



Universidad de Valladolid

FACULTAD DE CIENCIAS

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Física

**REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE AVANCES EN
FUSIÓN NUCLEAR CONTROLADA**

Autor: Gabriel Cancho Pérez

Tutor: Gabriel Pérez Callejo

Año 2024

Science makes people reach selflessly for truth and objectivity, it teaches people to accept reality, with wonder and admiration, not to mention the deep awe and joy that the natural order of things brings to the true scientist.

Lise Meitner

Going after the unknown is always fascinating, I think. It becomes part of your life, this desire to know.

Mark Oliphant

Prefacio

El presente archivo representa el Trabajo de Fin de Grado elaborado por Gabriel Cancho Pérez y tutorizado por Gabriel Pérez Callejo para la obtención del título de Graduado en Física por la Universidad de Valladolid.

El documento consiste en una revisión bibliográfica sobre avances en fusión nuclear controlada. La realización de un trabajo bibliográfico en el campo de la física, aun no siendo una práctica habitual, es de una importancia significativa. Este enfoque sirve de síntesis y organización de la información existente sobre un tema, proporcionando una visión completa y detallada del mismo. Además, este tipo de labor promueve el desarrollo de habilidades críticas y analíticas esenciales para un físico, contribuyendo así al crecimiento académico y profesional del autor.

El texto se divide en cinco capítulos. El Capítulo 1 sirve como introducción y busca sentar el contexto para entender el resto del trabajo, resultando fundamental para entender no solo la evolución histórica que ha seguido la fusión nuclear sino también cómo los factores sociales, económicos y políticos han afectado a dicho avance. El Capítulo 2 presenta los fundamentos físicos de la fusión nuclear controlada para luego exponer los dos principales métodos para conseguirlo (la fusión por confinamiento magnético y la fusión por confinamiento inercial), además de otras alternativas. El Capítulo 3 trata sobre otro tipo de dispositivos de fusión, los reactores híbridos de fusión-fisión; sistemas poco extendidos, pero con aplicaciones variadas que están fomentando el interés por los mismos. El Capítulo 4 se basa en todos los enfoques expuestos para presentar algunos de los últimos avances y las actuales líneas de investigación en el sector de la fusión. Finalmente, el Capítulo 5 aprovecha toda la perspectiva dada por la revisión para mostrar las líneas futuras, las previsiones e impacto de la llegada de la fusión nuclear controlada a la sociedad.

Este trabajo pretende servir entonces como gran repositorio bibliográfico sobre fusión nuclear controlada, contando con una bibliografía rica y variada que incluye desde documentos históricos y referencias actuales hasta estudios sociales e informes científicos y técnicos.

Resulta importante destacar la relevancia de un trabajo de esta índole en español, dado que la literatura existente generalmente no incluye revisiones tan extensas, además de encontrarse la mayoría de ella en inglés. De esta forma, el trabajo también pretende poner de manifiesto las contribuciones de España en la carrera por conseguir la fusión nuclear controlada, incluyendo explícitamente una breve sección en el Capítulo 5 mostrando su papel en el contexto internacional de la investigación en fusión.

Espero que el lector encuentre útil e interesante el trabajo, tanto como lo ha sido para mí elaborarlo.

Índice general

1. Introducción.....	1
1.1. Evolución histórica de la fusión nuclear.....	1
2. Fusión nuclear controlada: confinamiento del plasma.....	5
2.1. Fundamentos de la fusión nuclear.....	5
2.2. Criterio de Lawson.....	7
2.3. Fusión por confinamiento magnético.....	9
2.3.1. Sistemas de confinamiento abierto: espejos magnéticos.....	10
2.3.2. Sistemas de confinamiento toroidal cerrado: tokamaks y stellarators.....	11
2.3.3. Aspectos fundamentales de los reactores tokamak.....	13
2.3.4. Logros, situación actual y desafíos de la MCF.....	14
2.4. Fusión por confinamiento inercial.....	16
2.4.1. Confinamiento inercial directo.....	16
2.4.2. Confinamiento inercial indirecto.....	17
2.4.3. Logros, situación actual y desafíos de la ICF.....	19
2.5. Enfoques alternativos.....	20
3. Reactores híbridos de fusión-fisión.....	21
3.1. Concepto de reactor híbrido.....	21
3.1.1. Motivaciones para los reactores híbridos.....	21
3.1.2. Modos de operación de los reactores híbridos.....	23
3.2. Características y diseño de reactores híbridos.....	24
3.2.1. Diseños de <i>blankets</i>	24
3.3. Evolución de los reactores híbridos.....	25
4. Últimos avances en fusión nuclear controlada.....	27
4.1. Contexto actual en MCF.....	27
4.1.1. Control del plasma y mitigación de inestabilidades.....	27
4.1.2. Materiales superconductores para las bobinas magnéticas.....	29
4.1.3. Materiales para el revestimiento interno de la cámara.....	30
4.2. Contexto actual en ICF.....	31
4.2.1. Llenado y soporte de los blancos criogénicos.....	31
4.2.2. Diseños avanzados de <i>bobbraums</i> alternativos.....	32
4.2.3. Predicción de implosiones y análisis retrospectivo.....	34
4.3. Contexto actual en reactores híbridos y otras alternativas.....	35
5. Futuro de la fusión nuclear controlada.....	36
5.1. Camino hacia la fusión comercial: previsiones.....	36
5.2. España en el futuro de la fusión nuclear.....	38
5.3. Impacto de la fusión nuclear controlada en el futuro energético global.....	39
Conclusiones.....	41
Acrónimos.....	42
Referencias.....	43

Resumen

Las naciones y sociedades requieren cada vez más energía para sostener su desarrollo y bienestar. La energía de fusión se presenta como solución definitiva a esta creciente demanda, además de resultar una alternativa respetuosa con el medioambiente frente a las fuentes no renovables. Desde la década de 1950 el interés por lograr la fusión nuclear controlada ha ido en aumento, con numerosos experimentos y diferentes enfoques, destacando los confinamientos magnético e inercial. Si bien se han dado avances significativos en la comprensión y la tecnología de fusión, aún no se ha alcanzado el punto en el que resulte viable y comercialmente práctica como fuente de energía. El objetivo del presente trabajo es entonces el de revisar no solo la física subyacente de la fusión nuclear controlada, sino también el de presentar los triunfos pasados, los avances actuales y las perspectivas futuras en el sector. Paralelamente, se expone también cómo el contexto social, económico y político ha afectado y afecta a la carrera por conseguir la fusión nuclear controlada y el impacto que puede tener su futura comercialización en la sociedad.

Palabras clave

Fusión nuclear controlada, criterio de Lawson, confinamiento magnético, stellarator, tokamak, *blanket*, confinamiento inercial, *bobraum*, *stagnation*, ignición, reactor híbrido, ITER, DEMO.

Abstract

Nations and societies require increasingly more energy to sustain their development and welfare. Fusion energy is presented as the ultimate solution to this growing demand, offering an environmentally respectful alternative to non-renewable resources. Since the 1950s, interest in achieving controlled nuclear fusion has been on the rise, with numerous experiments and various approaches, remarkably magnetic and inertial confinement fusion. While significant advances have been made in understanding fusion physics and technology, the point where it becomes viable and commercially practical as an energy source has not been reached yet. The aim of this study is therefore to review not only the underlying physics of controlled nuclear fusion but also to present past achievements, current advancements and future prospects in the sector. Additionally, it explores how social, economic and political context has influenced and continues to impact the pursuit of controlled nuclear fusion and discusses the potential social implications of its future commercialization.

Key words

Controlled nuclear fusion, Lawson criterion, magnetic confinement, stellarator, tokamak, blanket, inertial confinement, *bobraum*, stagnation, ignition, hybrid reactor, ITER, DEMO.

Capítulo 1

Introducción

Este primer capítulo revisa el progreso realizado en la investigación en fusión nuclear desde sus inicios durante la primera mitad del siglo XX hasta la actualidad. El presente trabajo de revisión se centra en los avances en el ámbito de la fusión nuclear controlada, pero para comprender el contexto actual es esencial conocer su evolución histórica. Resulta entonces de vital importancia este capítulo para poder entender el resto del trabajo, desde la presentación de los diferentes reactores de fusión hasta los últimos avances conseguidos.

1.1 Evolución histórica de la fusión nuclear

Los orígenes de la investigación en fusión nuclear se remontan al primer tercio del siglo XX. En 1920, previamente al descubrimiento del neutrón, Arthur Eddington sugirió por primera vez que la energía de las estrellas provenía de la fusión nuclear de hidrógeno y helio [1]. Los primeros experimentos en fusión nuclear se dieron en los primeros años de la década de 1930 en los Laboratorios Cavendish, donde Ernest Rutherford y Mark Oliphant obtuvieron tritio y helio-3 mediante reacciones nucleares por bombardeo de neutrones a deuterones [2]. En 1938 Hans Bethe expuso cómo en las estrellas se daba la fusión de hidrógeno en helio con la correspondiente liberación de energía [3]. A finales de ese mismo año Otto Hahn y su ayudante Fritz Strassman descubrían el proceso de fisión propuesto por Lise Meitner [4].

En los años posteriores no hubo un desarrollo significativo en la fusión nuclear. Sin embargo, la investigación en fisión se vio fuertemente promovida debido a la preocupación militar por el desarrollo de las primeras bombas atómicas durante la Segunda Guerra Mundial. Cabe destacar entonces como se consiguió la comprensión y aplicación de la fisión antes que la fusión, aun habiéndose descubierto la segunda de ellas antes.

No tardaron en surgir las aplicaciones militares de la fusión nuclear, con Edward Teller en 1942 sugiriendo la creación de la bomba H y estudiando la posibilidad de su elaboración junto a Robert Oppenheimer, Hans Bethe y otros [5]. El 31 de octubre de 1952 se consiguió la detonación de Ivy Mike, la primera bomba de fusión. Dentro del contexto de la Guerra Fría la carrera armamentística nuclear experimentó un rápido crecimiento, alcanzando su punto máximo en 1962 con la crisis de los misiles en Cuba. Posteriormente se moderó con los tratados de control de armas hasta la actualidad.

Paralelamente se comenzó a plantear la fusión nuclear como posible fuente de energía a partir de la década de 1950. El primer concepto de tokamak fue desarrollado por los científicos soviéticos Andrei Sakharov e Ígor Tamm, terminándose de construir el primero de ellos en 1958. Previamente en 1955 John David Lawson enunció los criterios que debía cumplir un reactor termonuclear para producir energía [6].

La década de 1960 supuso el punto de inflexión en el reconocimiento de la fusión como una verdadera posibilidad energética. Con John Nuckolls en 1972 proponiendo por primera vez la fusión láser [7] y junto con otros experimentos y formalizaciones en el campo se allanó el camino para un mayor desarrollo. A partir de este momento el interés de la comunidad científica por lograr la fusión controlada creció rápidamente, reflejándose en un aumento de los estudios y descubrimientos en fusión hasta la actualidad (Figura 1.1 y Figura 1.2).

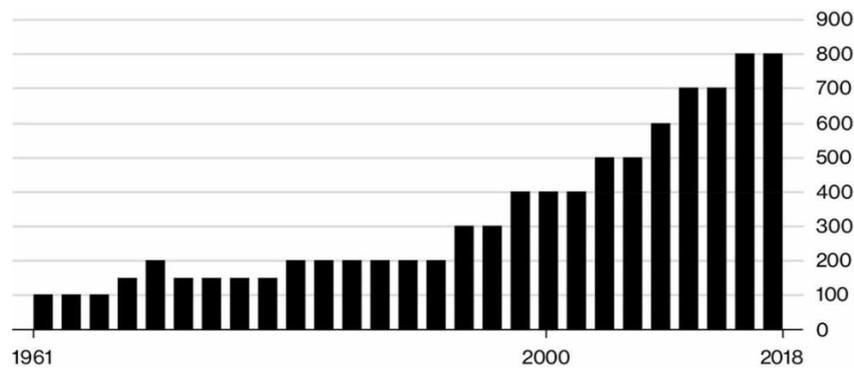


Figura 1.1: Descubrimientos en fusión nuclear, 1961-2018 [8].

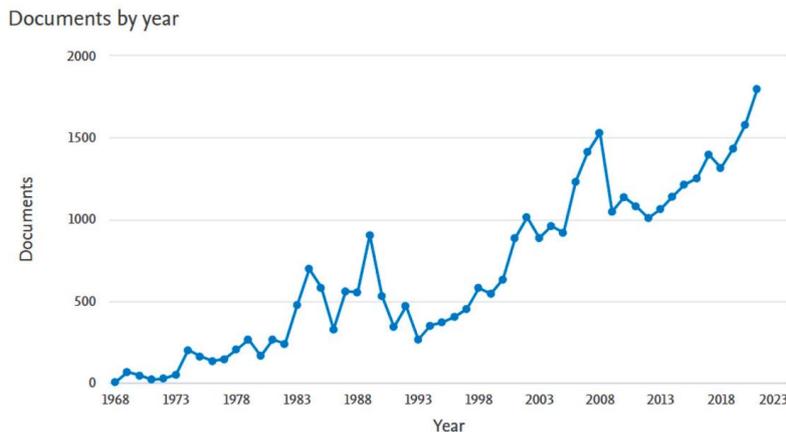


Figura 1.2: Número de trabajos científicos sobre fusión nuclear en la base de datos Scopus, 1968-2023 [8].

Asimismo, el desempeño de los reactores de fusión aumentó rápidamente, observándose una tendencia comparable a la ley de Moore del campo de la electrónica. Mientras que el número de transistores en microprocesadores se duplica cada bienio, el producto triple (medida de la eficiencia de los reactores de fusión) lo hace cada 1.8 años (Figura 1.3).

Por otra parte, el papel actual de las empresas privadas en la financiación de los proyectos de fusión es fundamental (Figura 1.4). Sin embargo, la situación geopolítica afecta al sector, siendo destacable la actual negación de la Unión Europea a “participar en más proyectos de cooperación con entidades rusas” (Mariya Gabriel, comisaria europea de Innovación, Investigación, Cultura, Educación y Juventud, 2022) [13] a raíz de la invasión rusa de Ucrania en 2022.

Fusion Founders Multiplying

Closely-held fusion startups have attracted \$4.9 billion of funding

■ Private Fusion Companies



Figura 1.4: Número de empresas privadas relacionadas con la fusión, 1998-2022 [14].

A pesar de la dificultad de conseguir la fusión controlada; los países, gobiernos y entidades relacionadas están intensificando los esfuerzos por conseguirla, motivados por las principales ventajas que ofrece [15]:

- i. No produce emisiones de CO₂ y gases de efecto invernadero: el principal producto es el helio, un gas inerte y no tóxico.
- ii. No hay riesgo de fusión del núcleo: en caso de accidente las condiciones para que se produzcan las reacciones de fusión se pierden y el plasma se enfría rápidamente.
- iii. Energía abundante: para una misma masa de combustible, la energía de fusión libera cuatro millones más veces energía que los combustibles fósiles, y cuatro veces más que la energía de fisión.
- iv. Abundancia del combustible de fusión.
- v. No proliferación de armas: no se usan materiales fisibles como uranio o plutonio que pudieran usarse para la creación de arsenal nuclear.
- vi. No producción de residuos radiactivos de larga duración.

Además, respaldándose en estas y junto a una comunicación y educación clara del tema buscan aumentar la aceptación social hacia la fusión nuclear: “es hora de una comunicación sobre fusión, porque de lo contrario el proyecto (ITER) permanece oscuro, mal comprendido y complejo” (Christian Ehler, miembro del Parlamento Europeo, 2023) [16].

Capítulo 2

Fusión nuclear controlada: confinamiento del plasma

En el presente capítulo se explican los fundamentos y criterios que deben cumplir los reactores termonucleares para mantener confinado el plasma y obtener energía. Se detallan posteriormente los dos principales métodos para conseguirlo; la fusión por confinamiento magnético y por confinamiento inercial, profundizando en los diferentes enfoques y en los logros conseguidos por cada uno de ellos. Además, se incluye una breve sección final presentando algunos métodos alternativos para lograr la fusión nuclear controlada.

2.1 Fundamentos de la fusión nuclear

La fusión nuclear es la unión de dos núcleos en uno más pesado. Requiere que los núcleos de carga positiva se acerquen lo suficiente para que la fuerza nuclear fuerte atractiva supere a la repulsión electrostática. Este es el principal inconveniente de la fusión nuclear controlada, ya que para que los núcleos adquieran la suficiente energía para superar el potencial electrostático las condiciones deben de ser extremas.

Las principales características del proceso de fusión abordadas brevemente son:

i) Energía de la reacción

La energía liberada o absorbida en la reacción se debe al defecto de masa entre los reactivos y productos, es decir, a la transformación de masa en energía según expone la relación de equivalencia masa-energía de Einstein. Usualmente se expresa esta energía como calor de reacción (Q) en unidades de MeV.

Normalmente el término “fusión nuclear” alude a la reacción exoenergética ($Q > 0$) de fusión de dos núcleos ligeros. La fusión de dos núcleos pesados es endotérmica ($Q < 0$), no resultando de interés entonces para la obtención de energía. Atendiendo a la curva de estabilidad (Figura 2.1) esto se traduce en que los núcleos pesados tienden a fisionarse para ser más estables, mientras que los núcleos ligeros tienden a fusionarse (habiendo en ambos casos una liberación de energía).

ii) Barrera Coulombiana

Los núcleos deben estar suficientemente cerca como para que la atracción nuclear fuerte supere a la repulsión electrostática. En realidad, la energía cinética para conseguirlo puede ser menor que la barrera de potencial, y que la fusión se dé por efecto túnel. En cualquier caso, los núcleos deben estar a una distancia de unas decenas de fm [17] para que la probabilidad de reacción sea apreciable.

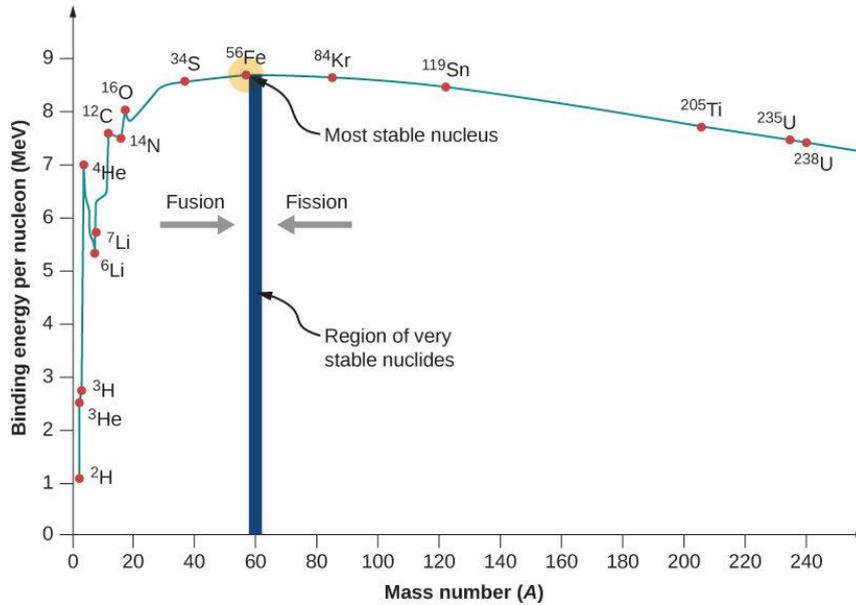
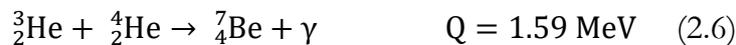


Figura 2.1: Curva de estabilidad: energía de enlace por nucleón frente a número másico A [18].

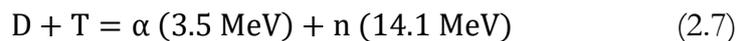
iii) Sección eficaz de fusión y ritmo de reacción

La sección eficaz de fusión $\sigma(v)$ refleja la probabilidad de reacción como función de las velocidades relativas de los dos núcleos reactivos. Si los reactivos siguen una distribución de velocidades resulta útil definir el ritmo de reacción como el valor medio del producto de sección eficaz y velocidad relativa proyectil-blanco: $\langle \sigma(v) \cdot v \rangle$.

Algunos procesos básicos de fusión nuclear son [19]:



De todas las reacciones de fusión posibles, la de mayor sección eficaz (y, por tanto, mayor probabilidad de darse) a energías bajas es la de deuterio-tritio (DT) (Ecuación 2.5). De forma más compacta y presentando las energías de cada producto queda:



Donde el neutrón es emitido con un 80 % de la energía total de la reacción Q.

En la Figura 2.2 se comparan las secciones eficaces de diversas reacciones de fusión. Como se puede observar, para energías de hasta unos 200 keV, la reacción DT es la más favorable. Las condiciones usuales en experimentos de fusión están incluidas en ese rango energético y por ello el combustible más común usado en reactores termonucleares es una mezcla de deuterio y tritio.

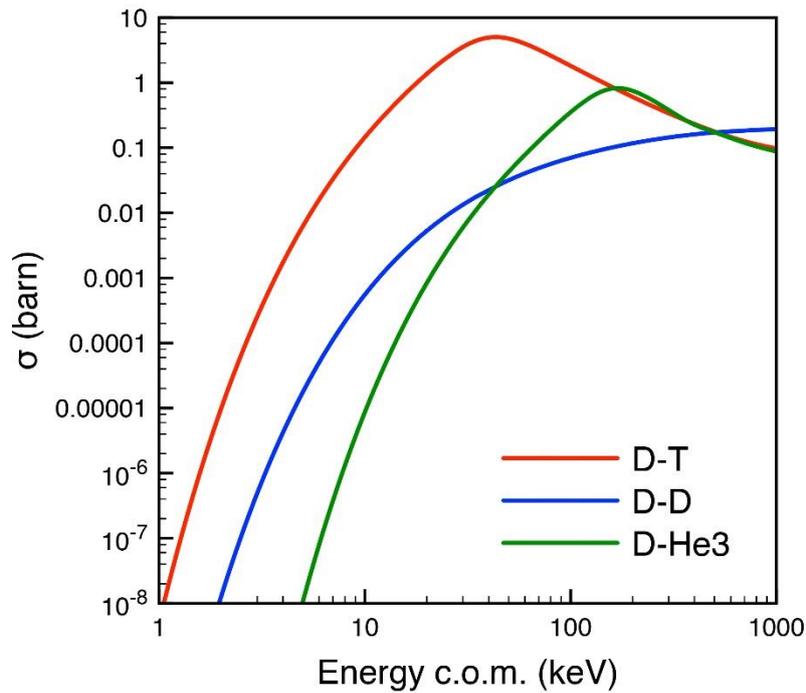


Figura 2.2: Sección eficaz para diferentes reacciones nucleares de fusión como función de la energía del sistema en el sistema de referencia centro de masas [20].

Además, la barrera Coulombiana de la reacción DT es de 0.34 MeV (mucho mayor que los ~10 keV habituales de los reactores de fusión) y por tanto la reacción se da por efecto túnel [21].

2.2 Criterio de Lawson

El llamado criterio de Lawson es la condición mínima para que la energía emitida en la fusión supere las pérdidas del calentamiento del plasma. Si la energía emitida es mayor que las pérdidas, entonces el balance neto será una ganancia de energía.

Fue enunciado por primera vez en 1955 por John David Lawson en un archivo clasificado [6], (desclasificado y publicado en 1957 [22]) como requisito que debía cumplir un reactor termonuclear para ser energéticamente viable.

En primera instancia Lawson lo formuló en función del producto de la densidad del plasma (n) y el tiempo de confinamiento (τ). El concepto evolucionó hasta la actualidad, donde se usa como métrica el llamado producto triple (producto de la densidad del plasma (n), el tiempo de confinamiento (τ) y la temperatura (T)) como aparece más adelante en la Ecuación 2.13.

Como ya se ha mencionado, el combustible usado generalmente es una mezcla de deuterio y tritio. Por el teorema de equipartición de la energía [23], la energía térmica por unidad de volumen necesaria para calentar el plasma hasta una temperatura T es:

$$E_T = \frac{3}{2} k_B T (n_D + n_T + n_e) \quad (2.8)$$

Donde k_B es la constante de Boltzmann y n_D , n_T , n_e son las densidades de iones de deuterio, tritio y la densidad electrónica respectivamente.

Por otra parte, la tasa de reacciones de fusión es [24]:

$$\frac{E_F}{Q\tau} = n_D n_T \langle \sigma v \rangle \quad (2.9)$$

Donde E_F es la energía producida por unidad de volumen en la fusión del plasma, Q es la energía liberada en cada reacción de fusión, τ es el tiempo de confinamiento y $\langle \sigma v \rangle$ es el ritmo de reacción de fusión.

Considerando como combustible de fusión una mezcla 50 % deuterio - 50 % tritio, la densidad de cada tipo de ion en el plasma (n_D y n_T) será la mitad de la densidad de iones total (n): $n_D = n_T = \frac{n}{2}$. Además, a las temperaturas involucradas la totalidad de los átomos están ionizados, y como estos son hidrogenoides (cuentan con un único electrón): $n_e = n$. Las Ecuaciones 2.8 y 2.9 pueden reescribirse entonces como:

$$E_T = 3nk_B T \quad (2.10)$$

$$E_f = \frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v \rangle Q \tau \quad (2.11)$$

Para que haya una ganancia neta de energía debe cumplirse que $E_f > E_T$. Ignorando posibles pérdidas y considerando idealidad, dicha condición queda expresada como:

$$n\tau > \frac{12kT}{\langle \sigma v \rangle Q} \quad (2.12)$$

Multiplicando por la temperatura a ambos lados de la desigualdad se concluye:

$$n\tau T > \frac{12kT^2}{\langle \sigma v \rangle Q} \quad (2.13)$$

Debido a la dependencia del ritmo de reacción con la temperatura (no mostrada explícitamente), el término del lado derecho de la desigualdad es más estable con la temperatura en la Ecuación 2.13 que en la Ecuación 2.12, siendo más fácil de evaluar y razón por la que es más habitual actualmente utilizar el producto triple como métrica.

Las Ecuaciones 2.12 y 2.13 son dos formas de expresar entonces el criterio de Lawson. Su significado físico se puede resumir en que, a mayor densidad del plasma, menos tiempo debe de estar confinado para obtener energía de fusión; y viceversa.

Surgen, por ende, dos estrategias principales para sobrepasarlo. O bien se busca aumentar el tiempo de confinamiento del plasma, no requiriéndose que este alcance una densidad tan elevada; o bien se busca elevar su densidad para que el tiempo de confinamiento no demande ser tan largo. La primera de las opciones es en la que se basa la fusión por confinamiento magnético y la segunda, la fusión por confinamiento inercial. El resto del capítulo se centra en estos enfoques y otras alternativas.

Previamente a ello, conviene advertir cierta cautela en la interpretación del criterio de Lawson. Este es una condición necesaria, pero no suficiente para obtener una ganancia de energía total en un reactor termonuclear. Refleja la condición para que la energía emitida por fusión del plasma sea mayor a la energía que le ha llegado:

$$Q_{\text{plasma}} = \frac{\text{Energía emitida por el plasma}}{\text{Energía suministrada al plasma}} > 1 \quad (2.14)$$

Esto no significa que la energía total que sale del reactor sea mayor a la que entra. Se necesita energía para mantener el confinamiento, el rendimiento de la transformación de la energía de fusión en electricidad no es del 100 %, etc. Es decir, la energía que entra al reactor es mayor que la que llega al plasma, y la energía que sale es menor que la producida en las reacciones. El ratio de las energías de salida y entrada totales del reactor es el denominado factor de ganancia de energía de fusión:

$$Q = \frac{\text{Energía total de salida}}{\text{Energía total de entrada}} \quad (2.15)$$

No debe confundirse con el calor de reacción, el cual tiene unidades de energía.

Sobrepasar el criterio de Lawson ($Q_{\text{plasma}} > 1$) no significa una ganancia de energía neta global real. Es a partir del llamado *breakeven* ($Q = 1$) cuando la energía emitida por fusión iguala a la energía usada para calentar y confinar el plasma. Incluso cuando se supera el *breakeven*, se necesita aportar aún más energía para conseguir que la reacción sea autosostenible; es decir, para que la energía liberada por la reacción caliente el combustible más rápidamente de lo que se enfría, o, en otras palabras, que el propio calentamiento del plasma elimine la necesidad de un calentamiento externo. Esta situación es conocida como *ignición* (idealmente $Q \rightarrow \infty$, aunque por razones prácticas en términos reales se usan otros parámetros) y es necesario alcanzarla para un diseño práctico de un reactor termonuclear [25].

Si bien las diferencias entre las situaciones recién expuestas pueden parecer sutiles, la conclusión es radicalmente distinta en cada caso. Su malinterpretación es usual en la divulgación sobre la fusión controlada, induciendo a que la sociedad sobrevalore los resultados experimentales. El Comité de Evaluación de Opciones Científicas y Tecnológicas del Parlamento Europeo ya avisó en 1988: “El resultado de esto podría ser, en el peor escenario, un desperdicio enorme de recursos en un programa que simplemente no es científicamente factible” [26], pero, aun así, son muchos los medios que siguen magnificando los resultados obtenidos.

2.3 Fusión por confinamiento magnético

Para la consecución de la fusión controlada las temperaturas que debe alcanzar el plasma son extremas, lo que excluye el uso de recipientes materiales para su contención directa. Se recurre entonces al uso de fuertes campos magnéticos para confinar y controlar el plasma sin que este tenga que entrar en contacto con las paredes del recipiente.

Este enfoque para lograr la fusión nuclear controlada es la llamada fusión por confinamiento magnético (MCF por sus siglas en inglés) y es una de las principales líneas de investigación en el sector.

Como resultado de la fuerza de Lorentz, una partícula cargada en el seno de un campo magnético uniforme se mueve helicoidalmente siguiendo las líneas de fuerza. El movimiento puede dividirse en una componente longitudinal y otra transversal. Longitudinalmente la partícula no queda confinada, pero transversalmente sí, donde el radio de la órbita (radio de Larmor) es directamente proporcional a la masa de la partícula e inversamente proporcional a la intensidad de campo magnético [27]. Debido a la diferencia de masas, los electrones giran mucho más rápido y con radios de Larmor mucho menores que los iones.

En los reactores de fusión se busca entonces generar campos magnéticos de intensidades tales que el radio de Larmor de los iones del plasma sea mucho menor que las dimensiones del aparato. Sin embargo, el problema no se reduce solamente a lo anterior, sino que se requiere también que la geometría de los campos magnéticos aplicados al plasma lo mantengan estable durante un tiempo suficiente y sin que haya pérdida de partículas.

2.3.1 Sistemas de confinamiento abierto: espejos magnéticos

Cuando las partículas cargadas llegan a zonas de mayor intensidad de campo magnético, su velocidad normal aumenta y su velocidad longitudinal disminuye hasta hacerse nula y reflejarse. Esta configuración se denomina “espejo magnético” y enfrentando dos de ellos se obtiene lo que se llama “botella magnética” [28]. De esta forma las partículas que se acercan a los extremos experimentan una fuerza creciente que eventualmente hace que inviertan su dirección y regresen al área de confinamiento.

Esta geometría es la más simple para confinamiento magnético de plasmas, siendo uno de los primeros enfoques cuando se inició la investigación en fusión en la década de 1950. Sin embargo, es difícil conseguir un buen confinamiento del plasma mediante estos dispositivos: solamente las partículas con grandes velocidades normales pueden ser reflejadas por los “espejos” de los extremos; las que tienen grandes velocidades longitudinales escapan del sistema. El resultado es una pérdida de partículas y una distribución no maxwelliana de velocidades de la población confinada, lo que es fuente de inestabilidades.

Diversos artefactos de este tipo fueron desarrollados por Rusia (GOL-3, GDT, AMBAL-M), Japón (GAMMA-10), Korea (HANBIT) y los Estados Unidos, que abandonó finalmente la propuesta en 1986 tras cerrar la MFTF-B (*Mirror Fusion Test Facility B*), cuando estaba ya lista para su operación [29]. En los últimos años algunos grupos han retomado el concepto con otros objetivos. Por ejemplo, la construcción por el KAIST (*Korea Advanced Institute of Science and Technology*) en 2023 de KAIMIR (*KAIST Mirror*), que aún lejos de conseguir fusión controlada sirve como entorno para simular la interacción del plasma y la pared que sucede en un tokamak [30].

2.3.2 Sistemas de confinamiento toroidal cerrado: tokamaks y stellarators

La solución para prevenir las pérdidas que ocurren en los sistemas de confinamiento abierto es el de configurar las líneas de campo magnético de forma que se cierren sobre sí mismas completamente dentro de la cámara de contención. Esto puede lograrse mediante la apropiada disposición de corrientes en bobinas formando un anillo, denominándose estos sistemas de confinamiento toroidal cerrado.

La geometría más simple de estos sistemas es el de un toro formado por las bobinas que generan el campo magnético. Sin embargo, esta configuración no es adecuada, pues el hecho de estar las bobinas más juntas en la zona interna del toroide provoca que el campo magnético no sea uniforme y que, por tanto, la trayectoria de las partículas se desvíe verticalmente, impactando contra la pared de la cámara.

Esta deriva puede compensarse si las líneas de campo magnético, en vez de ser circulares como en el anterior caso, están enrolladas alrededor del toroide. Para ello, un campo magnético poloidal puede superponerse al toroidal, de forma que el campo magnético total sea helicoidal y quede completamente confinado dentro del recipiente. Desde los inicios de la investigación en MCF dos alternativas principales se presentan como posibles soluciones geométricas al problema: las configuraciones de tokamak y de stellarator.

En el concepto actual de tokamak (acrónimo ruso para “cámara toroidal con bobinas magnéticas” [31]) las bobinas toroidales se enrollan alrededor del recipiente de sección transversal en forma de D. En el centro de esta disposición se sitúa el solenoide central, por el que fluye una corriente variable la cual induce un campo eléctrico que impulsa el flujo toroidal de iones y electrones en direcciones opuestas. Esto constituye una corriente en el plasma, que genera a su vez el campo poloidal, resultando en unas líneas de campo magnético total enrolladas y confinadas. Se necesita un bobinado adicional (bobinas verticales) para contrarrestar las fuerzas de expansión del plasma y para manipular su forma [32] (ver Figura 2.3).

El funcionamiento de un tokamak es necesariamente pulsátil, pues la corriente que circula por el solenoide central debe invertirse y aumentarse de forma alternada (como en un transformador) para mantener la corriente del plasma. Este problema intrínseco de los tokamaks es fuente potencial de inestabilidades.

La otra alternativa principal en MCF, la configuración de stellarator, soluciona este inconveniente y permite una operación continua del reactor. Para ello, el bobinado toroidal tiene una geometría compleja para conseguir un campo magnético helicoidal dentro de la cámara (Figura 2.4). Es decir, la componente poloidal del campo es generada directamente por las bobinas externas y no hay una necesidad de inducir corrientes en el plasma, lo que evita los riesgos asociados a las interrupciones.

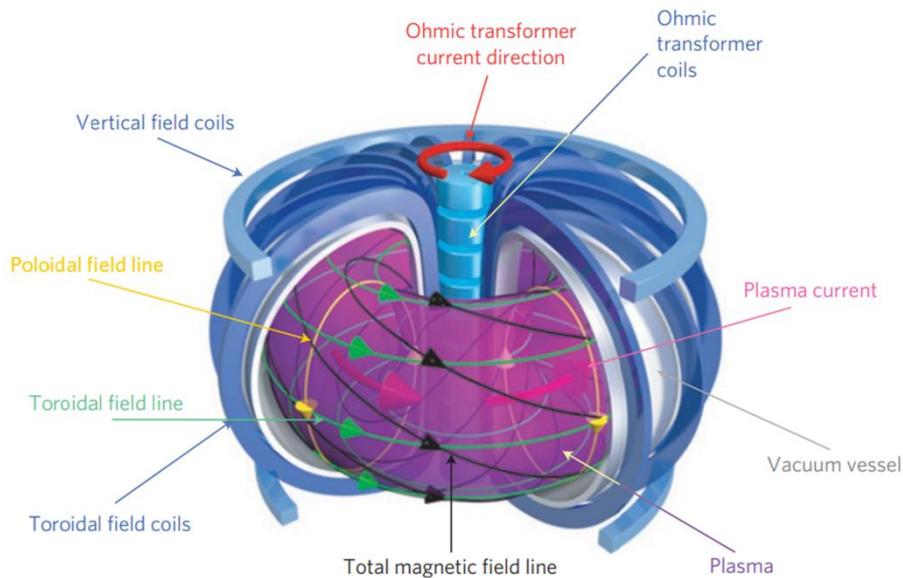


Figura 2.3: Configuración moderna de tokamak: cámara toroidal con sección transversal en forma de D. Las bobinas toroidales generan el campo magnético toroidal (en verde). El solenoide central induce la corriente en el plasma (en rojo), que a su vez genera el campo magnético poloidal (en amarillo). El resultado es el campo magnético total (en negro) confinado en el interior de la cámara. Las bobinas verticales contrarrestan la expansión del plasma [32].

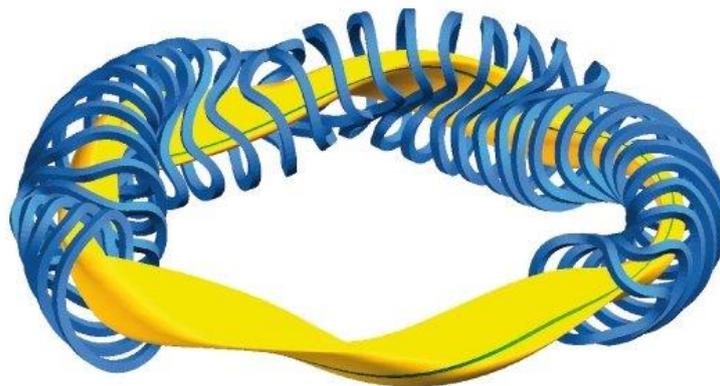


Figura 2.4: Esquema del sistema de bobinado del stellarator Wendelstein 7-X (W7-X) construido en el Instituto Max Planck de Física de Plasmas (IPP) en Greifswald, Alemania. Con un radio de 5.5 metros, este dispositivo es, actualmente, el mayor stellarator operativo del mundo [33].

Si bien la operación de los stellarators es más sencilla, la compleja geometría del bobinado dificulta la construcción, diseño y descripciones teórica y experimental de estos reactores. Esto supuso que su estudio se viese relegado a un segundo plano respecto a los tokamaks, cuyo concepto ha sido el más extensamente investigado desde los años 60 cuando comenzaron a analizarse realmente las posibilidades en MCF. Algunos ejemplos de tokamaks operativos actualmente están en China (EAST), Francia (ToreSupra), Korea del Sur (K-STAR), Estados Unidos (EFTR, ALCMOD, DIII-D), Rusia (T-10) y Reino Unido (JET) [29], siendo este último el mayor dispositivo tokamak funcional del mundo hasta 2023, cuando finalizó su etapa de operación.

El profundo estudio del concepto tokamak culmina con la construcción actual de ITER y la futura DEMO. Sin embargo, esta convergencia aún no ha sucedido para los stellarators, por lo que las comparaciones significativas entre ambos tipos de reactores aun requieren de un proceso de desarrollo para la línea de los últimos. Independientemente de ello, actualmente existen stellarators operativos en Estados Unidos (CAT, HSX), Japón (LHD, CHS), Alemania (W7-X, WEGA), Australia (H-1) y España (TJ1U, TJII, UST1) [29]. Sus resultados muestran como la complicada y delicada topología magnética necesaria puede, en efecto, conseguirse con el concepto de stellarator [34].

2.3.3 Aspectos fundamentales de los reactores tokamak

Si bien el concepto de stellarator no se ha abandonado, la investigación en MCF está fuertemente centrada en los reactores tokamak. Con esto presente, se exponen en esta subsección los principales aspectos de estos reactores y se dejan aparte el resto de los reactores de menor interés.

i) Calentamiento del plasma

El calentamiento óhmico que sufre el plasma debido a la corriente inducida en el mismo no es suficiente para alcanzar la temperatura necesaria para que se produzcan las reacciones de fusión. Se requieren entonces métodos adicionales de calentamiento para conseguirlo, existiendo principalmente de dos tipos: la inyección neutra y la inyección de energía electromagnética [35].

La inyección neutra consiste en la inyección de partículas neutras de alta velocidad en el plasma que, al chocar con los iones y electrones de este, elevan su temperatura. Las partículas inyectadas son átomos neutros de deuterio, no interactuantes por tanto con los campos magnéticos. Al chocar con las partículas del plasma se ionizan y transfieren su energía, pasando a formar parte de él. El segundo método de inyección consiste en irradiar el plasma con radiación electromagnética de alta frecuencia. Esta radiación provoca que las partículas cargadas del plasma oscilen, transmitiendo la energía al resto del plasma. Para una absorción óptima de dicha radiación, se escoge su frecuencia de forma que esté en resonancia con el movimiento de las partículas del plasma. De esta forma se busca incluir inyectores de radiación de las frecuencias ciclotrón de los electrones y/o de los iones del plasma, correspondientes a frecuencias de 170 GHz y 40-55 MHz respectivamente para el dispositivo tokamak de ITER.

ii) Revestimiento de la cámara: *breeding blanket*, *divertor* y *first wall*

A medida que el deuterio y tritio se consumen en las reacciones de fusión, se forman partículas alfa y neutrones de alta energía (Ecuación 2.7). Aparecen entonces tres problemas a resolver: agotamiento progresivo del combustible, extracción de energía de los neutrones y eliminación de impurezas y partículas alfa del plasma.

Para solucionar los dos primeros surge el importante concepto de *breeding-blanket* (o simplemente *blanket*), consistente en el recubrimiento interno de la cámara con materiales para la síntesis de tritio, blindaje del exterior del reactor de su interior y absorción de los neutrones rápidos para transformar su energía en electricidad [36].

El deuterio y tritio deben ser inyectados de forma continuada para mantener las reacciones de fusión. El primero de ellos es de fácil obtención y puede inyectarse directamente al reactor con los inyectores neutros ya mencionados. El tritio, sin embargo, es un radioisótopo beta de 12.3 años de vida media y de difícil obtención. Se busca entonces sintetizar el tritio de forma directa en el interior del reactor con *blankets* que contengan litio (elemento de fácil extracción) mediante las siguientes reacciones nucleares [37], donde el neutrón reactivo proviene de las reacciones DT:



A su vez se busca también que la *blanket* sea capaz de absorber los neutrones energéticos de la reacción DT protegiendo el exterior del reactor y usando el calor de la reacción para la producción de electricidad [36].

Diversos tipos de *breeding-blankets* se plantean como opciones adecuadas, desde *blankets* líquidas de aleaciones litio-plomo hasta *blankets* sólidas cerámicas. Además, se estudia la inclusión de materiales como berilio para la multiplicación de neutrones en una capa que recubra el interior de la *blanket (first wall)* [38]. Más adelante en el trabajo se discutirán los avances en investigación de estos materiales para las *breeding-blankets*.

Por otra parte, después de que las partículas alfa de la reacción DT termalicen (*helium ash* o ceniza de helio) deben ser eliminadas, ya que la dilución del plasma supone una disminución de la reactividad. Para ello, en la parte inferior del revestimiento de la cámara se incluye el llamado *divertor* o desviador, que sirve para la acumulación y posterior extracción de la ceniza de helio y otras impurezas tras ser dirigidas a dicha región mediante la configuración de los campos magnéticos [39].

2.3.4 Logros, situación actual y desafíos de la MCF

Diversos tipos de dispositivos se diseñaron y probaron en los primeros años de investigación en fusión magnética. El punto de inflexión sucedió en 1968, cuando el tokamak T-3 del Instituto Kurchatov (Moscú, USSR en el momento) consiguió la temperatura y tiempo de confinamiento más elevados que cualquier otro dispositivo hasta el momento [40]. Esto supuso la redirección del programa mundial de MCF hacia los tokamaks y motivó el interés por la construcción de grandes reactores, llevando a la propuesta de JET en 1975, entre otros. En el último cuarto del siglo XX los experimentos en tokamaks fueron muy numerosos y con resultados prometedores. En 1991 se consiguió producir energía del orden de MW durante 2 segundos usándose tritio por primera vez como combustible [41]. En 1994 el tokamak estadounidense *Tokamak Fusion Test Reactor (TFTR)* consiguió generar más de 10 MW de potencia, correspondientes a un valor de ganancia Q de 0.27 [42]. El mayor logro llegó en 1997, cuando JET generó 16 MW de potencia, correspondientes a Q de 0.65 [10].

En la Figura 2.5 aparecen comparadas las potencias de salida de estos experimentos de fusión magnética.

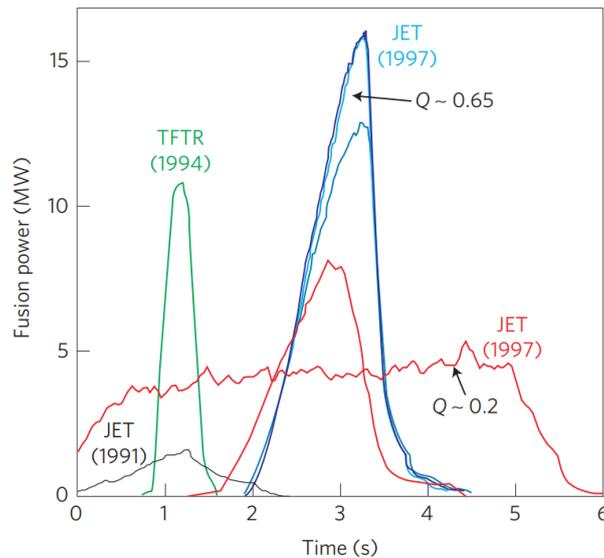


Figura 2.5: Potencia de salida de experimentos históricos de fusión por confinamiento magnético de deuterio-tritio en los reactores JET y TFTR [43].

Aunque estos avances fueron muy significativos, quedaba claro que los reactores seguían lejos de alcanzar el *breakeven*, y, por supuesto, aún más lejos de conseguir la ignición. En busca de lograrlo comenzó en 2007 el proyecto ITER, el cual sigue actualmente en construcción, y cuyo objetivo no es el de producir energía neta sino el de sentar las bases para los futuros reactores y demostrar la viabilidad de obtener energía por fusión magnética. ITER pretende estudiar tres aspectos principales de los futuros reactores tokamak: control de inestabilidades del plasma, análisis de distintas *breeding-blankets* y transformación de la energía de los neutrones emitidos en las reacciones de fusión en energía aprovechable.

DEMO se concibe como el siguiente paso a ITER para mostrar la viabilidad comercial y práctica de los reactores de fusión magnética. En él se pondrán a prueba los resultados previos de ITER para el diseño y construcción posterior de los primeros reactores de fusión comerciales.

Paralelamente continúan los estudios en otros dispositivos menores de MCF (stellarators y espejos magnéticos), pero generalmente sin el objetivo de producir energía sino con la finalidad de estudiar aspectos relevantes y útiles para los tokamaks, como cualidades de los plasmas y su interacción con la materia.

Los principales desafíos actuales para conseguir la fusión magnética son relativos al control de inestabilidades en el plasma, los imanes superconductores, el revestimiento de la cámara y los materiales estructurales. Las dificultades técnicas son múltiples y engloban áreas muy diferentes de conocimiento, pero no debe olvidarse que a ellas se unen factores sociopolíticos. En última instancia, y como se viene reflejando desde el Capítulo 1, el éxito de ITER y DEMO dependen tanto de la ciencia como de la financiación y cooperación internacional.

Estos retos, las líneas de investigación y los últimos avances realizados serán abordados en profundidad más adelante en el trabajo.

2.4 Fusión por confinamiento inercial

Frente a la fusión por confinamiento magnético se perfila otro método basado no en un confinamiento largo del plasma sino en una compresión muy rápida del combustible. De esta forma, atendiendo al criterio de Lawson (Ecuación 2.13), el plasma no requiere ser contenido durante un tiempo tan elevado como en la fusión magnética, pero las densidades y presiones alcanzadas deben de ser extremas. Esta técnica se denomina fusión por confinamiento inercial (ICF por sus siglas en inglés) y es la otra línea de investigación primaria en fusión.

El concepto básico es el de comprimir pequeños *pellets* que contengan deuterio y tritio hasta alcanzar densidades extremas y producir así las reacciones de fusión. La propia inercia del material comprimido provoca que durante el tiempo suficiente se den las reacciones de fusión antes de que las partículas puedan dispersarse, de ahí el adjetivo “inercial” [44] (Figura 2.6). Esta compresión puede darse de forma directa sobre el combustible o de forma indirecta mediante elementos adicionales, siendo estas las dos formas convencionales y principales de la ICF.

Los blancos utilizados consisten en *pellets* esféricos de unos pocos milímetros (Figura 2.7) con múltiples capas concéntricas. En la zona más interna se encuentra una esfera con un gas DT de baja densidad, y, rodeándola, hay una fina capa de DT líquido o sólido que constituye la masa principal de combustible (un 95 % de la masa DT del blanco). La presencia de esta última capa fría es la razón por la que se denominan usualmente a estos blancos “blancos criogénicos” [45]. Una última capa llamada “ablador” recubre al combustible y puede estar compuesta de diferentes materiales como plástico, carbono de alta densidad, berilio o carburo de boro. Las tres últimas opciones presentan mejores propiedades en términos de obtención de mayores presiones, pero sus estructuras cristalinas suponen dificultades para fabricarlos y promueven la aparición de inestabilidades hidrodinámicas durante la compresión [46].

2.4.1 Confinamiento inercial directo

En el confinamiento inercial directo se enfocan múltiples láseres de alta energía de forma esféricamente simétrica directamente sobre el blanco, que se encuentra en el vacío (Figura 2.8). La energía láser depositada sobre el ablador crea un plasma que rodea esféricamente al combustible y se expande hacia el exterior, lo que provoca una fuerza de reacción hacia el interior de la cápsula; una implosión. En cierto momento la implosión alcanza la máxima compresión y cesa (*stagnation* o estancamiento). En el centro del blanco la compresión es máxima y la temperatura es extrema, de forma que se comienzan a producir las reacciones de fusión. Esta región de severas condiciones es el denominado *hot spot* (punto caliente) y a partir de él se propaga una onda de quemado por el combustible, produciéndose más reacciones de fusión (Figura 2.6).

El proceso debe ser entonces lo más uniforme posible, es decir, se requiere un blanco simétrico y una distribución isotropa de la energía láser depositada. En caso contrario la implosión será asimétrica y no se alcanzará la compresión necesaria debido a las

llamadas inestabilidades de Rayleigh-Taylor (inestabilidades hidrodinámicas debidas a la diferencia de densidades en el plasma) [47].

En la práctica no es posible evitar estas inestabilidades por dos razones: la imposibilidad de crear un blanco perfectamente esférico y la imposibilidad de realizar la compresión con infinitos haces láser perfectamente enfocados. Debido a ello surgió el enfoque indirecto de la ICF, que evita parcialmente el segundo de los problemas al no incidir los láseres de forma directa sobre el blanco.

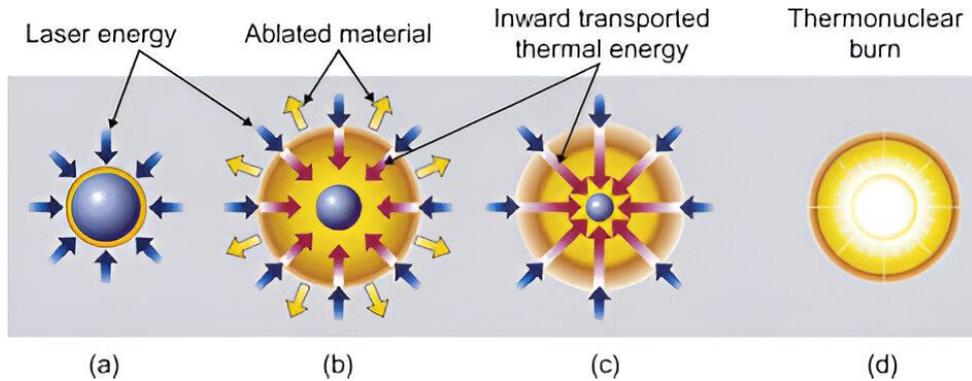


Figura 2.6: Ilustración esquemática del proceso de ICF. La energía láser es depositada sobre el ablandador, iniciándose la compresión (a). Según se expande el plasma del ablandador las fuerzas de reacción comprimen el combustible (b). La compresión cesa (*stagnation*) y comienzan a producirse reacciones de fusión en la región central o *hot spot* (c). La onda de quemado se propaga y se producen más reacciones de fusión (d) [48].

2.4.2 Confinamiento inercial indirecto

En la ICF indirecta se sitúa el blanco criogénico en el interior de una cavidad llamada *hohlraum* (“espacio vacío” en alemán) compuesta de oro (Figura 2.7). Los láseres no inciden de forma directa sobre el *pellet*, sino que lo hacen en las paredes interiores del *hohlraum* (Figura 2.8). Esto genera un plasma de oro que rodea a la cápsula DT y emite radiación consistente mayoritariamente por rayos X [49]. Ya como en el caso directo, esta radiación vaporiza el ablandador, iniciándose el proceso de compresión, estancamiento y las reacciones de fusión (Figura 2.6).

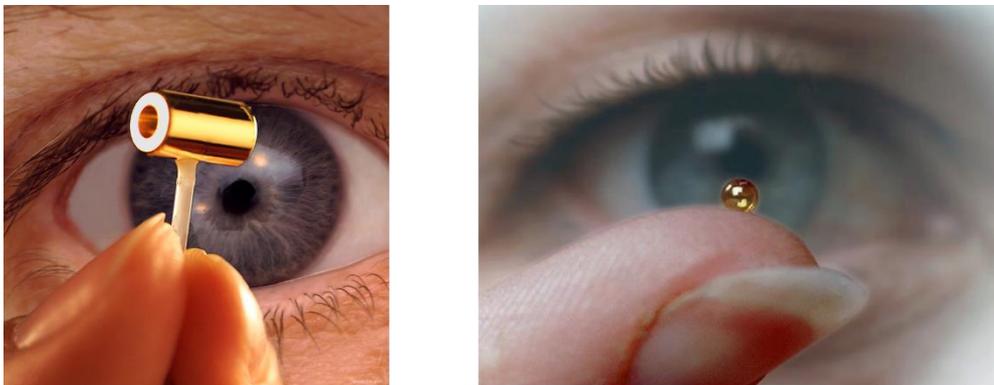


Figura 2.7: *Hohlraum* de oro (izqda.) y blanco criogénico (dcha.) típicos usados en ICF. El *hohlraum* tiene una longitud típica de alrededor de un centímetro y 5.75 mm de diámetro [50, 51].

El material del *hohlraum* debe tener un elevado número atómico y ser altamente denso para tener una alta opacidad a la radiación de rayos X y minimizar la difusión de energía radiante hacia las paredes de la cavidad. El oro no solo cumple ambos requisitos, sino que además es abundante, lo que facilita la fabricación de estos objetos. Otro material adecuado es el uranio empobrecido. Si bien su uso no ha sido tan extendido como el del oro, actualmente se investigan cada vez más sus prestaciones [52].

Además, las dimensiones y geometría de los *hohlraums* junto con el apuntamiento de los láseres se escogen para maximizar la simetría de la implosión, siendo de especial importancia el ratio entre el diámetro interno de la cavidad y el radio externo de la cápsula. Un *hohlraum* habitual consta de dos orificios de entrada para los haces láser situados en los extremos longitudinales de la cavidad y el blanco se sostiene en el centro de esta mediante una fina membrana (de un grosor típico de 15-110 nm) [53]. Por otra parte, los *hohlraums* se llenan usualmente con un gas (típicamente helio) para ralentizar la expansión del plasma de oro. De no hacerlo dicho plasma se expandiría rápidamente y absorbería parte de la energía de los láseres, lo que provocaría diversos problemas como modificar la distribución de rayos X y reducir la eficiencia de conversión de energía láser en estos. El gas es contenido en el interior de la cavidad por ventanas de plástico situadas en los orificios de entrada láser [54].

Independientemente de ello diversos procesos de interacción láser-plasma suceden en el *hohlraum*, modificando la simetría de la implosión. Estas interacciones y entornos son de una complejidad muy elevada, pero mediante técnicas como la espectroscopía de rayos X se puede obtener información acerca del proceso de implosión [55].

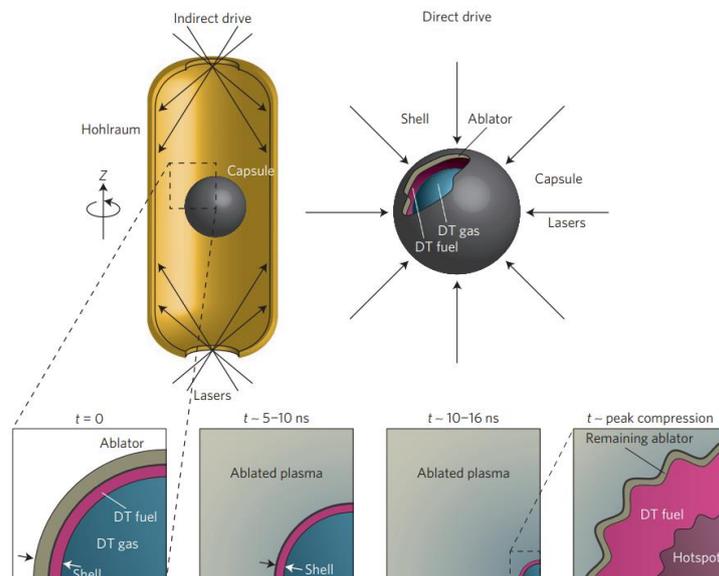


Figura 2.8: Esquema de la ICF indirecta (izquierda) y directa (derecha). En ambos casos el proceso de compresión del blanco criogénico es el mostrado en la parte inferior [46].

Aunque la energía que llega al blanco es menor que en el enfoque directo de ICF, la radiación generada con el *hohlraum* produce una compresión más esféricamente simétrica [49]. Además, dado que las inestabilidades de Rayleigh-Taylor disminuyen con la frecuencia de la radiación [56], la compresión indirecta por rayos X resulta en una calidad de implosión mayor que el enfoque directo con láseres de alta energía.

2.4.3 Logros, situación actual y desafíos de la ICF

Tras la primera demostración experimental del láser en 1960, John Nuckolls, Edward Teller y otros, comenzaron en el *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL) estudios para ver si pequeños *pellets* de combustible podían ser implosionados hasta condiciones termonucleares con láseres intensos [57]. No fue hasta 1972 cuando la ICF apareció propuesta por primera vez por John Nuckolls [7], aunque ya en ese momento diversos programas de implosión láser se llevaban a cabo en Estados Unidos. En 1974, la empresa privada KMS Fusion Inc anunció la producción de neutrones termonucleares mediante la irradiación láser de blancos DT. Este anuncio fue ampliamente difundido debido a la controversia de involucrar empresas privadas en este tipo de proyectos, pero a su vez propició significativamente un aumento de la investigación en ICF [57].

Comenzó así la creación de instalaciones láser de altas energías: el LLNL disponía del láser Janus ya en 1974, del láser Shiva en 1978 y del láser Nova en 1984, entre otros. Sin embargo, los resultados evidenciaban la imposibilidad de conseguir la fusión en esas instalaciones [58], motivando el lanzamiento del proyecto NIF, cuya construcción comenzó en 1997 y terminó en 2009. Hoy en día el NIF es la mayor instalación láser de ICF del mundo, contando con 192 haces láser de neodimio y habiendo conseguido grandes avances en los últimos años (Figura 2.9). Mediante el enfoque indirecto ha logrado ganancias Q_{plasma} de 0.72 en 2021, de 1.5 en diciembre de 2022, de 1.9 en julio de 2023, de 1.26 y 1.54 en octubre de 2023 y más recientemente, de 2.36 en febrero de 2024; sobrepasándose el criterio de Lawson en las cinco últimas ocasiones mencionadas [11, 59].

Paralelamente han surgido otras instalaciones investigadoras en ICF como Laser MegaJoule (LMJ) en Francia o Shenguang III (SGIII) en China, aunque sus avances no han sido tan relevantes aún como los conseguidos en el NIF.

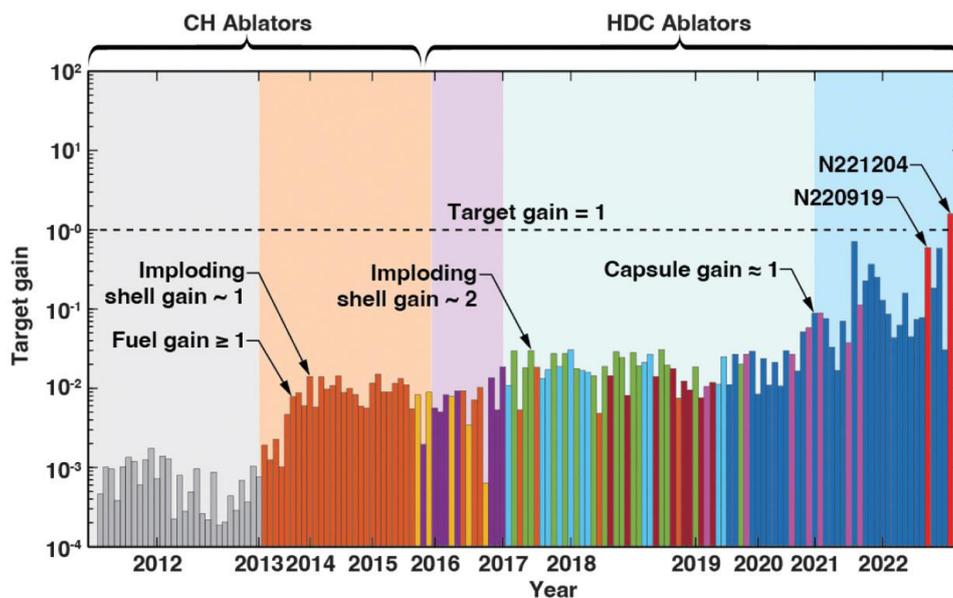


Figura 2. 9: Ganancia del blanco en experimentos de ICF a lo largo del tiempo. Cada color representa un diseño de implosión diferente y la línea horizontal punteada indica el umbral de ganancia unidad. Las etiquetas horizontales representan el principio de cada año [11].

El principal desafío actual en fusión por confinamiento inercial es el de mejorar la calidad de la implosión mediante la reducción de asimetrías provocadas por la iluminación láser, la no esfericidad del blanco y la presencia de estructuras como el plástico de los orificios de la cavidad o la membrana que sostiene la cápsula [53]. Ya se ha demostrado como pequeñas mejoras en alguno de los elementos mencionados provocan un desempeño superior.

Por otra parte, la investigación en ICF enfrenta también problemas de financiación debido en parte a la dualidad de sus aplicaciones para simulación de armas nucleares y producción de energía (la mayoría de los proyectos e instalaciones láser relacionados están respaldados por los programas de defensa nacional en Francia, Estados Unidos, Rusia, China y Reino Unido). La investigación académica en ICF es muy limitada y no está suficientemente coordinada, habiendo solo dos láseres multihaz de energía intermedia (OMEGA en Estados Unidos y Gekko-XII en Japón, de 30 y 3.5 kJ al respecto) lo que dificulta el avance de esta técnica [60].

Los retos, líneas de investigación y avances actuales en ICF aparecen desarrollados más adelante en el trabajo.

2.5 Enfoques alternativos

Además de los ya vistos confinamientos magnético e inercial convencionales existen otros métodos alternativos para conseguir la fusión nuclear controlada, siendo algunos de ellos:

- *Fast ignition* y *shock ignition*: se tratan de enfoques alternativos dentro de la ICF en el que se separan las etapas de compresión y de formación del *hot spot*. El combustible se implosiona a una velocidad más baja que en la ICF convencional y, cerca del estancamiento, se aplica un pulso de electrones o iones (*fast ignition*) [61] o un intenso láser que genere una onda de choque convergente (*shock ignition*) [62] para formar el *hot spot*.
- Fusión magneto-inercial: combina la compresión de la ICF con un menor transporte térmico y un calentamiento por partículas alfa mejorado mediante el uso de campos magnéticos, lo que reduce los requisitos de la implosión [63].
- Confinamiento por pinzamiento (*Z-pinch*): se hace circular por el plasma corriente que aumenta rápidamente, de forma que se genera un campo magnético que lo comprima hasta condiciones termonucleares [64].

Si bien estos métodos alternativos por lograr la fusión nuclear controlada no son tan prominentes como la MCF o la ICF, su exploración las complementa y enriquece la interdisciplinariedad de los grupos de investigación en fusión.

Capítulo 3

Reactores híbridos de fusión-fisión

A lo largo del primer capítulo se ha expuesto en diversas ocasiones cómo en contra de los avances en los reactores de fisión persisten las preocupaciones públicas acerca de su seguridad y los residuos que producen. Paralelamente, se ha señalado tanto en ese capítulo como en el siguiente que, pese al gran progreso logrado en la investigación de la fusión nuclear, se prevé que esta tecnología no estará lista para la producción comercial de energía al menos durante las tres próximas décadas. Ante este panorama, ha resurgido el interés por una tercera opción nuclear que combine aspectos de ambas tecnologías en forma de reactor híbrido, punto central de este capítulo.

3.1 Concepto de reactor híbrido

Los reactores híbridos de fusión-fisión (o simplemente reactores híbridos) se refieren a reactores nucleares que aprovechan los neutrones generados en la fusión nuclear para inducir fisiones en un medio multiplicativo subcrítico anexo. Usualmente los componentes de fusión se denominan *driver* (activador) y los de fisión *blanket* [65] (pues consisten en un revestimiento interno similar al de las ya vistas *breeding blankets*).

Los primeros estudios de estos sistemas comenzaron en la década de 1950 en Estados Unidos, siendo su propósito fundamental el de la generación de plutonio con fines militares y razón por la que permanecieron secretos hasta 1958 [66]. A partir de ese momento se exploraron numerosos proyectos de reactores híbridos hasta que, en los años 80, debido a su incapacidad de competir con la eficiencia y viabilidad de los reactores de fisión convencionales, quedaron en un estado latente. En los últimos años ha resurgido el interés por estos sistemas, concebidos ahora como una etapa técnica, temporal e intermedia, que sirva como soporte durante la transición hacia la consecución de la fusión nuclear como fuente de energía a nivel comercial.

3.1.1 Motivaciones para los reactores híbridos

Las motivaciones para el desarrollo de los reactores híbridos son diversas y variadas, abarcando desde beneficios energéticos hasta la gestión de residuos radiactivos:

i) Condición energética

En un reactor híbrido la capa envolvente es un medio multiplicativo: si un neutrón generado en la fusión genera una fisión, sus 14.1 MeV (Ecuación 2.7) se transforman en más energía (~ 200 MeV para la fisión del ^{238}U por ejemplo). La multiplicación energética que sucede en la capa de fisión permite entonces sobrepasar más fácilmente

el criterio de Lawson, reduciendo extraordinariamente las condiciones actuales de balance de energía de un sistema de fusión puro [67].

Un reactor de fusión necesita un factor $Q_{\text{plasma}} \gg 10$ para resultar económico, pero un reactor híbrido puede ser factible con $Q_{\text{plasma}} \sim 5 - 10$ gracias al aporte de energía de fisión adicional. Esto permite una operación del reactor con una menor eficiencia de conversión energética, menores tiempos de confinamiento, etc. [68].

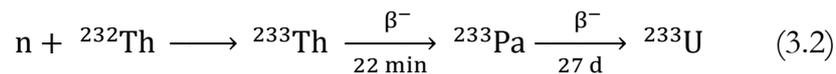
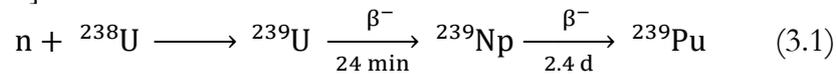
ii) Investigación en fusión nuclear

Los reducidos requisitos físicos que ofrece la opción híbrida han llevado a miembros de la comunidad de fusión a plantearla como una verdadera aproximación intermedia hacia reactores de fusión puros. El desarrollo de reactores híbridos sirve entonces como instalación de prueba de materiales, de confinamiento del plasma, de análisis de interacción plasma-pared, de inestabilidades magnetohidrodinámicas del plasma, etc. sin las condiciones energéticas tan restrictivas que tienen los reactores de fusión [69].

iii) Producción de combustible fisible

Se denomina material fisible o fisionable a aquel capaz de experimentar una reacción de fisión con neutrones libres de baja energía. Por otra parte, se denomina material nuclear fértil a aquel capaz de transformarse en material fisible mediante captura neutrónica. Los isótopos ^{235}U y ^{239}Pu resultan paradigmáticos como elementos fisibles, siendo usados junto al ^{233}U como combustible en los reactores de fisión actuales. Como isótopos fértiles destacan por su abundancia natural ^{238}U y ^{232}Th [70].

Los reactores híbridos buscan entonces incluir en sus *blankets* dichos elementos fértiles para su transmutación en material fisible mediante las siguientes reacciones nucleares [70]:



Para ello los neutrones de fusión de energía 14.1 MeV (Ecuación 2.7) han de frenarse, pues hay una mayor probabilidad de que ^{238}U y ^{232}Th sufran fisión a altas energías [67]. Resulta entonces deseable incluir elementos moderadores y multiplicadores para elevar la capacidad reproductora de la capa fértil.

Los reactores de fisión convencionales más extendidos son los reactores de agua ligera (LWR por sus siglas en inglés), que utilizan agua como refrigerante y moderador, y usan como combustible los productos fisibles de las anteriores reacciones [69]. Los reactores híbridos sirven entonces para producir dicho combustible a partir de los mucho más abundantes isótopos ^{238}U y ^{232}Th .

iv) Transmutación de productos de fisión de larga vida media y actínidos

Los residuos de larga vida media y alta radiotoxicidad generados en las plantas nucleares convencionales constituyen un desafío, tanto en términos de gestión como de aceptación pública.

Los reactores híbridos se presentan entonces como verdadera solución al problema, actuando como sistemas de transmutación de residuos radiactivos provenientes del ciclo nuclear en su conjunto en residuos no fisibles de corta vida media.

Para lograr la transmutación de los actínidos y transuránicos se requiere una fuente de neutrones de alta energía para inducir fisiones en ellos. Los neutrones generados en la fusión resultan adecuados para ello, teniendo presente además que paralelamente se recupera su inmenso valor energético a través de las fisiones [71, 72].

Si bien es cierto que no se puede conseguir una transmutación completa, esta capacidad de reducir la radiotoxicidad representa el principal valor de los reactores híbridos. La existencia de cementerios nucleares para el repositorio de los productos finales sigue siendo necesaria, pero siendo estos desechos de una naturaleza menos peligrosa y más fáciles de almacenar y manejar [69].

v) **Supresión de peligros de criticidad del reactor**

La envoltura fisionable funciona en régimen de multiplicación subcrítica, ya que al ser los neutrones externamente suministrados por la fusión no hay necesidad de concentrar el combustible fisible para mantener una masa crítica. De esta forma, una excursión de potencia del reactor es físicamente imposible [73].

vi) **No enriquecimiento**

El único isótopo fisible encontrado en la naturaleza es el ^{235}U , que representa únicamente un 0.72 % de todo el uranio natural. Los reactores de fisión actuales requieren un combustible de uranio que contenga ^{235}U en una fracción del 4 % aproximadamente, de forma que el uranio natural debe ser enriquecido.

En los reactores híbridos, al ser la envoltura fisionable subcrítica y utilizarse uranio natural o torio (Ecuaciones 3.1 y 3.2), se evitan los problemas de enriquecimiento asociados. Si bien esto reduce parcialmente la vinculación de estos reactores con la proliferación de arsenal nuclear, su potencial para generar isótopos fisibles (en especial ^{239}Pu), requiere de una rigurosa supervisión. Para aumentar la seguridad puede transmutarse parte del ^{239}Pu en ^{240}Pu por absorción neutrónica (en una proporción mayor al 7 %), resultando en material inadecuado para la fabricación de bombas [70].

3.1.2 Modos de operación de los reactores híbridos

Siguiendo la propuesta de L. Lidsky [74], los reactores de fusión-fisión pueden clasificarse según su funcionalidad predominante en reactores simbióticos, híbridos y *augianos*. Los reactores simbióticos producen principalmente combustible fisible y los híbridos energía. Por otro lado, los sistemas *augianos* (en referencia al mitológico Rey Augías cuyos establos debían ser limpiados como tarea hercúlea [75]) esencialmente transmutan desechos radiactivos de reactores de fisión en productos menos peligrosos.

La principal diferencia de diseño entre los diferentes modos de operación se encuentra entonces en la *blanket*, que incluirá una fracción mayor de ciertos materiales según el propósito en cada caso. Además, los reactores de fusión-fisión operan en realidad en un espectro intermedio entre estos modos. Por ejemplo, en un sistema simbiótico se busca la presencia de una *blanket* muy fértil, pero significativas cantidades de energía se obtienen igualmente de la posible fisión de los materiales de dicho revestimiento.

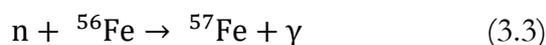
3.2 Características y diseño de reactores híbridos

Las características de diseño de los reactores híbridos son virtualmente idénticas a las de los reactores de fusión presentados en el Capítulo 2. El plasma de fusión se halla confinado en el interior de una cámara de vacío de contención, cuyo revestimiento incluye componentes protectores que aíslan el interior del reactor de los componentes estructurales externos (Figura 3.1 y Figura 3.2).

La *blanket* de los reactores de fusión debía además criar tritio y transformar la energía de los neutrones en calor. En los reactores híbridos la *blanket* es diferente, teniendo que producir adicionalmente energía de fisión, criar material fisible y/o transmutar elementos radiotóxicos. Dado que esta es la única característica significativamente diferente respecto de los reactores de fusión puros, es el foco predominante de discusión y análisis. No obstante, se exploran también otros aspectos como elementos estructurales o la refrigeración por gas, pero que se dejan aparte en esta revisión.

3.2.1 Diseños de *blankets*

El diseño estructural de las *blankets* en los reactores híbridos debe ser muy eficiente, pues su desempeño es sensible a la cantidad de material estructural localizado en la zona fértil. Absorciones de neutrones parásitas degradan el rendimiento al reducir la tasa de multiplicación de neutrones y de producción de combustible [76], destacando la captura parásita de núcleos de hierro, común en los componentes estructurales [77]:



Según el propósito principal del reactor la *blanket* estará compuesta de unos materiales u otros. Habiéndose discutido una amplia gama de posibilidades, se puede resumir dicha variedad de la siguiente forma: en sistemas híbridos para la producción de energía se busca maximizar la misma con *blankets* ricas en materiales fisibles (*fast fission blankets*). En sistemas simbióticos las *blankets* procuran minimizar la producción de energía (*fission suppressed blankets*) en favor de potenciar la multiplicación de neutrones para la cría de combustible por captura neutrónica (Ecuaciones 3.1 y 3.2). La intención de suprimir fisiones en este caso es por seguridad, para reducir los niveles de calor residual en caso de accidente o apagado de mantenimiento, y se consigue mediante la inclusión de elementos que moderan los neutrones energéticos como el berilio. Finalmente, en sistemas *augianos* se incluyen, por supuesto, los desechos de fisión a transmutar, teniendo presente que los neutrones de fusión causan una mayor destrucción de actínidos por fisión que transformación en transuránicos de mayor número atómico por absorción neutrónica [76, 78].

En todos los casos la *blanket* debe incluir litio para la cría de tritio (Ecuaciones 2.16 y 2.17).

3.3 Evolución de los reactores híbridos

Aparte de una pluralidad de modelos menores, se desarrollaron diversos diseños conceptuales de reactores híbridos desde su propuesta en los años 50. El LLNL diseñó inicialmente reactores híbridos usando como *driver* espejos magnéticos. Junto con el *Pacific Northwest Laboratory* (PNL) y la *General Atomic Company* (GA) idearon así el *LLL/PNL Mirror Hybrid* en 1974 [79], el *LLL/GA Standard Mirror Hybrid Reactor* en 1978 [80] y el *LLL/GA Tandem Mirror Hybrid Reactor* en 1980 [81], pero estos conceptos se abandonaron rápidamente dado que los espejos magnéticos, como ya se mencionó en el pasado capítulo, no conseguían un adecuado confinamiento.

La compañía *Westinghouse Electric Corporation* desarrolló varios diseños de reactores simbióticos para la generación de combustible fisionable usando confinamiento magnético con tokamak. Destacaron el *Westinghouse Tokamak Hybrid Breeder* (1977) [76] y el *Westinghouse Commercial Tokamak Hybrid Reactor* (1978) [82], conocidos con el símbolo F4 (*Fusion-Fission-Fuel-Factory*) [67].

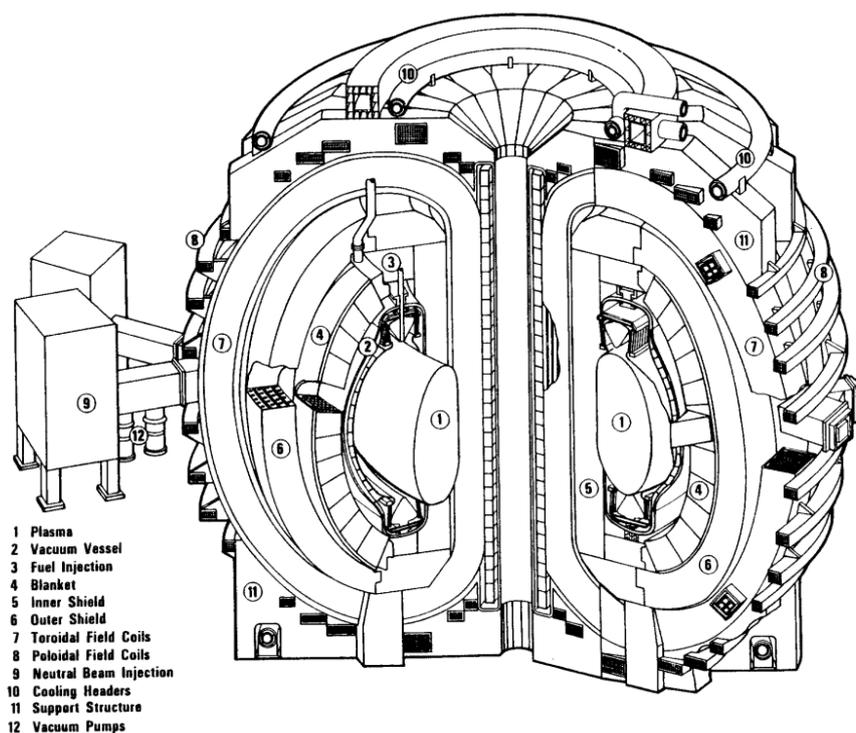


Figura 3.1: Diseño esquemático de reactor híbrido tokamak propuesto por la compañía *Westinghouse Electric Corporation* en 1978 [83].

Los experimentos en fusión de los siguientes años indicaban que aún restaban varias décadas para alcanzar la viabilidad comercial de un reactor. Ante esto, los sistemas híbridos se presentaban como una forma de acelerar su introducción al mercado, pero la imposibilidad de competir energéticamente con los ya construidos y avanzados reactores de fisión provocó su relegación.

Los continuos retrasos en alcanzar el *breakeven* revivieron en 2009 el concepto, más centrado en el aspecto *augiano* debido a la oposición de proyectos como el depósito de residuos nucleares de Yucca Mountain (Nevada, Estados Unidos) [84].

Paralelamente, en 2008 comenzó el desarrollo del proyecto LIFE (*Laser Inertial Fusion Energy*) en el LLNL, reactor ICF que podía operar como sistema híbrido gracias a una *blanket* multiplicativa de fisión (Figura 3.2) [85]. Sin embargo, el desempeño del programa estuvo muy por debajo de las predicciones realizadas, lo que llevó a su cancelación en 2013 junto a profundas críticas, resumidas en la declaración “en mi opinión, las promesas excesivas y la exageración de LIFE perjudicaron al Laboratorio Lawrence Livermore” (Robert McCrory, director del *Laboratory for Laser Energetics*, 2014) [86].

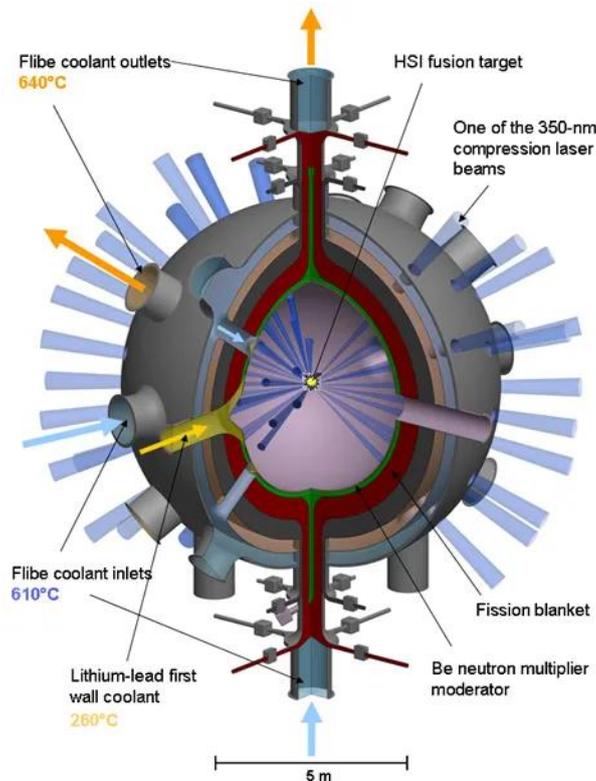


Figura 3.2: Cámara de fusión-fisión LIFE para ignición de un blanco por láseres ultravioletas (350 nm) de 1.4 MJ [85].

Actualmente se reconsidera el papel de los reactores híbridos para la obtención de energía y la transmutación de elementos peligrosos, con cada vez más número de estudios en los últimos años. Algunos de ellos incluyen la confirmación de la seguridad de operación de los reactores híbridos con plasmas de fusión DT [87], el respaldo para la construcción de pequeños reactores híbridos tras una modelización energética [88] y la comparación del porcentaje de transmutación y generación de combustible fisiónable de sistemas híbridos basados en tokamak y en ICF [89].

Algunas de las líneas de investigación actuales y los últimos avances en relación con la propuesta híbrida aparecen desarrollados más adelante en el trabajo.

Capítulo 4

Últimos avances en fusión nuclear controlada

En los pasados capítulos se han expuesto los principales enfoques para la consecución de la fusión nuclear controlada, explicando el funcionamiento y las bases físicas de los diferentes reactores. Junto con su evolución histórica, se ha sentado el marco teórico y el contexto para comprender los desafíos y progresos dados durante los últimos años en este campo. El presente capítulo recoge entonces algunos de los más recientes avances técnicos y científicos, sumados a la presentación de las principales líneas de investigación actuales en fusión nuclear controlada.

4.1 Contexto actual en MCF

Los reactores de fusión por confinamiento magnético, especialmente los tokamaks, están compuestos de numerosas y diversas partes (Figura 2.3). Consecuentemente, los desafíos para conseguir la fusión magnética controlada son igualmente variados y abarcan diferentes áreas de conocimiento, haciendo que el estudio en este campo sea altamente interdisciplinario.

Las principales líneas de investigación actuales en MCF se centran en el control del plasma y la mitigación de inestabilidades magnetohidrodinámicas de este, en la optimización de los materiales superconductores de las bobinas magnéticas y en el diseño del revestimiento de la cámara, especialmente de la *breeding blanket*.

4.1.1 Control del plasma y mitigación de inestabilidades

La naturaleza dinámica del plasma y las condiciones extremas a las que se ve sometido lo hacen propenso a sufrir inestabilidades que perturben su confinamiento (Figura 4.1). Estas pueden manifestarse de diversas formas como turbulencias o la formación de estructuras conocidas como islas magnéticas, regiones en las que las líneas de campo magnético se reconectan formando bucles cerrados. Las inestabilidades dan lugar a pérdidas de calor y de partículas del plasma, lo que lleva no solo a una menor eficiencia del reactor sino también a posibles daños en el mismo [32].

Una abrupta pérdida de estabilidad debido a la interacción de diversas islas magnéticas puede producir la llamada “disrupción del tokamak”, evento catastrófico en el que se pierde el aislamiento térmico en unos microsegundos, provocando la pérdida de la corriente toroidal en el plasma al no poder sostenerse por el fuerte incremento en la

resistencia eléctrica debido al descenso de temperatura. Los stellarators no enfrentan dicha disrupción gracias a la ausencia de corriente toroidal en el plasma, lo que supone una gran ventaja conceptual [32].

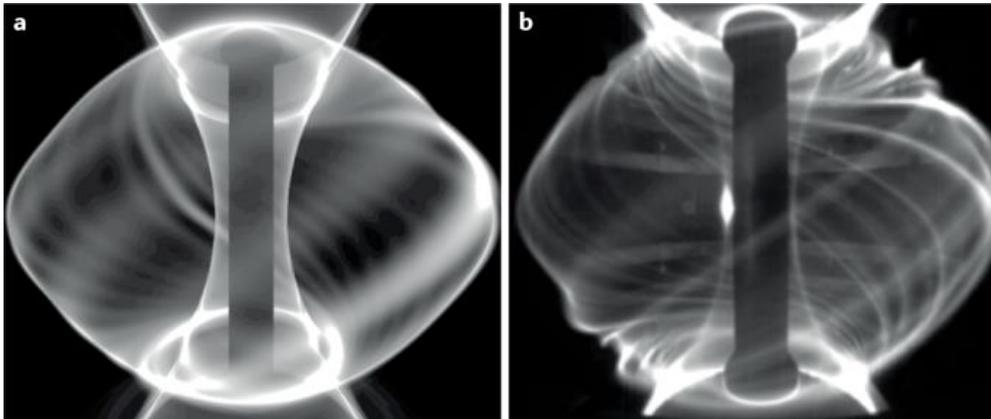


Figura 4.1: Comparación de inestabilidad ELM (*edge-localized mode*) simulada (a) y experimental ocurrida en el *Mega Spherical Tokamak* (b). Los ELMs son inestabilidades comunes producidas en el borde de la región confinada del plasma. Las estructuras de las inestabilidades simuladas resultan similares a las reales y los filamentos de plasma expulsados por la perturbación son claramente visibles [90].

En los últimos años, se ha logrado un avance significativo en la comprensión de la estabilidad magnetohidrodinámica para la operación de tokamaks, siendo necesario mantener un perfil adecuado de densidad y temperatura dentro del plasma. En experimentos actuales, los sistemas de calentamiento y conducción de corriente utilizados pueden emplearse también para ese propósito [91]. Sin embargo, en futuros reactores, el control a través de estos sistemas auxiliares será mucho menos eficiente debido al calentamiento autosostenido por las partículas alfa. Además, se ha logrado un progreso notable en el control activo de inestabilidades, utilizando bobinas externas o conducción local de corriente para contrarrestar su crecimiento [92].

Actualmente se investiga la implementación de inteligencias artificiales (IA) y *machine learning* para una predicción y control adicional de las inestabilidades. En 2019 se llevó a cabo el entrenamiento de un sistema de IA utilizando datos recopilados en tokamaks (entre ellos JET), instruyéndose dicho sistema para identificar patrones de datos que indicaran la inminencia de inestabilidades en el plasma. Mediante este aprendizaje retrospectivo el sistema logró después identificar la generación de inestabilidades con un margen de tiempo de un segundo con una precisión del 80 %, que aumentaba hasta el 98 % para un margen de 30 milisegundos [93].

En 2022, se pasó a un control activo del plasma con IA en el *Tokamak à Configuration Variable*, reactor de tamaño reducido ubicado en Suiza. Tras entrenar al sistema en simulaciones se implementó para controlar el reactor real, obteniendo resultados satisfactorios [94].

En 2023 se utilizó un nuevo método de control del plasma en el stellarator *Large Helical Device* en Japón (segundo stellarator más grande del mundo), mediante un gemelo digital o *digital twin*; una réplica virtual del plasma creada en un ordenador. Mediante observaciones en tiempo real se actualiza el gemelo digital para predecir los eventos futuros. Se empleó un enfoque conocido como *ensemble forecasting*, que

considera cierta incertidumbre en el estado actual y realiza predicciones para un conjunto de valores iniciales, para luego calcular la situación más probable (similar técnica a la usada en la elaboración de pronósticos meteorológicos) [95].

Aunque ninguno de estos experimentos dirigió el control de un plasma en el que se dieran procesos de fusión nuclear, se espera que la inclusión en sistemas con tales condiciones se materialice en los próximos años.

4.1.2 Materiales superconductores para las bobinas magnéticas

En primera instancia, los reactores de fusión magnética contaban con bobinas de conductores convencionales (usualmente cobre), pero ninguno de estos dispositivos conseguía un adecuado confinamiento. En 1978 las investigaciones en fusión y en superconductividad se unieron finalmente con la inclusión del superconductor NbTi en las bobinas toroidales del tokamak T-7 del Instituto Kurchatov [96]. El posterior descubrimiento de los superconductores de alta temperatura (HTS por sus siglas en inglés) en los 80 marcó entonces el verdadero punto de inflexión para la aplicación de estos materiales en tecnología de fusión. Si bien su incorporación no fue inmediata, sus prestaciones colocarían a estos materiales como primera alternativa para la generación de los intensos campos magnéticos durante las siguientes décadas. Actualmente los superconductores se plantean como la única opción viable que satisfaga los extremos requerimientos de confinamiento del plasma en MCF [97].

Los superconductores de baja temperatura (LTS por sus siglas en inglés) como el NbTi y el Nb₃Sn son los más extendidos en el presente debido a su menor coste y a su mayor disponibilidad, parcialmente atribuibles a la demanda generada por ITER [98]. Sin embargo, los futuros dispositivos de fusión magnética requerirán el uso de HTS que generen campos magnéticos más intensos sin necesidad de un enfriamiento tan extremo, permitiendo el uso de nitrógeno líquido como refrigerante en vez del más caro y difícil de manejar helio supercrítico, reduciendo así el coste de los sistemas criogénicos [97, 99].

Son diversos los proyectos públicos y privados que ya han diseñado e investigado HTS para la fusión magnética, destacando materiales como Bi₂Sr₂CaCu₂O_{8-δ} y Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10-δ} (BSCCO), y REBa₂Cu₃O_{7-δ} (REBCO) (RE representa tierras raras como Y, Gd y Nd, destacando el uso del primero de los elementos debido a su menor sección eficaz con los neutrones de fusión). El primero (Bi-2212), puede moldearse como alambre redondo, lo que lo hace muy adecuado para su uso en bobinas; y el segundo (Bi-2223), ha sido ya usado en cintas de ITER [29]. Asimismo, alambres de REBCO son actualmente suministrados por compañías como Bruker, AMSC, Fujikura y SuperOX, aumentando su disponibilidad comercial [99]. *Commonwealth Fusion Systems* (formado en 2018 en Estados Unidos) ha comenzado la construcción del proyecto SPARC, un tokamak compacto con imanes de YBCO [100]. Por otro lado, la empresa privada inglesa *Tokamak Energy* está construyendo un sistema de bobinas magnéticas de REBCO [99]. Se plantea también el uso en DEMO y CFETR (*China Fusion Engineering Test Reactor*) de una alternativa intermedia, consistente en

electroimanes con HTS y LTS para aprovechar los más intensos campos generados por los primeros, pero balanceando el coste con la presencia de los segundos [101]. Se plantea al Nb₃Al como LTS prometedor, gracias a unas propiedades mecánicas superiores al Nb₃Sn [102].

La investigación actual sobre imanes superconductores para la fusión aborda entonces diversos desafíos, destacando las dificultades mecánicas de fabricación debido a la gran fragilidad de muchos de los materiales superconductores, pues son cerámicos. Esto se une a la falta de opciones económicas y de fácil disponibilidad; aunque se prevé que la demanda generada por las plantas de demostración y la competencia entre proveedores reduzcan en el futuro los costes de los superconductores [99].

4.1.3 Materiales para el revestimiento interno de la cámara

Uno de los procesos más críticos que suceden en los reactores de fusión magnética es la interacción del plasma con las paredes del recipiente. El 80 % de la energía generada en los procesos de fusión escapa en forma de neutrones de 14.1 MeV (Ecuación 2.7), cuya ausencia de carga imposibilita su redirección mediante campos magnéticos. El revestimiento interno de la cámara (*blanket*, *divertor* y *first wall*), está expuesto entonces a un gran bombardeo neutrónico de alta energía. Por ello, los materiales del revestimiento aparte de cumplir sus cometidos principales (generación de tritio, absorción de impurezas, etc.) deben ser capaces de soportar temperaturas extremas e irradiación prolongada, además de disipar fácilmente el calor para ser recuperado mediante el circuito externo. La investigación en materiales innovadores desempeña por tanto un papel crucial en el ámbito de la fusión, y, particularmente en los últimos años, ha permitido la caracterización, modelización y experimentación de materiales con el fin de seleccionar la opción óptima para cada componente de los reactores.

Diversos conceptos de *breeding blankets* están siendo desarrollados, siendo las más relevantes las cuatro opciones que estudiará ITER: una aleación líquida plomo-litio (Pb-Li), dos módulos cerámicos y uno de lecho de guijarros cerámicos; refrigerados bien con agua o con helio [103]. La aleación líquida Pb-Li resulta la alternativa más prometedora, pero plantea ciertas dudas acerca de la corrosión, el comportamiento del tritio en el líquido o el efecto de los campos magnéticos en su fluidomecánica, por lo que diferentes diseños del circuito de Pb-Li se estudian para la recuperación de tritio y su reinyección en el plasma. Destaca en ese aspecto el proyecto CLIPPER (Ciemat Lithium-lead loop for Permeation exPERiments) de CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas) [104].

En cuanto al *divertor*, se plantea como principal componente el tungsteno debido a su elevada conductividad térmica, alto punto de fusión y baja retención de temperatura, aunque estudios apuntan a un daño progresivo por irradiación neutrónica no despreciable [38]. Por ello, se exploran modificaciones como aleaciones o inclusión de fases secundarias, destacando el dopado con diamante ya que, junto a adecuadas propiedades térmicas, su estructura sp³ lo dota de una baja tasa de retención de tritio. Como económicamente no resulta una opción atractiva se están realizando esfuerzos

adicionales por desarrollar *diamond-like carbon* (DLC) como sustituyente [38]. Un estudio en España sugiere la posibilidad de usar aleaciones líquidas litio-estaño (Li-Sn) [105].

El material más popular para la *first wall* y que será usado en ITER es el berilio, lo que ha acelerado la investigación sobre sus condiciones y aspectos más relevantes para la fusión. Ha sido seleccionado por su buena conductividad térmica, su capacidad de absorción de oxígeno (contribuyendo a mantener un alto nivel de pureza del plasma), su capacidad multiplicativa de neutrones y su bajo número atómico (minimizando las pérdidas por radiación de los átomos desprendidos en el plasma, que depende de Z^2). Sin embargo, su relativamente bajo punto de fusión (1278 °C) y su alta toxicidad han incitado la búsqueda de otras alternativas, destacando los berílicos (compuestos intermetálicos de berilio) como Be_{12}Ti , Be_{12}V y Be_{12}Zr . Estudios preliminares encabezan al Be_{12}Ti por su menor tendencia a retener tritio y su mayor punto de fusión, lo que fomenta extender su estudio para aplicaciones nucleares [38].

Los materiales estructurales deben desarrollarse hasta su máximo potencial igualmente. Aparte de ser resistentes deben tener una baja activación (baja tasa de transmutación, ionización/excitación y desplazamiento atómico). Como principales candidatos en orden de relevancia se plantean los aceros ferríticos-martensíticos de baja activación (EUROFER y F82H), carburo de silicio y aleaciones de vanadio [38].

Queda claro entonces como la investigación en materiales desempeña un papel esencial en la carrera por la fusión controlada, resultando crucial para el éxito de proyectos como ITER y DEMO. De esta forma, están surgiendo cada vez más instalaciones de prueba de materiales y de análisis de interacción plasma-pared en dispositivos menores, por ejemplo, espejos magnéticos [30].

4.2 Contexto actual en ICF

Los avances actuales en fusión por confinamiento inercial se basan en la mejora de cada aspecto del proceso para lograr una implosión de la más alta calidad posible. Esto implica la optimización de detalles como el llenado de los blancos criogénicos, su soporte en el *hohlraum* o la exploración de diferentes geometrías de este último. Además, el uso de algoritmos para predecir como será la implosión y analizar los datos posteriores al experimento resultan de gran utilidad.

4.2.1 Llenado y soporte de los blancos criogénicos

El combustible gaseoso del centro de los blancos criogénicos se inyecta mediante un tubo micrométrico de borosilicato (típicamente de 10 μm de diámetro y 2 μm de espesor), el cual se inserta por un agujero hecho con láser en la pared del ablador. Desde los primeros experimentos en el NIF este tubo de llenado ha suscitado inquietudes acerca de su potencial para generar asimetrías en la implosión. Así, desde 2017, empezaron pruebas usando tubos de menores dimensiones (5 μm de diámetro),

resultando en desempeños de fusión incrementados. Simulaciones parecen indicar que el simple hecho de realizar la inyección de forma inclinada en vez de normal a la superficie puede reducir adicionalmente las perturbaciones, aunque esto se confirmará mediante experimentos [106].

La fina malla que sostiene el *pellet* en el centro del *hohlraum* en el enfoque indirecto de ICF es también uno de los componentes que más contribuyen a la degradación de la implosión. Originalmente se pensaba que dicha membrana abandonaba la cápsula tangencialmente. Sin embargo, al absorber rayos X, esta se expande hacia fuera e interactúa con la cápsula. De esta forma, se siembra una perturbación que es amplificada progresivamente por las inestabilidades de Rayleigh-Taylor y que termina resultando en una implosión asimétrica [53], como se muestra en la Figura 4.2.

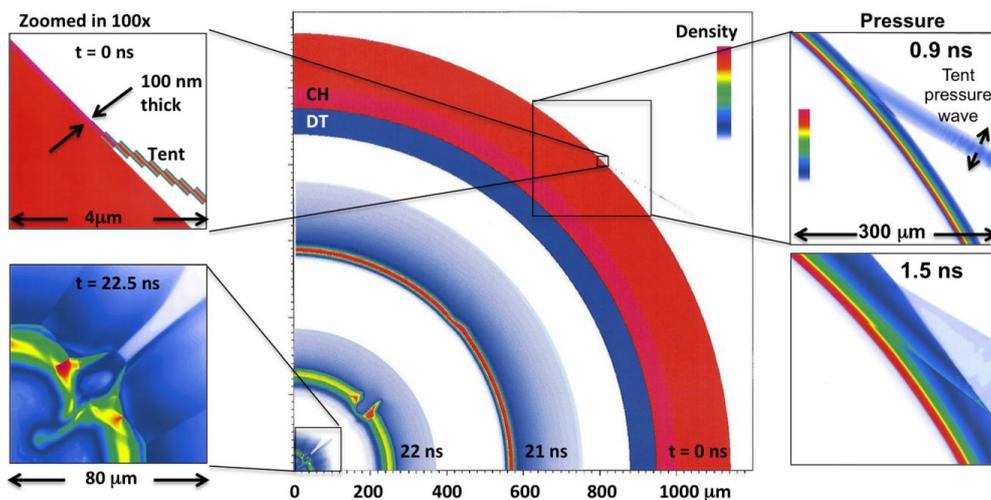


Figura 4.2: Secuencia de imágenes del desarrollo de la perturbación de la membrana en una simulación de alta resolución correspondiente al experimento N120321, que utilizó una membrana de 100 nm de espesor a un ángulo de contacto de 45°. Los recuadros a la izquierda muestran imágenes ampliadas de la ubicación inicial del contacto de la malla (arriba) y la implosión en el momento de *stagnation* (abajo). A la derecha se muestra la expansión inicial de la membrana, que interactúa con el frente de ablación, provocando la perturbación [107].

Actualmente se desarrollan nuevos métodos de sostener la cápsula en el *hohlraum*. Una de las opciones barajadas es el de seguir usando la misma membrana, pero recubrir la cápsula con una fina capa de espuma de baja densidad, de forma que la malla no esté en contacto directo con el blanco. Esta espuma es transparente a los rayos X y de una densidad tal que la ablación de la cápsula empieza antes de que la expansión de la membrana y la onda de choque de la espuma puedan alcanzar el blanco. Se ha experimentado con espumas de SiO₂ de baja densidad (30 mg/cm³). Otra opción (y la más prometedoras) es la de utilizar el propio tubo de llenado para sostener la cápsula, de forma que el tubo micrométrico sea el único elemento en contacto con ella [107].

4.2.2 Diseños avanzados de *hohlraums* alternativos

Una vez el *hohlraum* se calienta comienza a llenarse del plasma del material de sus propias paredes hasta alcanzar una densidad crítica. En esa circunstancia los láseres no pueden propagarse, lo que supone una limitación del tiempo que el *hohlraum* puede actuar para generar el campo de radiación que comprima la cápsula.

Además, en los *hohlraums* cilíndricos típicos el plasma en expansión comienza interfiriendo con los láseres más internos, absorbiendo su energía y evitando que alcancen la pared ecuatorial. Esto restringe el control de la forma de la implosión, ya que la energía no puede ser transportada adecuadamente al centro del *hohlraum*. Para ralentizar dicha expansión del plasma se llena la cavidad usualmente con helio, lo que alarga el tiempo de actuación del *hohlraum*, aunque no evita la limitación por completo.

En la actualidad se investigan entonces diversos métodos para superar este problema. Uno de ellos es el uso de geometrías exóticas de la cavidad, habiéndose explorado extensamente diversos diseños en los pasados años. Algunos de ellos incluyen *hohlraums* en forma de esferoide prolato (balón de rugby) [108] (Figura 4.3), tetraédricos [109] o *hohlraums* triáxicos cilíndricos [110]. En 2018 y 2019 se presentaron dos innovadores diseños geométricos llamados *I-raum* y *frustraum* respectivamente [111, 112]. El primero de ellos consiste en una cavidad en forma de I, con un mayor radio en los polos del cilindro que en el ecuador, mientras que el segundo consiste en dos conos truncados unidos por la base (Figura 4.3). En 2020 resultados experimentales prometedores usando *frustraums* han alentado a los investigadores a seguir explorando esta geometría [113]. El diseño en 2021 de cavidades octaédricas llevó también a resultados que han atraído últimamente la atención de la comunidad de fusión hacia esa geometría [114].

Otra alternativa para atenuar la prematura absorción de los haces láser interiores es la de reducir la densidad de la pared del *hohlraum* para que el plasma generado sea igualmente menos denso, y, por tanto, menos opaco a la radiación láser. Dicha reducción de densidad de las paredes disminuye adicionalmente las pérdidas por absorción. Diferentes métodos para la fabricación de *hohlraums* de baja densidad se han propuesto, destacando el uso de revestimientos espumosos [115].

El éxito de estos conceptos avanzados de *hohlraums* permite además el uso de blancos termonucleares más grandes, lo que acoplará aún más energía del *hohlraum* a la cápsula, proporcionando unas mayores ganancias de fusión [115].

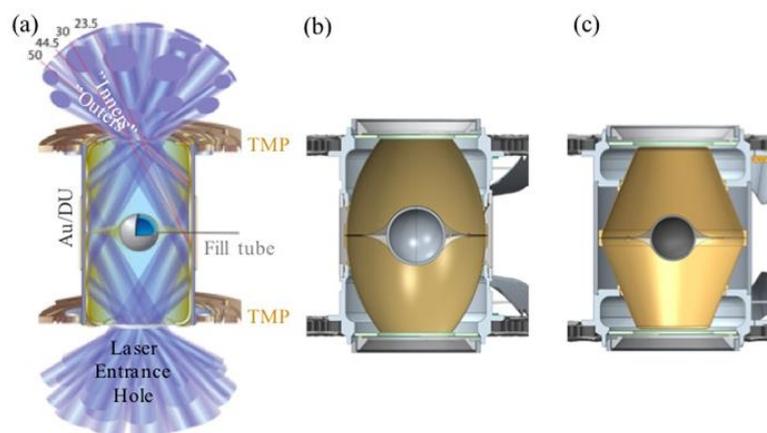


Figura 4.3: Diferentes formas de *hohlraums*: cilíndrico con los haces láser incidiendo en las paredes con diferentes ángulos (a), *hohlraum* con forma de esferoide prolato (b) y *frustraum* (c) [116].

4.2.3 Predicción de implosiones y análisis retrospectivo

Con un número limitado de implosiones al año para probar diferentes diseños experimentales en el NIF y demás instalaciones de ICF, los modelos computacionales han resultado ser una herramienta esencial para la elección de las mejores configuraciones. El uso de modelos informáticos para la simulación del proceso de implosión ha estado presente desde la concepción de la ICF, con LASNEX siendo el primer código informático creado para la exploración de la compresión láser y sirviendo de base para los códigos de alta resolución 3D usados hoy en día [117].

Debido a la complejidad del proceso de implosión los códigos deben asumir simplificaciones, alejando las simulaciones de la realidad. Por ello, con el paso del tiempo, se han incluido en ellos datos de experimentos pasados para que las predicciones se basen adicionalmente en un análisis experimental retrospectivo. Además, en los últimos años ha habido un creciente interés por la implementación de *machine learning* e IA para la identificación de defectos ópticos, el diseño de innovadores blancos, el análisis de experimentos y la predicción de rendimientos.

Actualmente el principal código usado en ICF es el llamado HYDRA, dotado con décadas de conocimiento sobre blancos para simular la implosión en 3D y modelando hasta cien aspectos para cada objetivo (dimensiones y grosor de la cápsula, suavidad de la superficie del ablador, diámetro del tubo de llenado, etc.) (Figura 4.4). En 2019 y 2020 unas simulaciones de HYDRA revelaron diversas fuentes de asimetría en la implosión [117].

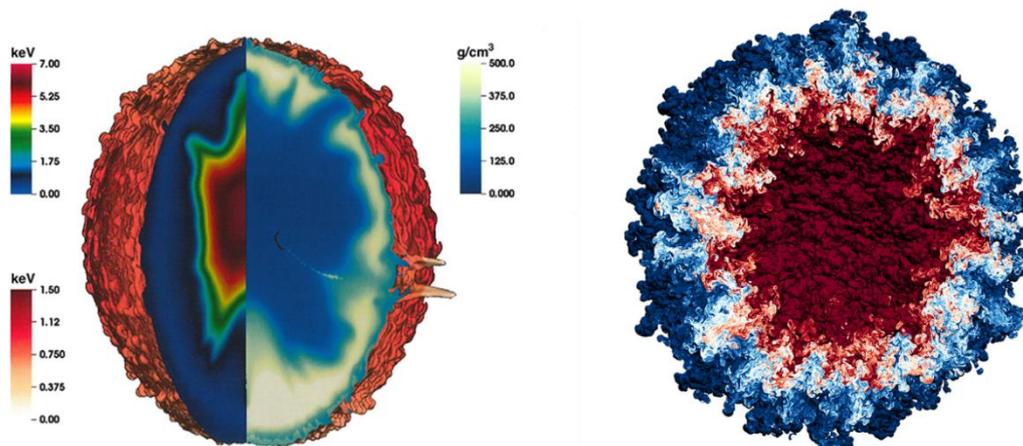


Figura 4.4: Izqda.: Simulación 3D de alta resolución de HYDRA de la implosión de la cápsula de un disparo del NIF en junio de 2017. El contorno superficial muestra el frente de ablación coloreado según la temperatura. La vista en corte muestra la densidad en el lado derecho y la temperatura en el izquierdo. El *jet* del tubo de llenado es visible cerca del ecuador. Dcha.: Parte de una simulación de una implosión ideal de ICF que muestra la mezcla de fluido turbulento esféricamente. Se han realizado cálculos con 98 mil millones de puntos para estudiar la implosión de cápsulas en LLNL's Sierra, uno de los superordenadores más potentes del mundo [117].

Aunque el uso de *machine learning* en el campo de la ICF es relativamente nuevo, está demostrando la capacidad de acelerar el análisis y mejora de datos y resultados. Por ejemplo, en 2021, se presentó la aplicación de una transformación correctiva basada en datos experimentales pasados para que las predicciones en experimentos del NIF

fuesen consistentes con las observaciones. De esta forma predijo en experimentos posteriores varias magnitudes de interés con menos de un 10 % de error [118].

En 2021 también se usaron algoritmos de aprendizaje automático (*random forests*) para predecir resultados de experimentos de ICF, consiguiendo valores de R^2 de hasta el 0.9 para magnitudes como el tiempo de estancamiento. La inclusión en el modelo de diversos diseños de blancos de varias campañas del NIF permitía la identificación de los aspectos de diseño con una mayor influencia en los resultados experimentales [119].

En 2024 se programa la llegada del nuevo superordenador “El Capitán” del LLNL, cuya capacidad para ejecutar simulaciones computacionalmente más costosas que el actual superordenador Sierra proporcionará aún más comprensión sobre futuros experimentos de ICF [117].

4.3 Contexto actual en reactores híbridos y otras alternativas

El desarrollo de sistemas híbridos de fusión-fisión se ha discutido activamente en conferencias [120], publicaciones y en el marco de proyectos coordinados por la IAEA (*International Atomic Energy Agency*) [121]; resultando atractivos como paso intermedio en la transición hacia reactores de fusión pura y destacando por su aspecto *angiano*.

De esta forma, los proyectos y estudios sobre reactores híbridos son cada vez más numerosos. Algunos ejemplos notables son la propuesta de stellarators híbridos [122], el desarrollo de simulaciones de pequeños reactores híbridos para evaluar su eficacia en la reducción de radiotoxicidad de actínidos por transmutación [123] y los estudios ya mencionados al final del Capítulo 3, destacando la confirmación de la seguridad de la operación de este tipo de reactores [87].

Además, cabe destacar que los avances más modernos en MCF e ICF presentados previamente son aplicables adicionalmente a los reactores híbridos, ya que usan como *driver* reactores virtualmente idénticos a los empleados en el contexto de fusión pura.

Otros enfoques alternativos de fusión se exploran igualmente. Por ejemplo, destaca el persistente interés de la empresa Zap Energy por desarrollar un reactor de fusión *Z-pinch* comercial [124], el diseño avanzado de nuevos blancos para el enfoque de *fast ignition* en ICF [125] o la aparición de diversas corporaciones para el desarrollo de plantas de confinamiento magneto-inercial como Magneto-Inertial Fusion Technologies Inc., Sorlox o Tri Alpha Energy [126].

Capítulo 5

Futuro de la fusión nuclear controlada

El primer capítulo expuso la evolución de la fusión nuclear desde su concepción hasta la actualidad, sentando el marco para comprender el resto del trabajo. En los dos siguientes capítulos se describieron los diferentes enfoques para la obtención de energía de fusión y, el cuarto, aunó todo el contexto dado para presentar los últimos avances conseguidos en el sector. Este último capítulo aprovecha entonces toda la perspectiva brindada por la revisión para mostrar las futuras líneas de investigación en fusión nuclear controlada y las previsiones sobre su desarrollo. Asimismo, incluye un breve apartado que destaca el papel de España en este avance y una sección final que aborda el impacto de la introducción de los reactores de fusión en la sociedad.

5.1 Camino hacia la fusión comercial: previsiones

El mayor logro energético en MCF hasta la fecha fue alcanzado por JET en 1997 (Figura 2.5), con una ganancia Q de 0.65 [10]. Desde entonces, los esfuerzos en fusión magnética se han centrado en ITER, con el objetivo de superar esa cifra una vez completada su construcción. En ICF el éxito más significativo se dio con la ignición en 2022 y 2023 [11, 59], tras años de experimentación en el NIF (Figura 2.9).

Si bien estos hitos pueden sugerir la inminente llegada de los reactores comerciales, la historia de la fusión nuclear ha demostrado una tendencia a ser demasiado optimista en cuanto a plazos, situación que persiste en la actualidad, especialmente en MCF.

Ya en 2020 líderes de ITER avisaron que la generación de un primer plasma en 2025 no era factible. El hallazgo de un defecto en la alineación de una de las cámaras de vacío ese mismo año y de fisuras en uno de los sistemas de refrigeración por agua en abril de 2022 han comprometido aún más el calendario del proyecto. Además, se espera más demora por comprobaciones no previstas en el plan original [127]. Por otro lado, la pandemia de COVID-19 provocó problemas con las cadenas de suministros y, aunque el portavoz de ITER Laban Coblentz afirmase en 2022 que “ITER es hijo de la Guerra Fría y es deliberadamente no alineado” [128], no serían de extrañar más retrasos por las tensiones entre Rusia y Occidente a causa de la guerra ruso-ucraniana.

No obstante, tampoco debe interpretarse la situación como desalentadora. En 2022 la IAEA registró un total de 143 dispositivos de fusión operativos, en construcción o planificados en todo el mundo, de los cuales 131 eran diseños experimentales y 12 plantas de demostración en fase de planteamiento; y en 2023 se planearon nueve tokamaks a escala de demostración, seis de ellos de propiedad pública [129]. Además de la financiación pública, una mayor participación del sector privado en el desarrollo

e investigación de la fusión se observa como tendencia global en crecimiento (en especial en Estados Unidos) [130], atribuible en parte al surgimiento de empresas relacionadas con la fusión inspiradas por los grandes proyectos.

Se prevé entonces una aceleración en las próximas décadas de las iniciativas de fusión. Se espera además que ITER mantenga la fecha de operación con deuterio-tritio en 2035, tal y como planeaba el cronograma de 2016. Mientras, la fase preconceptual de DEMO inició en 2014 y su diseño conceptual está programado para completarse en 2027 [129]. En cuanto a fusión inercial, los últimos logros del NIF han motivado la continuación de experimentos de cara a construir las futuras plantas comerciales.

Aparte de estos grandes proyectos, las principales potencias en fusión investigan otras estrategias, presentando diferentes planes según sus prioridades y circunstancias.

Estados Unidos apunta a tener una planta de fusión piloto en la década de 2040, y ha fijado el objetivo de lograr emisiones netas cero para 2050. En 2023 era el país con el mayor número de dispositivos de fusión del mundo, con un total de 34 (en funcionamiento, construcción o planificados), cinco de los cuales se desarrollarán como plantas de demostración. Si bien la nación americana pretende continuar la investigación en ICF, en vista de los avances conseguidos en MCF busca estudiar también dicho enfoque con proyectos como SPARC. Su construcción comenzó a mediados de 2021 y se espera que genere una potencia de fusión de 140 MW, con una ganancia de $Q \approx 11$ (Figura 5.1) [129].

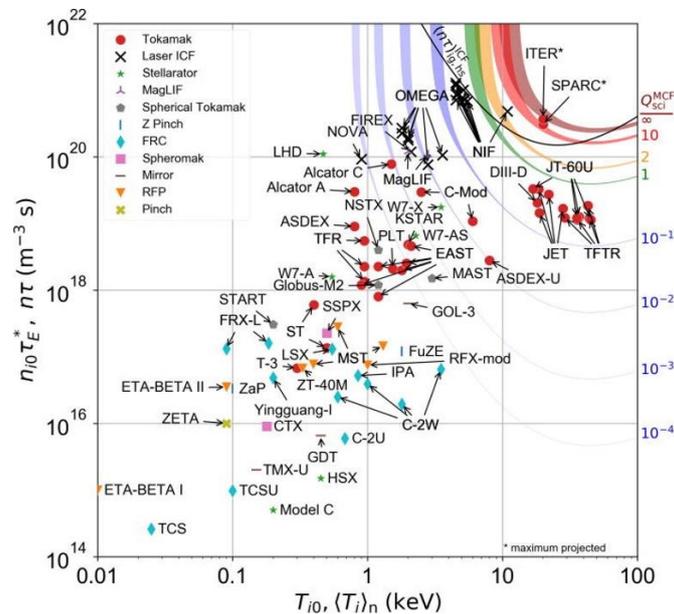


Figura 5.1: Parámetro de Lawson frente a temperatura para experimentos de fusión. Los contornos coloreados indican los requerimientos de experimentos de MCF para lograr las ganancias indicadas. La curva negra marca los requerimientos de los experimentos de ICF para alcanzar la ignición [131].

Reino Unido acabó con la fase de operación de JET en 2023, mismo año en el que el gobierno del país anunció la creación de la empresa *UK Industrial Fusion Solutions Ltd.* para la construcción de STEP (*Spherical Tokamak for Energy Production*) cuya operación se espera que comience en 2040 [129].

Japón, con 13 tokamaks disponibles o planeados para su construcción, es el país con más número de este tipo de dispositivos del mundo, 9 de los cuales están operativos. El país nipón fundó la Política Nacional de Japón en 2021 para acelerar su desarrollo en fusión, y pretende completar en 2025 el diseño conceptual de JA-DEMO, un dispositivo tokamak de demostración cuyo objetivo es el de generar energía a escala de planta, poseer un suministro autosuficiente de tritio y potenciar el avance hacia la comercialización en paralelo a la construcción de ITER [129, 132].

En China la mayoría de los dispositivos de fusión son tokamaks, de los cuales CFETR se planifica como planta de demostración por el Consorcio Chino. Su fase de diseño terminó en 2020 y se espera que su construcción se complete en 2040 para su operación [132].

Rusia, en contraste con el resto de los participantes de ITER, demuestra un gran nivel de involucración en el desarrollo de reactores híbridos. Por ejemplo, la Unión Europea, tradicionalmente orientada hacia la ecología, limita las actividades relacionadas con los mismos al ámbito académico. Rusia, sin embargo, está explorando activamente la vía híbrida con *drivers* de confinamiento magnético dentro del marco del programa de la corporación estatal *Rosatom State Atomic Energy Corporation*. Rusia planea tener una planta tokamak de demostración (DEMO-RF) en 2055. Previamente, el país eslavo idea la construcción para 2033 de DEMO-FNS, un reactor híbrido que aparte de obtener energía se utilizará como sistema simbiótico y/o *auxiano*. Rusia también considera la construcción de un reactor híbrido con imanes de HTS y revestimiento interno de la cámara (*first wall* y *divertor*) de metal líquido. El proyecto federal “*Development of Fusion and Innovative Plasma Technologies*” prevé la viabilidad de los híbridos industriales en Rusia para 2050 [129, 132, 133].

Con todo esto, y como se viene diciendo desde la concepción de la energía de fusión como fuente de energía, esta parece seguir estando a 30 años de distancia. Sin embargo, a la luz de los avances conseguidos y los proyectos futuros, en 2022 se afirmó (en respuesta al conocido comentario histórico) que, en realidad, solo faltaban 17.8 años [134].

5.2 España en el futuro de la fusión nuclear

Isabel García Cortés, investigadora del Laboratorio Nacional de Fusión (LNF) y presidenta del Claustro Científico-Técnico del CIEMAT, destaca que la presente inversión española en el ámbito de fusión se centra en el stellarator TJ-II en Madrid [135]. Los estudios sobre la física de plasmas confinados magnéticamente en este dispositivo se enfocan en el impacto de la configuración magnética sobre el transporte de calor y de partículas. También se desarrollan actualmente investigaciones nacionales menores como el ya mencionado proyecto CLIPPER [104] o estudios en el dispositivo OLMAT (*Optimization of Liquid Metal Advanced Targets*) en el LNF, instalación para la prueba de materiales bajo flujos de calor extremos [136].

Adicionalmente, España es miembro de grandes entidades internacionales como la IAEA y EUROfusion [137, 138]; y respalda proyectos de gran envergadura como ITER y la futura DEMO. La relación de España con estas iniciativas resulta especialmente cercana, pues la sede de *Fusion for Energy* (F4E), organización constituida para la gestión de la aportación de Europa en dichos planes, se encuentra en Barcelona [139].

El papel de España en fusión nuclear a nivel internacional pasará a tener mayor relevancia con la construcción de IFMIF-DONES (*International Fusion Materials Irradiation Facility – DEMO Oriented NEutron Source*) en Granada. Esta instalación, elemento central del Programa DONES y dirigido por el consorcio IFMIF-DONES España, cuenta con la participación de diversos países de la Unión Europea, Reino Unido y Japón. Su edificación comenzó en 2023, y se prevé que pueda operar a partir de 2034 [140, 141].

La misión de IFMIF-DONES será la de proporcionar una fuente de neutrones de alta energía de la suficiente intensidad y volumen de irradiación para [142]:

1. Evaluar materiales y su respuesta a la irradiación neutrónica de alta energía para el diseño, construcción y operación segura de DEMO.
2. Generar una base de datos para la comparación del comportamiento de los materiales irradiados, en la cual se podrán incluir resultados obtenidos por otras instalaciones como reactores de fisión.

Para ello, constará de dos aceleradores que bombardean deuterones contra una cortina de litio líquido que fluye a alta velocidad. A través de reacciones nucleares entre los núcleos de deuterio y litio se producen neutrones con energías de 15 - 20 MeV, los cuales se utilizan entonces para irradiar muestras de materiales en módulos de prueba. La energía del haz incidente y la corriente de ambos aceleradores se podrán ajustar para maximizar el flujo neutrónico producido con objeto de obtener una irradiación similar a la que sufrirá la *first wall* de DEMO [143].

Además, dado que su infraestructura estará disponible durante la próxima década, no se descarta la posibilidad de que IFMIF-DONES asista a ITER en algunos aspectos de su fase de operación [142].

5.3 Impacto de la fusión nuclear controlada en el futuro energético global

La creciente presencia global de la industria de fusión presenta muchas oportunidades para la cooperación internacional, la inversión de fondos y la ubicación de los diferentes reactores; especialmente a medida que los gobiernos comiencen a competir por el beneficio que supondría un proyecto de fusión exitoso. Sin embargo, también aparecen problemas como la ausencia de mecanismos regulatorios claros. La comunidad de fusión deberá trabajar colectivamente para allanar el camino hacia el cumplimiento de las normas que pueda imponer cualquier futuro ente regulador en

componentes de seguridad. Los códigos y estándares necesarios pueden no ser evidentes actualmente, pero las empresas deben tener planes para una incorporación rápida de las directrices necesarias durante la futura comercialización [144, 145].

EUROfusion ya ha establecido un grupo de trabajo para la elaboración de las consideraciones de un marco regulatorio adaptado a los programas de fusión. El grupo consta de expertos en seguridad nuclear en los campos de fisión y de fusión, y evalúa la obtención de licencias para la operación segura y lícita de las plantas de energía de fusión. Las normativas dependen de la legislación de cada país, por lo que un marco regulatorio global común para las futuras plantas no es posible. Sin embargo, al igual que sucede con la regulación actual de las plantas de fisión, podrían implementarse enfoques armonizados para brindar niveles comunes de protección [146]. Además, la comunidad de fusión no debería depender de las políticas contra el cambio climático para volverse comercial, pues esto conlleva estar sujeto a diferentes normativas según el país, dificultando su implementación [147].

A parte de la producción aislada de electricidad, existen otros roles potenciales que la implementación de los reactores de fusión puede desempeñar [147]:

- Aplicaciones para la generación de hidrógeno, desalinización de aguas y calefacción urbana.
- Creación de empleo y aumento del Producto Interior Bruto en el sector energético.
- Uso como instalaciones de cogeneración de alta temperatura: los reactores de fusión comerciales podrían tener temperaturas de entrada previas a la turbina superiores a 600 °C, pudiéndose aumentar su rendimiento con la extracción de calor en esa parte (mucho mayor que en aplicaciones de baja temperatura).

Independientemente de todo esto, para que la energía de fusión se materialice y ejerza un papel relevante debe ser barata, socialmente aceptada y estar disponible temprano. De lo contrario, el problema del suministro eléctrico de bajas emisiones podría verse resuelto antes y el interés en la investigación disminuiría. Puede incluso que la fusión acabe contribuyendo al abastecimiento energético global de una manera secundaria; ayudando a mitigar los problemas de intermitencia de las energías renovables (como sucede actualmente), como apoyo en un escenario en el que estas no puedan solventar por sí mismas la descarbonización total y/o encontrando un nicho de mercado [148].

Resulta importante destacar finalmente como la auditoría de proyectos como ITER o DEMO puede resaltar su papel como actores cruciales no solo en la investigación y desarrollo de la fusión, sino también como indicadores geopolíticos del rol que puede tener esta en la diplomacia internacional, especialmente entre naciones tensionadas como Estados Unidos, China y Rusia [147].

Tras toda la revisión realizada queda claro que, aunque el potencial de la energía de fusión es suficiente para motivar su desarrollo, su comercialización dependerá de los gobiernos y políticas internacionales, pudiendo incluso quedar relegada a un mercado menor, o, simplemente, nunca llegando a ser una tecnología bien establecida.

Conclusiones

Las conclusiones derivadas de toda la revisión se resumen en los siguientes puntos:

1. El apoyo político y socioeconómico resulta crucial para el avance de la tecnología de fusión.
2. La MCF y la ICF representan los dos enfoques más investigados y prometedores en fusión nuclear. Métodos alternativos contribuyen adicionalmente a su progreso.
3. Los reactores híbridos se presentan como apoyo en la transición hacia un futuro con reactores de fusión puros, aunque la preocupación por su relación con elementos peligrosos sigue siendo un tema de consideración.
4. Actualmente se realizan numerosos estudios y avances variados que prometen impulsar el desarrollo de la tecnología de fusión.
5. La fusión nuclear controlada tiene el potencial para transformar el panorama energético global, pero su implementación a gran escala sigue siendo un objetivo a largo plazo.

El trabajo cuenta con una extensa bibliografía que incluye documentos históricos, archivos militares desclasificados, estudios científicos de actualidad, análisis sociales, económicos y políticos, referencias de grandes entidades y declaraciones de personajes públicos de gran relevancia. Conforme a ello, el trabajo cumple con el objetivo de resultar un gran repositorio bibliográfico sobre fusión nuclear controlada.

La realización de este trabajo me ha permitido profundizar en un campo de la física y la tecnología de vanguardia. A través del análisis de numerosas y variadas fuentes he adquirido un entendimiento más claro de la fusión nuclear controlada; no solo de sus principios fundamentales y los avances actuales sino también de su evolución histórica y de su intrínseca relación con factores sociales, políticos y económicos del contexto en el que se encuentre. Me ha permitido comprender la investigación y la publicación actual de estudios, y compararlas con cómo eran en el pasado. Además, este proceso ha fortalecido mis habilidades de investigación y análisis crítico, así como mi capacidad para evaluar, sintetizar y transmitir información de manera clara.

Como opinión personal, considero que la fusión nuclear tiene un gran potencial por lo que debe seguir fomentándose su progreso e investigación. Sin embargo, a la vista de los continuos retrasos en proyectos como ITER y a la creciente tensión entre ciertas potencias mundiales, creo que tardará más en comercializarse de lo que las posturas mostradas en el último capítulo defienden. Aun así, confío en que dicha comercialización llegará durante la segunda mitad del siglo XXI, marcando un punto de inflexión en los ámbitos energético, medioambiental, social, político y económico. Espero que el trabajo resulte útil para aquellos que busquen una fuente amplia y variada de información sobre fusión nuclear controlada. Sobre todo, confío en que el lector haya encontrado el trabajo interesante y haya podido sumergirse en una historia de logros, desafíos y esfuerzos constantes, haciéndose consciente del impacto de los avances actuales en el futuro. Finalmente, espero que este trabajo suponga el inicio de mi carrera como profesional de la física y la fusión nuclear, marcando el inicio de una trayectoria de investigación en estos ámbitos que tanto me fascinan.

Acrónimos

CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. 30, 38.
CFETR	China Fusion Engineering Test Reactor. 29, 38.
CLIPPER	Ciemat LIthium-lead loop for Permeation exPERiments. 30, 38.
DEMO	DEMOstration power plant. 3, 13, 15, 29, 31, 37, 39-40.
DLC	Diamond-like Carbon. 31.
DT	Deuterio-Tritio. 6-7, 14, 16, 17, 19, 26.
ELM	Edge-localized Mode. 28.
F4	Fusion-Fission-Fuel-Factory. 25.
F4E	Fusion for Energy. 39.
GA	General Atomic Company. 25.
HTS	High Temperature Superconductor. 29, 30, 38.
IA	Inteligencia Artificial. 28, 34.
IAEA	International Atomic Energy Agency. 35, 36, 39.
ICF	Inertial Confinement Fusion. 16-20, 26, 31-32, 34-37, 41.
IFMIF-DONES	International Fusion Materials Irradiation Facility – DEMO Oriented NEutron Source. 39.
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor. 3-4, 13, 15, 29-31, 36-41.
JET	Joint European Torus. 3, 12, 14-15, 28, 36-37.
KAIMIR	KAIST Mirror. 10.
KAIST	Korea Advanced Institute of Science and Technology. 10.
LIFE	Laser Inertial Fusion Energy. 26.
LLNL	Lawrence Livermore National Laboratory. 19, 25-26, 34-35.
LMJ	Laser MegaJoule. 19.
LNF	Laboratorio Nacional de Fusión. 38.
LTS	Low Temperature Superconductor. 29-30.
LWR	Light Water Reactor. 22.
MCF	Magnetic Confinement Fusion. 10-15, 20, 27, 29, 35-37, 41.
MFTF-B	Mirror Fusion Test Facility B. 10.
NIF	National Ignition Facility. 3, 19, 31, 34-37.
OLMAT	Optimization of Liquid Metal Advanced Targets. 38.
PNL	Pacific Northwest Laboratory. 25.
RE	Tierras Raras (Rare Earths). 29.
SGIII	Shenguang III. 19.
STEP	Spherical Tokamak for Energy Production. 37.
TFTR	Tokamak Fusion Test Reactor. 14-15.
W7-X	Wendelstein 7-X. 12-13.

Referencias

- [1] A. S. Eddington, “The Internal Constitution of the Stars”, *The Scientific Monthly*, **11.4**, 297–303 (1920).
- [2] M. L. E. Oliphant, P. Harteck and E. Rutherford, “Transmutation effects observed with heavy hydrogen”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character* **144.853**, 692-703 (1934).
- [3] H. A. Bethe, “Energy production in stars”, *Physical Review* **55.5**, 434 (1939).
- [4] O. Hahn and F. Strassmann, “Concerning the existence of alkaline earth metals resulting from neutron irradiation of uranium”, *Naturwissenschaften* **27.11**, (1939).
- [5] H. A. Bethe, “Comments on the History of the H-Bomb”, *Los Alamos Science* **3.3**, 47 (1982).
- [6] J. D. Lawson, “Some criteria for a useful thermonuclear reactor”, *Atomic Energy Research Establishment*, (1955).
- [7] J. Nuckolls, *et al*, “Laser compression of matter to super-high densities: Thermonuclear (CTR) applications”, *Nature* **239.5368**, 139-142 (1972).
- [8] E. R. Sadik-Zada, A. Gatto and Y. Weißnicht, “Back to the future: Revisiting the perspectives on nuclear fusion and juxtaposition to existing energy sources”, *Energy* 129150, (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129150>.
- [9] A. J. Webster, “Fusion: Power for the future”, *Physics education* **38.2**, 135 (2003).
<https://doi.org/10.1088/0031-9120/38/2/305>.
- [10] M. Keilhacker, *et al*, “High fusion performance from deuterium-tritium plasmas in JET”, *Nuclear Fusion* **39.2**, 209 (1999).
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/39/2/306>.
- [11] H. Abu-Shawareb, *et al*, “Achievement of target gain larger than unity in an inertial fusion experiment”, *Physical Review Letters* **132.6**, 065102 (2024).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.065102>.
- [12] I. Čábelková, *et al*, “The social acceptance of nuclear fusion for decision making towards carbon free circular economy: Evidence from Czech Republic”, *Technological Forecasting and Social Change* **163**, 120477 (2021).

<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120477>.

- [13] European Commission, “Statement on research by commissioner Mariya Gabriel”, *European Commission*, (03-03-2022).
- [14] J. Pethokoukis, “Nuclear fusion: the state of play among the startup firms”, *The American Enterprise Institute*, (2022).
- [15] R. V. V. Petrescu, *et al*, “Some basic reactions in nuclear fusion”, *American Journal of Engineering and Applied Sciences* **10.3**, (2017).
<https://doi.org/10.3844/ajeassp.2017.709.716>.
- [16] F. V. Zubascu, “ITER Project should get political, says Christian Ehler MEP”, *Science Business Publishing Ltd.*, (31-10-2023).
- [17] A. F. Soria, “Física nuclear y de partículas”, 3^a ed. corr. y ampl., *Universidad de Valencia*, 480 (2015). ISBN: 9788437096452.
- [18] D. Moiraf, A. Morace and Yasunobu Arikawa, “The use of Plasma Mirror for Relativistic Electron Generation Relevant to Fast Ignition in Inertial Confinement Fusion”, Diss. PhD thesis, (2020).
- [19] A. F. Soria, “Física nuclear y de partículas”, 3^a ed. corr. y ampl., *Universidad de Valencia*, 472, 479 (2015). ISBN: 9788437096452.
- [20] G. P. Callejo, “Spectroscopic Characterisation of the Effects of Plasma Geometry on the Angular Distribution of X-Ray Emission in HED Plasmas”, PhD thesis, *University of Oxford* (2020).
Obtained with data from the International Atomic Energy Agency (IAEA) Nuclear Data section – ENDF. <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>
- [21] K. S. Krane, “Introductory Nuclear Physics”, 2^a ed., *John Wiley & Sons*, 530-531(1995). ISBN: 047180553X.
- [22] J. D. Lawson, “Some criteria for a power producing thermonuclear reactor”, *Proceedings of the physical society. Section B* **70.1**, 6 (1957).
- [23] G. D. J. Phillies, “Elementary lectures in statistical mechanics”, *New York Springer*, 42 (2000). ISBN: 0387989188.
<https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1264-5>.
- [24] B. Zohuri, “Plasma physics and controlled thermonuclear reactions driven fusion energy”, *Springer International Publishing*, **59**, 68 (2016).
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-47310-9>.

- [25] S. Entler, *et al*, “Estimation of fuel operating ranges of fusion power plants”, *Nuclear Engineering and Technology* **55.7**, 2687-2696 (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.net.2023.04.024>.
- [26] No especificado, “Criteria for the assessment of European fusion research”, *Scientific and Technological Options Assessment (STOA) Fusion Project*, [EU European Parliament Document] **I**, 64 (1988). <http://aei.pitt.edu/id/eprint/38681>
- [27] J. D. Jackson, “Classical Electrodynamics”, 3^a ed., *John Wiley & Sons*, 585-586 (1999). ISBN: 978-0-471-30932-1.
- [28] R. F. Post, “Summary of UCRL pyrotron (mirror machine) program”, *California University, Livermore. Radiation Lab*, 39 (1959).
- [29] C. Huang and L. Li, “Magnetic confinement fusion: a brief review”, *Frontiers in Energy* **12**, 305-313 (2018).
<https://doi.org/10.1007/s11708-018-0539-1>.
- [30] D. Oh, *et al*, “Development of a new magnetic mirror device at the Korea Advanced Institute of Science and Technology”, *Journal of Plasma Physics* **90.2**, 975900202 (2024).
<https://doi.org/10.1017/S0022377824000242>.
- [31] W. Picot, “Fusión por confinamiento magnético con tokamaks y estelators”, *International Atomic Energy Agency*, <https://www.iaea.org/es/energia-de-fusion/fusion-por-confinamiento-magnetico-con-tokamaks-y-estelators> [Última consulta: 20-04-2024].
- [32] J. Ongena, *et al*, “Magnetic-confinement fusión”, *Nature Physics* **12.5**, 398-410 (2016).
<http://dx.doi.org/10.1038/nphys3745>.
- [33] K. Obrejan, “Study of magnetic shaping effects on plasma flows and micro-instabilities in tokamak plasmas using the full-f gyrokinetic code based on a real space field solver”, PhD tesis, *Institut de Recherche sur la Fusion Magnétique* (2017).
- [34] T. S. Pedersen, *et al*, “Confirmation of the topology of the Wendelstein 7-X magnetic field to better than 1: 100,000”, *Nature communications* **7.1**, 13493 (2016).
<https://dx.doi.org/10.1038/ncomms13493>.

- [35] ITER, “External heating systems”, *ITER Organization* (2024), <https://www.iter.org/mach/Heating> [Última consulta: 26-04-2024].
- [36] G. Federici, “Testing needs for the development and qualification of a breeding blanket for DEMO”, *Nuclear Fusion* **63.12**, 125002 (2023).
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ad00cb>.
- [37] S. C. Cowley, “The quest for fusion power”, *Nature physics* **12.5**, 384-386 (2016).
<https://doi.org/10.1038/nphys3719>.
- [38] R. Alba, R. Iglesias and M. Á. Cerdeira, “Materials to be used in future magnetic confinement fusion reactors: a review”, *Materials* **15.19**, 6591 (2022).
<https://doi.org/10.3390/ma15196591>.
- [39] Y. Song, W. Wu, S. Du, *et al*, “Tokamak engineering mechanics”, *Springer Berlin Heidelberg*, 122-124 (2014). ISBN: 978-3-642-39574-1.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-39575-8>.
- [40] P. Rutherford, “The tokamak: 1955–80”, *Nuclear Fusion* **20.9**, 1086 (1980).
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/20/9/007>.
- [41] Jet Team, “Fusion energy production from a deuterium-tritium plasma in the JET tokamak”, *Nuclear Fusion* **32.2**, 187 (1992).
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/32/2/I01>.
- [42] K.M. McGuire, C. Ancher, *et al*, “Review of deuterium-tritium results from the Tokamak Fusion Test Reactor”, *Princeton University* (1995).
- [43] J. Jacquinot, “Deuterium-tritium operation in magnetic confinement experiments: results and underlying physics”, *Plasma physics and controlled fusion*, **41**, A13-A46 (1999).
<https://doi.org/10.1088/0741-3335/41/3A/002>.
- [44] G. McCracken and P. Stott, “Fusion: the energy of the universe”, 2ª edición, *Academic Press*, 69 (2005). ISBN: 0-12-481851-X.
- [45] G. P. Callejo, “Spectroscopic Characterisation of the Effects of Plasma Geometry on the Angular Distribution of X-Ray Emission in HED Plasmas”, PhD thesis, *University of Oxford* (2020).
- [46] R. Betti and O. A. Hurricane, “Inertial-confinement fusion with lasers”, *Nature Physics* **12.5**, 435-448 (2016).
<http://dx.doi.org/10.1038/nphys3736>.

- [47] K. A. Brueckner, “Inertial Confinement Fusion”, *American Institute of Physics*, 47 (1992). ISBN: 0-88318-925-9.
- [48] G. McCracken and P. Stott, “Fusion: the energy of the universe”, 2^a edición, *Academic Press*, 70 (2005). ISBN: 0-12-481851-X.
- [49] S. Atzeni, “Inertial confinement fusion–Physics principles”, *Encyclopedia of nuclear energy*, **3**, 674-685 (2021).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819725-7.00115-X>.
- [50] National Ignition Facility, “NIF Hohlräum”, *Lawrence Livermore National Laboratory*, <https://lasers.llnl.gov/media/photo-gallery?id=nif-1002-05557> [Última consulta: 30-04-2024].
- [51] D. Eimerl, “Science and Technology Review July–August 1999”, *U.S. Department of Energy’s, Lawrence Livermore National Laboratory*, (1999).
<https://doi.org/10.2172/9843>.
- [52] L. Guo, *et al*, “Uranium hohlraum with an ultrathin uranium–nitride coating layer for low hard X-ray emission and high radiation temperature”, *New Journal of Physics* **17.11**, 113004 (2015).
<http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/17/11/113004>.
- [53] B. A. Hammel, *et al*, “Simulations and experiments of the growth of the “tent” perturbation in NIF ignition implosions”, *Journal of Physics: Conference Series* **717.1**, (2016).
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/717/1/012021>.
- [54] G. N. Hall, *et al*, “The relationship between gas fill density and hohlraum drive performance at the National Ignition Facility”, *Phys. Plasmas*, **24.5**, 052706 (1-05-2017).
<https://doi.org/10.1063/1.4983142>.
- [55] L. T. Hudson, *et al*, “X-ray spectroscopy at next-generation inertial confinement fusion sources: Anticipating needs and challenges”, *Radiation Physics and Chemistry* **75.11**, 1784-1798 (2006).
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2005.12.050>.
- [56] J. Lindl, “Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain”, *Physics of plasmas* **2.11**, 3961-3962 (1995).

<https://doi.org/10.1063/1.871025>.

- [57] T. H. Johnson, “Inertial confinement fusion: Review and perspective”, *Proceedings of the IEEE* **72.5**, 548-594 (1984).
<https://doi.org/10.1109/PROC.1984.12897>.
- [58] J. D. Lindl, “ICF: recent achievements and perspectives”, *Il Nuovo Cimento A (1965-1970)* **106**, 1467-1487 (1993).
<https://doi.org/10.1007/BF02821241>.
- [59] J. M. Di Nicola, “The NIF Laser System: Groundbreaking Capabilities in Support of Stockpile Stewardship, Discovery Science, and National Security”, No. LLNL-CONF-863910, *Lawrence Livermore National Laboratory*, (2024).
- [60] V. T. Tikhonchuk, “Progress and opportunities for inertial fusion energy in Europe”, *Philosophical Transactions of the Royal Society A* **378**.2184, 20200013 (2020).
<https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0013>.
- [61] J. Badziak, S. Jabłoński and J. Wołowski, “Progress and prospect of fast ignition of ICF targets”, *Plasma Physics and Controlled Fusion* **49.12B**, B651 (2007).
<http://dx.doi.org/10.1088/0741-3335/49/12B/S60>.
- [62] S. Atzeni, *et al*, “Shock ignition of thermonuclear fuel: principles and modelling”, *Nuclear fusion* **54.5**, 054008 (2014).
<http://dx.doi.org/10.1088/0029-5515/54/5/054008>.
- [63] G. A. Wurden, *et al*, “Magneto-inertial fusion”, *Journal of Fusion Energy* **35**, 69-77 (2016).
<https://doi.org/10.1007/s10894-015-0038-x>.
- [64] J. P. Chittenden, “The Z-pinch: approach to fusion”, *Physics world* **13.5**, 39 (2000).
<https://doi.org/10.1088/2058-7058/13/5/31>.
- [65] E. Greenspan, “Fusion-fission hybrid reactors”, *Advances in Nuclear Science and Technology* **16**, 289-290 (1984).
- [66] F. H. Tenney, “A Brief Review of the Fusion-Fission Hybrid Reactor”, *Proc. 2nd Topical Meeting on the Tech. of Controlled Nucl. Fusion*, CONF-760935-P2, 641-644 (1976).

- [67] Centro Superior de Estudios de la Defensa Nacional, “La tercera revolución energética y su repercusión en la seguridad y defensa”, *Ministerio de Defensa*, 48-56 (2010).
- [68] R. W. Moir and W. Manheimer, “Fusion–Fission Hybrid Reactors”, *Magnetic Fusion Technology*, 703 (2014). ISBN: 978-1-4471-5556-0.
https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5556-0_14.
- [69] J. P. Freidberg and A. C. Kadak, “Fusion–fission hybrids revisited”, *Nature Physics* **5.6**, 370-372 (2009).
<https://doi.org/10.1038/nphys1288>.
- [70] R. W. Moir and W. Manheimer, “Fusion–Fission Hybrid Reactors”, *Magnetic Fusion Technology*, 701, 733-734 (2014). ISBN: 978-1-4471-5556-0.
https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5556-0_14.
- [71] Y. Gohar, “Fusion solution to dispose of spent nuclear fuel, transuranic elements, and highly enriched uranium”, *Fusion Engineering and Design* **58**, 1097-1101 (2001).
[https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(01\)00558-0](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(01)00558-0).
- [72] K. M. Feng and J. H. Huang, “Transmutation of the actinide neptunium-237 with a hybrid reactor”, *Fusion engineering and design* **29**, 64-68 (1995).
[https://doi.org/10.1016/0920-3796\(95\)80007-K](https://doi.org/10.1016/0920-3796(95)80007-K).
- [73] M. Piera, *et al*, “Hybrid reactors: Nuclear breeding or energy production?”, *Energy Conversion and Management* **51.9**, 1758-1763 (2010).
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.025>.
- [74] L. M. Lidsky, “Fission-fusion systems: hybrid, symbiotic and augean”, *Nuclear Fusion* **15.1**, 151 (1975).
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/15/1/016>.
- [75] Oxford English Dictionary, “Augean”, *Oxford University Press*,
<https://www.oed.com/search/advanced/Meanings?textTermText0=augean&textTermOpt0=WordPhrase> [Última consulta: 11-05-2024].
- [76] K. R. Schultz, “Gas-cooled fusion-fission hybrid reactor systems”, *Journal of Fusion Energy* **1**, 163-183 (1981).
<https://doi.org/10.1007/BF01050660>.

- [77] R. W. Moir, “The fusion-fission fuel factory”, *Fusion* **1**, 417-418 (2012). ISBN: 0323146619, 9780323146616.
- [78] R. W. Moir and W. Manheimer, “Fusion–Fission Hybrid Reactors”, *Magnetic Fusion Technology*, 704, 720-721, 726, 731-732 (2014). ISBN: 978-1-4471-5556-0. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5556-0_14.
- [79] W. C. Wolkenhauer, *et al*, “Conceptual design of a fusion-fission hybrid reactor based on a mirror fusion reactor with a subcritical gas cooled fission blanket”, *Pacific Northwest Laboratories, Lawrence Livermore National Laboratory*, (1974).
- [80] D. J. Bender, *et al*, “Reference design for the standard mirror hybrid reactor”, *Lawrence Livermore National Laboratory, General Atomic Co.*, (1978).
- [81] R. W. Moir, “Tandem mirror hybrid reactor design study final report”, *Lawrence Livermore National Laboratory*, (1980).
- [82] J. L. Kelly, “Preliminary conceptual design of a Demonstration Tokamak Hybrid Reactor (DTHR). Status report, January 1978--March 1978”, *Westinghouse Electric Corporation*, (1978). <https://doi.org/10.2172/6874857>.
- [83] R. P. Rose, “Design study of a fusion-driven tokamak hybrid reactor for fissile fuel production. Final report.”, *Westinghouse Electric Corporation*, (1979). <https://doi.org/10.2172/5872623>.
- [84] E. Gerstner, “Nuclear energy: The hybrid returns”, *Nature* **460**, 25–28 (2009). <https://doi.org/10.1038/460025a>.
- [85] R. W. Moir and W. Manheimer, “Fusion–Fission Hybrid Reactors”, *Magnetic Fusion Technology*, 707-708 (2014). ISBN: 978-1-4471-5556-0. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5556-0_14.
- [86] D. Kramer, “Livermore ends LIFE”, *Physics Today*, **67.4**, 26–27 (1-04-2014). <https://doi.org/10.1063/PT.3.2344>.
- [87] S. V. Bedenko, *et al*, “Fusion-fission hybrid reactor with a plasma source of deuterium-tritium neutrons in a linear configuration”, *Progress in Nuclear Energy* **154**, 104477 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104477>.
- [88] S. V. Bedenko, *et al*, “Fusion-fission hybrid reactor facility: power profiling”, *Nuclear Energy and Technology* **9.1**, 65-70 (2023).

<https://doi.org/10.3897/nucet.9.102781>.

- [89] C. E. Velasquez, *et al*, “Fusion–fission hybrid systems for transmutation”, *Journal of Fusion Energy* **35**, 505-512 (2016).
<https://doi.org/10.1007/s10894-016-0080-3>.
- [90] C. Ham, *et al*, “Filamentary plasma eruptions and their control on the route to fusion energy”, *Nature Reviews Physics* **2.3**, 159-167 (2020).
<https://doi.org/10.1038/s42254-019-0144-1>.
- [91] M. Maraschek, “Control of neoclassical tearing modes”, *Nuclear Fusion* **52.7**, 074007 (2012).
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/52/7/074007>.
- [92] G. De Tommasi, “Plasma Magnetic Control in Tokamak Devices”, *Journal of Fusion Energy* **38**, 406–436 (2019).
<https://doi.org/10.1007/s10894-018-0162-5>.
- [93] J. Kates-Harbeck, A. Svyatkovskiy and W. Tang, “Predicting disruptive instabilities in controlled fusion plasmas through deep learning”, *Nature* **568.7753**: 526-531 (2019).
<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1116-4>.
- [94] J. Degrave, *et al*, “Magnetic control of tokamak plasmas through deep reinforcement learning”, *Nature* **602.7897**, 414-419 (2022).
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-04301-9>.
- [95] Y. Morishita, *et al*, “First application of data assimilation-based control to fusion plasma”, *Scientific Reports* **14.1**, 137 (2024).
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-49432-3>.
- [96] V. P. Smirnov, “Tokamak foundation in USSR/Russia 1950–1990”, *Nuclear fusion* **50.1**, 014003 (2009).
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/50/1/014003>.
- [97] Z. Wang, “Current status of research on magnetic confinement fusion and superconducting tokamak devices”, *Procedia Computer Science* **228**, 163-170 (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.11.020>.
- [98] ITER, “The ITER Tokamak/Magnets”, *ITER Organization* (2024),
<https://www.iter.org/mach/Magnets> [Última consulta: 21-05-2024].

- [99] J. Haack, “Superconductivity for Nuclear Fusion: Past, Present, and Future”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, (2024).
<https://doi.org/10.1007/s13369-024-08720-4>.
- [100] A. J. Creely, *et al*, “Overview of the SPARC tokamak”, *Journal of Plasma Physics* **86.5**, 865860502 (2020).
<https://doi.org/10.1017/S0022377820001257>.
- [101] N. Mitchell, *et al*, “Superconductors for fusion: a roadmap”, *Superconductor science and technology* **34.10**, 103001 (2021).
<https://doi.org/10.1088/1361-6668/ac0992>.
- [102] X. F. Pan, *et al*, “Manufacture, electromagnetic properties and microstructure of an 18-filament jelly-roll Nb3Al superconducting wire with rapid heating and quenching heat-treatment”, *Superconductor Science and Technology* **29.1**, 015008 (2015).
<https://doi.org/10.1088/0953-2048/29/1/015008>.
- [103] ITER, “Tritium breeding”, *ITER Organization* (2024),
<https://www.iter.org/mach/tritiumbreeding> [Última consulta: 22-05-2024].
- [104] B. Garcinuño, *et al*, “The CIEMAT LiPb loop permeation experiment”, *Fusion Engineering and Design* **146**, 1228-1232 (2019).
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.02.045>.
- [105] F. L. Tabarés, *et al*, “Experimental tests of LiSn alloys as potential liquid metal for the divertor target in a fusion reactor”, *Nuclear Materials and Energy* **12**, 1368-1373 (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.11.026>.
- [106] C. R. Weber, *et al*, “Mixing in ICF implosions on the National Ignition Facility caused by the fill-tube”, *Physics of Plasmas* **27.3** (2020).
<https://doi.org/10.1063/1.5125599>.
- [107] C. R. Weber, *et al*, “Improving ICF implosion performance with alternative capsule supports”, *Physics of Plasmas* **24.5** (2017).
<https://doi.org/10.1063/1.4977536>.
- [108] M. Vandenboomgaerde, *et al*, “Prolate-spheroid (“rugby-shaped”) hohlraum for inertial confinement fusion”, *Physical Review Letters* **99.6**, 065004 (2007).
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.065004>.

- [109] L. Jing, *et al*, “Preliminary study on a tetrahedral hohlraum with four half-cylindrical cavities for indirectly driven inertial confinement fusion”, *Nuclear Fusion* **57.4**, 046020 (2017).
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa5b43>.
- [110] L. Kuang, *et al*, “A novel three-axis cylindrical hohlraum designed for inertial confinement fusion ignition”, *Scientific Reports* **6.1**, 34636 (2016).
<https://doi.org/10.1038/srep34636>.
- [111] H. F. Robey, *et al*, “The I-Raum: A new shaped hohlraum for improved inner beam propagation in indirectly-driven ICF implosions on the National Ignition Facility”, *Physics of Plasmas* **25.1**, (2018).
<https://doi.org/10.1063/1.5010922>.
- [112] P. Amendt, *et al*, “Ultra-high (> 30%) coupling efficiency designs for demonstrating central hot-spot ignition on the National Ignition Facility using a Frustrum”, *Physics of Plasmas* **26.8**, (2019).
<https://doi.org/10.1063/1.5099934>.
- [113] National Ignition Facility, “Scientists Encouraged by Initial Frustrum experiments at NIF”, *Lawrence Livermore National Laboratory* (2020),
<https://lasers.llnl.gov/news/scientists-encouraged-by-initial-frustrum-experiments-at-nif> [Última consulta: 25-05-2024].
- [114] K. Lan, “Dream fusion in octahedral spherical hohlraum”, *Matter and Radiation at Extremes* **7.5**, (2022).
<https://doi.org/10.1063/5.0103362>.
- [115] A. S. Moore, *et al*, “Experimental demonstration of the reduced expansion of a laser-heated surface using a low density foam layer, pertaining to advanced hohlraum designs with less wall-motion”, *Physics of Plasmas* **27.8**, (2020).
<https://doi.org/10.1063/5.0009857>.
- [116] B. Evangelista, “Frustrum Hohlraum Design is Shaping Up”, *Lawrence Livermore National Laboratory* (2019), <https://lasers.llnl.gov/news/frustrum-hohlraum-design-is-shaping-up> [Última consulta: 25-05-2024].
- [117] J. Thomas, “Computing Codes, Simulations Helped Make Ignition Possible”, *Lawrence Livermore National Laboratory* (2023),

<https://lasers.llnl.gov/news/computing-codes-simulations-helped-make-ignition-possible> [Última consulta: 26-05-2024].

- [118] K. D. Humbird, *et al*, “Cognitive simulation models for inertial confinement fusion: Combining simulation and experimental data”, *Physics of Plasmas* **28.4** (2021).
<https://doi.org/10.1063/5.0041907>.
- [119] J. B. Nakhleh, *et al*, “Exploring sensitivity of ICF outputs to design parameters in experiments using machine learning”, *IEEE Transactions on Plasma Science* **49.7**, 2238-2246 (2021).
<https://doi.org/10.1109/TPS.2021.3090299>.
- [120] A. Pizzuto and F. P. Orsitto, “FUNFI2. 2nd International Conference on Fusion-Fission Sub-Critical Systems for Waste Management and Safety”, *Centro Ricerche ENEA di Frascati*, (2016). ISBN: 978-88-8286-357-9.
- [121] M. Barbarino and S. M. González de Vicente, “Conceptual Development of Steady State Compact Fusion Neutron Sources. Report of a Coordinated Research Project”, *International Atomic Energy Agency*, IAEA-TECDOC-1875 (2019). ISBN: 978-92-0-103519-6.
- [122] V. E. Moiseenko, *et al*, “Stellarator–mirror fusion–fission hybrid—a fast route to clean and safe nuclear energy”, *Journal of Plasma Physics* **89.4**, 955890401 (2023).
<https://doi.org/10.1017/S0022377823000442>.
- [123] R. V. A. Marques, C. E. Velasquez and C. Pereira, “Neutronic evaluation for different external neutron sources in a Small-Subcritical fast reactor”, *Nuclear Engineering and Design* **417**, 112868 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112868>.
- [124] B. Levitt, *et al*, “The Zap Energy approach to commercial fusión”, *Physics of Plasmas* **30.9**, (2023).
<https://doi.org/10.1063/5.0163361>.
- [125] A. B. Sefkow, B. G. Logan and M. Tabak, “Directly driven magnetized fast-ignition targets with steep density gradients for inertial fusion energy”, *Physics of Plasmas* **31.5**, (2024).
<https://doi.org/10.1063/5.0197817>.

- [126] S. V. Ryzhkov, “Magneto-Inertial Fusion and Powerful Plasma Installations (A Review)”, *Applied Sciences* **13.11**, 6658 (2023).
<https://doi.org/10.3390/app13116658>.
- [127] D. Kramer, “ITER appears unstoppable despite recent setbacks”, *Physics Today* **76.8**, 18-22 (2023).
<https://doi.org/10.1063/PT.3.5287>.
- [128] R. Stone, “Science ties to Russia cut after Ukraine invasion”, *Science* **375**.6585, 1074-1076 (2022).
- [129] M. Mohamed, *et al*, “Global Development and Readiness of Nuclear Fusion Technology as the Alternative Source for Clean Energy Supply”, *Sustainability* **16.10**, 4089 (2024).
<https://doi.org/10.3390/su16104089>.
- [130] S. C. Hsu, “US fusion energy development via public-private partnership”, *Journal of Fusion Energy* **42.1**, 12 (2023).
<https://doi.org/10.1007/s10894-023-00357-9>.
- [131] S. E. Wurzel and S. C. Hsu, “Progress toward fusion energy breakeven and gain as measured against the Lawson criterion”, *Physics of Plasmas* **29.6**, (2022).
<https://doi.org/10.1063/5.0083990>.
- [132] ITER, “After ITER”, ITER Organization (2024),
<https://www.iter.org/sci/iterandbeyond> [Última consulta: 10-06-2024].
- [133] B. V. Kuteev, and P. R. Goncharov, “Fusion–fission hybrid systems: yesterday, today, and tomorrow”, *Fusion Science and Technology* **76.7**, 836-847 (2020).
<https://doi.org/10.1080/15361055.2020.1817701>.
- [134] S. Takeda, A. R. Keeley and S. Managi, “How Many Years Away is Fusion Energy? A Review”, *Journal of Fusion Energy* **42.1**, 16 (2023).
<https://doi.org/10.1007/s10894-023-00361-z>.
- [135] M. Morcillo, “El futuro de la energía nuclear y su papel en la transición energética”, *Técnica Industrial*, 0040-1838 (2022).
- [136] D. Alegre, *et al*, “Design and testing of advanced liquid metal targets for DEMO divertor: the OLMAT Project”, *Journal of Fusion Energy* **39**, 411-420 (2020).
<https://doi.org/10.1007/s10894-020-00254-5>.

- [137] IAEA, “Board of Governors”, *International Atomic Energy Agency* (2024), <https://www.iaea.org/about/governance/board-of-governors#:~:text=The%2035%20Board%20Members%20for,%2C%20Russian%20Federation%2C%20Saudi%20Arabia%2C> [Última consulta 12-06-2024].
- [138] EUROfusion, “Laboratorio Nacional de Fusión – CIEMAT (LNF - CIEMAT)”, *EUROfusion* (2024), <https://eurofusion.org/eurofusion/members/spain/> [Última consulta: 12-06-2024].
- [139] Fusion for Energy, “Our mission & values”, *Fusion for Energy* (2024), <https://fusionforenergy.europa.eu/our-mission-values/> [Última consulta: 12-06-2024].
- [140] Y. Qiu, *et al*, “Overview of recent advancements in IFMIF-DONES neutronics activities”, *Fusion Engineering and Design* **201**, 114242 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2024.114242>.
- [141] Fusion for Energy, “DONES programme collaboration takes shape”, *Fusion for Energy* (2024), <https://fusionforenergy.europa.eu/news/dones-programme-collaboration-takes-shape/> [Última consulta: 12-06-2024].
- [142] D. Bernardi, *et al*, “The IFMIF-DONES project: design status and main achievements within the EUROfusion FP8 work programme”, *Journal of Fusion Energy* **41.2**, 24 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10894-022-00337-5>.
- [143] W. Królas, *et al*, “The IFMIF-DONES fusion oriented neutron source: evolution of the design”, *Nuclear Fusion* **61.12**, 125002 (2021). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac318f>.
- [144] N. P. Christy and V. Tammisetti, “Potential of Nuclear Fusion Energy Source for a sustainable future”, (2021).
- [145] T. P. Davis, “The Need for Codes and Standards in Nuclear Fusion Energy”, *Journal of Fusion Energy* **42.1**, 13 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10894-023-00350-2>.
- [146] J. Elbez-Uzan, *et al*, “Recommendations for the future regulation of fusion power plants”, *Nuclear Fusion* **64.3**, 037001 (2024). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ad13ad>.

- [147] T. Griffiths, *et al*, “The commercialisation of fusion for the energy market: a review of socio-economic studies”, *Progress in Energy* **4.4**, 042008 (2022).
<https://doi.org/10.1088/2516-1083/ac84bf>.
- [148] T. E. G. Nicholas, *et al*, “Re-examining the role of nuclear fusion in a renewables-based energy mix”, *Energy Policy* **149**, 112043 (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112043>.