integración de estas herramientas de IA es

**Tabla 4.** Líneas de investigación de STRANAI y aplicación de IA en fusión nuclear. Elaboración propia.

Línea de investigación	Objetivo principal	Aplicación de IA	Beneficio clave
Identificación de eventos físicos	Detectar y clasificar eventos en plasma mediante imágenes y videos.	Procesamiento de imágenes y video.	Monitoreo en tiempo real y prevención de inestabilidades.
Análisis de turbulencia	Procesar datos de reflectometría Doppler.	Automatización.	Reducción de intervención manual y análisis rápido de grandes volúmenes de datos.
IA explicable y basada en física	Crear modelos interpretables y precisos.	Modelos de IA explicable y física.	Generación de confianza y conocimiento científico fiable.
Bases de datos y repositorios	Centralizar datos y códigos.	Servidores seguros y encriptados.	Mejor colaboración y acceso en tiempo real a recursos.
Control del plasma	Optimizar regímenes operativos y estrategias de control.	Modelos predictivos y análisis.	Estabilidad y alto rendimiento del plasma.
Modelos predictivos y análisis	Predecir y mitigar disrupciones del plasma.	IA predictiva.	Protección de los reactores y operación segura.

fundamental para superar barreras tecnológicas que, de otro modo, limitarían la viabilidad de la fusión como fuente energética comercial.

A pesar de estos avances, persisten desafíos significativos. La eficiencia de conversión de energía, el manejo de materiales bajo condiciones extremas y la producción sostenible de tritio son problemas que requieren soluciones interdisciplinarias y un desarrollo tecnológico continuo. Los modelos de IA, si bien prometen mejorar la predicción y control de fenómenos complejos, dependen de la disponibilidad de datos de alta calidad y de la validación experimental constante. La colaboración internacional y la consolidación de redes como STRANAI serán clave para acelerar el progreso hacia reactores de fusión funcionales y seguros.

## 6. Conclusiones

La fusión nuclear se perfila como una alternativa energética con un gran potencial para generar energía limpia, abundante y confiable, ofreciendo menores impactos ambientales en comparación con los combustibles fósiles. Sin embargo, los desafíos tecnológicos asociados, tales como la estabilidad del plasma, la eficiencia energética y la durabilidad de los materiales, exigen enfoques multidisciplinarios que integren física, ingeniería y ciencia de datos. En este contexto, la Red Estratégica STRANAI ha demostrado que la aplicación de IA en el análisis de datos experimentales, el control del plasma y la predicción de disrupciones

puede acelerar significativamente la investigación y mejorar la seguridad y eficiencia de los futuros reactores de fusión. Además, la creación de repositorios centralizados y bases de datos facilita la colaboración internacional y el intercambio de conocimiento, promoviendo la innovación tecnológica en el campo de la fusión nuclear. La combinación de fusión nuclear con herramientas avanzadas de IA constituye un paso crucial hacia el desarrollo de plantas comerciales, contribuyendo al establecimiento de un sistema energético sostenible y resiliente frente a los retos del cambio climático y la creciente demanda global de energía.

**Contribución de autoría:** Conceptualización, K. R.; investigación, K. R. y D. S.; metodología, K. R.; administración del proyecto, K. R.; supervisión, K. R.; validación, K. R.; redacción del borrador original, K. R. y D. S.; revisión y edición del manuscrito, K.R. y D. S. Todos los autores han leído y aprobado la versión publicada del manuscrito.

**Conflictos de interés:** Los autores declaran no tener conflictos de interés.

**Disponibilidad de datos y materiales:** No se crearon ni analizaron nuevos datos en este estudio.

**Declaración del Comité de Ética Institucional:** No aplica.

**Declaración de consentimiento informado:** No aplica.

**Financiamiento:** Esta investigación no recibió financiamiento externo.

## Referencias

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 2023. doi: 10.1017/9781009157896.
- [2] ITER. *About ITER*. <https://www.iter.org/few-lines>. Accedido: 2025. 2025.
- [3] Katoch G, Sharma G, Alaghbari M, Ved A, Kaur J, Rajiv A, Singh A, Yadav Y y Khairandish MI. Fusion energy: a sustainable pathway to meeting future global energy demands. En: *Discover Sustainability* 6.(1) (2025). doi: 10.1007/s43621-025-00906-6.
- [4] CIEMAT. *PROJECT STRANAI*. <https://sites.fusion.ciemat.es/stranai/>. Accedido: 2025. 2025.
- [5] Meschini S, Laviano F, Ledda F, Pettinari D, Testoni R, Torsello D y Panella B. Review of commercial nuclear fusion projects. En: *Frontiers in Energy Research* 11 (2023). doi: 10.3389/fenrg.2023.1157394.
- [6] Ongena J, Koch R, Wolf R y Zohm H. Magnetic-confinement fusion. En: *Nature Physics* 12.(5) (2016), 398–410. doi: 10.1038/nphys3745.
- [7] Bohm D y Gross EP. Theory of Plasma Oscillations. A. Origin of Medium-Like Behavior. En: *Physical Review* 75.(12) (1949), 1851–1864. doi: 10.1103/PhysRev.75.1851.
- [8] Raman AP, Anoma MA, Zhu L, Rephaeli E y Fan S. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight. En: *Nature* 515.(7528) (2014), 540–544. doi: 10.1038/nature13883.
- [9] Cottingham WN y Greenwood DA. Fusion reactors. En: *An introduction to Nuclear Physics*. Second. Cambridge University Press, 2001, 143–146.
- [10] Freidberg JP. *Plasma Physics and Fusion Energy*. Cambridge University Press, 2007. doi: 10.1017/CBO9780511755705.
- [11] Wesson J y Campbell DJ. Confinement. En: *Tokamaks*. Fourth. Oxford University Press, 2011, 149.
- [12] Grisham LR. Nuclear Fusion. En: *Future Energy*. Elsevier, 2014, 199–211. doi: 10.1016/B978-0-08-099424-6.00010-7.
- [13] Lindl JD, Amendt P, Berger RL, Glendinning SG, Glenzer SH, Haan SW, Kauffman RL, Landen OL y Suter LJ. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility. En: *Physics of Plasmas* 11.(2) (2004), 339–491. doi: 10.1063/1.1578638.
- [14] Max-Planck-Institut für Plasmaphysik. *Types of Fusion Devices. Tokamak*. <https://www.ipp.mpg.de/14869/tokamak>. Accedido: 2025. 2025.

- [15] Steinhauer LC. FRC 2001: A White Paper on FRC Development in the Next Five Years. En: *Fusion Technology* 30.(1) (1996), 116-127. doi: 10.13182/FST96-A30769.
- [16] Grisham LR. The operational phase of negative ion beam systems on JT-60U and LHD. En: *IEEE Transactions on Plasma Science* 33.(6) (2005), 1814-1831. doi: 10.1109/TPS.2005.860083.
- [17] Max-Planck-Institut für Plasmaphysik. *Fusion Plants. Stellarator: Magnetic Coils*. Nota técnica interna. 2025.
- [18] González Ganzábal A, Ratta GA, Dormido-Canto S, Carvalho P, Silburn S, Coffey I y Balboa I. A methodology for TIE detection and tracking for JET's experimental cameras. En: *Fusion Engineering and Design* 218 (2025), 115164. doi: 10.1016/j.fusengdes.2025.115164.
- [19] Carralero D, Estrada T, Maragkoudakis E, Windisch T, Alonso JA, Beurskens M, Bozhenkov S, Calvo I, Damm H, Ford O, Fuchert G, García-Regalía JM, Pablant N, Sánchez E, Pasch E, Velasco JL y Wendelstein 7-X team. An experimental characterization of core turbulence regimes in Wendelstein 7-X. En: *Nuclear Fusion* 61.(9) (2021), 096015. doi: 10.1088/1741-4326/ac112f.