

Trabajo de fin de grado

Fusión y fisión nuclear: Perspectivas energéticas y tecnológicas

Autor:

Javier Hermoso Font

Tutor:

Alejandro Calabuig Barroso

Universidad:

Universidad Europea de Valencia

Facultad de Ciencias

2025-05-17

Resumen

La energía nuclear ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo de la civilización moderna, proporcionando una fuente de energía eficiente y con bajas emisiones de carbono. Este estudio explora la historia de la energía nuclear, analizando los principios de la fisión y la fusión nuclear y sus aplicaciones en el sector energético. Se revisan las tecnologías existentes de reactores de fisión, como los PWR, BWR y SMR, así como los proyectos de fusión en desarrollo, incluyendo el ITER. Se realiza un análisis comparativo de ambas tecnologías para evaluar su viabilidad y potencial a largo plazo. Se abordan aspectos clave como la gestión de residuos nucleares, la seguridad, la percepción pública y las preocupaciones éticas y geopolíticas, incluyendo la proliferación nuclear. Los hallazgos indican que, aunque la fisión sigue siendo la opción más viable a corto plazo, la fusión representa una alternativa prometedora a largo plazo, aunque con importantes desafíos tecnológicos. Esta investigación sienta las bases para un futuro trabajo de final de máster enfocado en el desarrollo de un plan energético nuclear para España, incluyendo tanto aplicaciones civiles como militares.

Abstract

Nuclear energy has played a fundamental role in the development of modern civilization, providing an efficient and low-carbon energy source. This study explores the history of nuclear energy, analyzing the principles of nuclear fission and fusion and their applications in the energy sector. It reviews existing fission reactor technologies, including PWR, BWR, and SMRs, as well as ongoing fusion projects such as ITER. A comparative analysis of both technologies is conducted to assess their viability and long-term potential. Key aspects such as nuclear waste management, safety, public perception, and ethical and geopolitical concerns, including nuclear proliferation, are addressed. The findings indicate that while fission remains the most viable short-term option, fusion presents a promising long-term alternative despite significant technological challenges. This research serves as a foundation for a future master's thesis focusing on the development of a comprehensive nuclear energy plan for Spain, including both civilian and military applications.

Índice general

Índice general	3
1. Introducción	7
1.1. Introducción histórica y evolución de la energía nuclear	8
1.2. Crisis, accidentes y reevaluación contemporánea	8
1.3. Estrategias y escenarios en el desarrollo nuclear global	9
2. Objetivos	11
3. Metodología	12
4. Marco teórico	14
4.1. Conceptos básicos	14
4.1.1. Estructura del átomo y el núcleo	14
4.1.2. Fuerzas fundamentales y energía de ligadura	14
4.1.3. Radiactividad y tipos de decaimiento nuclear	15
4.2. Procesos de fisión nuclear	16
4.2.1. Fundamentos físicos de la fisión nuclear	16
4.2.2. Aplicaciones de la fisión nuclear	20
4.2.3. Ventajas y desafíos de la fisión	21
4.3. Procesos de fusión nuclear	22
4.3.1. Fundamentos de la fusión nuclear	22
4.3.2. Reacciones de fusión y su energía	23
4.3.3. Ventajas y desafíos de la fusión	25

4.4.	Tipos de reactores nucleares	27
4.4.1.	Funcionamiento general de los reactores de fisión	27
4.4.2.	Evolución tecnológica: nuevos diseños de reactores	28
4.4.3.	La fusión nuclear: reactores del futuro	29
5.	Resultados	30
5.1.	Comparación entre fisión y fusión nuclear	30
5.1.1.	Eficiencia energética	30
5.1.2.	Costos	31
5.1.3.	Impactos medioambientales	32
5.1.4.	Viabilidad a largo plazo	34
5.2.	Investigación y desarrollo de la fusión nuclear	36
5.2.1.	Enfoques y tecnologías de fusión nuclear	36
5.2.2.	ITER (Reactor Termonuclear Experimental Internacional)	37
5.2.3.	NIF (National Ignition Facility, EE. UU.)	38
5.2.4.	Proyecto IFMIF-DONES en Granada	40
6.	Discusión	41
6.1.	Panorama geopolítico y estrategias nacionales en energía nuclear	41
6.2.	Implicaciones éticas y sociales de la energía nuclear	43
6.2.1.	Seguridad y gestión de residuos	43
6.2.2.	Percepción pública y aceptación social	43
6.2.3.	Proliferación nuclear y riesgos globales	44
6.3.	Discusión de oportunidades y desafíos reales de la fisión y fusión nuclear	44
7.	Conclusión	48
	Referencias	51
8.	Apéndices	59
8.1.	Apéndice A - Desarrollo matemático	59
8.1.1.	Principios fundamentales fisión nuclear	59

8.1.2.	¿Por qué se produce la fisión nuclear?	59
8.1.3.	Barrera de Coulomb e inhibición	60
8.1.4.	Fisión espontánea e inducida	60
8.1.5.	Energía de activación y deformación nuclear	61
8.1.6.	Modelo de gota líquida y efectos de capas nucleares	61
8.1.7.	Mecanismo de fisión	62
8.1.8.	Energía en la fisión	64
8.1.9.	Reacción en cadena y factor de reproducción	65
8.1.10.	Principios fundamentales fusión nuclear	68
8.1.11.	Reacciones de fusión nuclear	69
8.1.12.	Características de la fusión	70
8.1.13.	La fusión en el Sol: un reactor natural perfecto	72
8.2.	Apéndice B - Proyectos internacionales de fusión	74
8.2.1.	Enfoques y tecnologías de fusión nuclear	74
8.2.2.	ITER (Reactor Termonuclear Experimental Internacional)	74
8.2.3.	NIF (National Ignition Facility, EE. UU.)	76
8.2.4.	Tokamak SMART de la Universidad de Sevilla	78
8.2.5.	Reactor Tokamak Superconductor Avanzado Experimental (EAST) de China	79
8.2.6.	Proyecto FAST en Japón	79
8.2.7.	Avances en el Joint European Torus (JET)	80
8.2.8.	Proyecto IFMIF-DONES en Granada	81
8.2.9.	DEMO: Reactor de demostración de fusión nuclear	81
8.3.	Apéndice C - Detalle de tipos de reactores	85
8.3.1.	Reactores de fisión tradicionales (PWR, BWR, etc.)	85
8.3.2.	Reactor de Cofrentes BWR	93
8.3.3.	Reactores avanzados y modulares pequeños (SMR)	97
8.3.4.	Reactores modulares pequeños (SMR)	97
8.3.5.	Reactores rápidos enfriados por sodio	97

8.3.6.	Reactores de sales fundidas	98
8.3.7.	Reactores de alta temperatura (HTR)	98
8.3.8.	Prototipos de reactores de fusión	99
8.3.9.	Avances en tecnologías de fusión controlada	101
8.4.	Apéndice D - Cronología nuclear	103
8.4.1.	El panorama nuclear en las últimas cinco décadas: desarrollo, innovación y políticas	103
8.4.2.	Introducción	103
8.4.3.	Países que han apostado por la energía nuclear	103
8.4.4.	Países que han abandonado o rechazado la energía nuclear	105
8.4.5.	Investigación técnica en fisión y fusión	106
8.4.6.	Factores económicos y políticos en la energía nuclear	108

1. Introducción

La energía nuclear ha sido una de las fuentes energéticas más relevantes del siglo XX, con aplicaciones tanto civiles como militares. Desde el descubrimiento de la radiactividad por Henri Becquerel en 1896 hasta la primera central nuclear comercial en 1950, esta tecnología ha evolucionado significativamente. La fisión nuclear ha permitido la generación de electricidad a gran escala, pero sus riesgos asociados, como la gestión de residuos y los accidentes de Chernóbil (1986) y Fukushima (2011), han generado debate sobre su seguridad y viabilidad a largo plazo.

Sin embargo, en un contexto de cambio climático y necesidad de reducir las emisiones de CO₂, la energía nuclear ha resurgido como una opción estratégica. Mientras que la fisión sigue siendo la única alternativa comercialmente viable, los avances en reactores modulares pequeños (SMR) buscan optimizar su seguridad y eficiencia. Por otro lado, la fusión nuclear representa una posible solución energética limpia y segura, aunque sus desafíos tecnológicos han impedido su implementación práctica hasta ahora.

Este trabajo analiza en profundidad los principios físicos de la fisión y la fusión nuclear, evaluando sus ventajas, desafíos y aplicaciones. A través de un enfoque comparativo, se examinarán las perspectivas de ambas tecnologías y su papel en el futuro energético global. ¿Es la fusión el futuro de la energía, o la fisión seguirá siendo la opción predominante en el siglo XXI? La respuesta a esta pregunta será clave en la configuración de la matriz energética de las próximas décadas.

1.1. Introducción histórica y evolución de la energía nuclear

A finales del siglo XIX y principios del XX, descubrimientos clave sobre la radiactividad y la estructura atómica sentaron las bases de la física nuclear. En 1896, Becquerel descubrió la radiactividad en el uranio, seguido por los trabajos de los Curie con el polonio y el radio. En 1911, Rutherford propuso el modelo nuclear del átomo, explicando la radiactividad como una propiedad estructural.

En 1938, Hahn y Strassmann descubrieron la fisión nuclear, explicada por Meitner y Frisch mediante la ecuación $E = mc^2$, lo que reveló el potencial energético del proceso. La liberación de neutrones permitió reacciones en cadena, base de reactores y armas nucleares, impulsando investigaciones lideradas por Fermi y Bohr.

Durante la Segunda Guerra Mundial, el Proyecto Manhattan desarrolló las primeras armas nucleares, culminando en las bombas de Hiroshima y Nagasaki (1945). Finalizado el conflicto, comenzó la Era Atómica, orientada al uso pacífico de la energía nuclear, con hitos como Calder Hall (1956), primer reactor comercial.

La fisión se consolidó como fuente energética de alta densidad, impulsada por la crisis del petróleo de los años 70 y la necesidad de independencia energética. Países como Francia, EE. UU. o Japón lideraron la construcción de reactores (PWR, BWR), y se exploraron nuevas tecnologías como los reactores rápidos.

No obstante, crecieron las preocupaciones por residuos, seguridad y proliferación. Accidentes como Three Mile Island (1979) evidenciaron los riesgos, aunque la expansión continuó, especialmente en países en desarrollo con apoyo del OIEA. A finales del siglo XX, el crecimiento se estancó por problemas financieros, sociales y éticos.

1.2. Crisis, accidentes y reevaluación contemporánea

Los accidentes de *Chernóbil* (1986) y *Fukushima* (2011) marcaron un giro decisivo. Chernóbil, causado por errores humanos y de diseño, y Fukushima, por un desastre na-

tural, subrayaron la vulnerabilidad de los reactores y motivaron reformas globales en seguridad y diseño.

Estos eventos impulsaron el abandono progresivo de la energía nuclear en algunos países y el auge de las energías renovables. No obstante, su papel fue reevaluado ante la urgencia climática por su capacidad de generar energía continua sin emisiones de CO₂.

El desarrollo de tecnologías como los Reactores Modulares Pequeños (SMR) y los reactores rápidos ha renovado el interés, gracias a su mayor seguridad, eficiencia y menor generación de residuos. Paralelamente, la investigación en fusión nuclear, con proyectos como el *ITER*, promete energía limpia, segura e ilimitada.

La energía nuclear, antes símbolo de riesgo, emerge ahora como aliada estratégica en la transición energética hacia un modelo sostenible y resiliente, aunque sigue enfrentando desafíos financieros, regulatorios y de aceptación pública.

1.3. Estrategias y escenarios en el desarrollo nuclear global

A lo largo de las últimas cinco décadas, la energía nuclear ha mostrado una evolución desigual según el país y el contexto histórico. Esta síntesis recoge los principales aspectos estratégicos, geopolíticos y políticos que han condicionado la expansión, estancamiento o abandono de esta fuente de energía en diferentes regiones del mundo.

Tras la crisis del petróleo de 1973, países como Francia, Japón o Estados Unidos impulsaron programas nucleares con el objetivo de garantizar la seguridad energética. Francia logró un modelo exitoso basado en una planificación centralizada y estatal, alcanzando una elevada autosuficiencia eléctrica. En contraste, Alemania decidió cerrar todos sus reactores en 2023, tras una progresiva retirada motivada por el accidente de Fukushima, el rechazo social y un enfoque político enfocado en las renovables. Italia y Austria también renunciaron de forma definitiva a la energía nuclear por decisión popular. Sin embargo, estas decisiones han implicado mayores emisiones temporales y dependencia energética exterior.

En Asia, China lidera actualmente la expansión nuclear tanto en número de reactores como en desarrollo tecnológico, integrando la energía nuclear como un instrumento de política industrial y diplomacia energética. Corea del Sur, por su parte, ha evolucionado hacia un modelo exportador, mientras India sigue apostando por tecnologías nacionales y por el ciclo del torio. Rusia ha mantenido una línea continuista, incluyendo proyectos internacionales como Akkuyu (Turquía), mediante esquemas llave en mano.

En paralelo, los países que han liderado la fisión también encabezan la investigación en fusión nuclear. Proyectos como ITER, NIF o los tokamaks asiáticos reflejan un consenso global sobre la importancia estratégica de esta fuente futura, que se percibe como más segura, limpia y políticamente aceptable que la fisión.

Desde un punto de vista económico, la energía nuclear se enfrenta al reto de unos costes iniciales elevados y largos plazos de construcción, lo que ha impulsado nuevos modelos de financiación público-privados, contratos garantizados y esquemas estatales. Además, el desarrollo de tecnologías como los reactores modulares pequeños (SMR) y los de Generación IV busca reducir costes, aumentar la flexibilidad y mejorar la sostenibilidad del ciclo del combustible.

En el plano internacional, organismos como la IAEA, el IPCC o la IEA han reconocido el papel clave que puede desempeñar la energía nuclear para lograr los objetivos de descarbonización. Países de distintos bloques han firmado compromisos para triplicar su capacidad hacia 2050, en reconocimiento a su potencial como fuente firme y baja en carbono.

En suma, la energía nuclear no presenta una trayectoria homogénea: algunos países la han adoptado como pilar estratégico, otros la han abandonado por presión social, mientras que muchos mantienen una posición intermedia. La fusión, en cambio, ha logrado una percepción más favorable a nivel político y social. Si la evolución tecnológica continúa y se mantienen las inversiones, el futuro energético podría incluir un modelo complementario donde fisión y fusión coexistan, adaptadas a las necesidades específicas de cada región.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es analizar el desarrollo y el impacto de la energía nuclear en el sector energético, explorando los principios fundamentales de la fisión y la fusión nuclear, así como sus aplicaciones actuales y futuras. Se examinan las tecnologías de reactores de fisión en operación, incluyendo PWR, BWR y SMR, junto con los avances en proyectos de fusión como el ITER. A través de un análisis comparativo, se evalúa la viabilidad, los desafíos y el potencial a largo plazo de ambas tecnologías. Además, se abordan cuestiones clave como la gestión de residuos, la seguridad, la percepción pública y las implicaciones éticas y geopolíticas, incluyendo la proliferación nuclear. Este estudio proporciona una base para futuras investigaciones orientadas al diseño de un plan energético nuclear para España, considerando tanto su aplicación civil como militar.

3. Metodología

Para la elaboración de este trabajo se ha seguido una metodología basada en la consulta, análisis y síntesis crítica de fuentes múltiples, combinando materiales académicos, técnicos y divulgativos con el conocimiento previo del autor adquirido durante su formación universitaria en física, con especial atención a la energía nuclear.

En la parte más teórica del estudio, centrada en los fundamentos físicos de la fisión y la fusión nuclear, se ha recurrido principalmente a manuales especializados y literatura científica de referencia. Estos textos han proporcionado el marco conceptual necesario para comprender los mecanismos subatómicos, las reacciones nucleares y los principios termodinámicos implicados en ambos procesos. Esta sección se ha desarrollado desde un enfoque riguroso, respaldado por los conocimientos adquiridos durante el grado, lo que ha permitido interpretar críticamente los contenidos y presentarlos con claridad, sin renunciar al rigor científico.

En contraste, el análisis de proyectos tecnológicos concretos, así como la evaluación del panorama energético internacional y de las políticas nucleares de los distintos países, ha requerido el uso de fuentes más diversas. Para ello, se han consultado documentos oficiales de organismos como la Agencia Internacional de la Energía Atómica (IAEA), el Organismo Internacional de Energía (IEA), el IPCC o la OCDE, junto con informes técnicos, declaraciones institucionales y publicaciones de centros de investigación. Asimismo, se ha recurrido a fuentes periodísticas y divulgativas especializadas para recoger datos de actualidad, declaraciones políticas y hechos relevantes en torno a la evolución reciente de la energía nuclear.

La selección y tratamiento de estas fuentes ha buscado equilibrar la precisión técnica con la comprensión global del contexto energético y geopolítico. En este sentido, la

experiencia personal del autor en el seguimiento y estudio de los desarrollos nucleares internacionales ha servido como herramienta adicional para contrastar, matizar e interpretar la información recopilada.

En suma, este trabajo combina una aproximación teórico-científica rigurosa con un análisis informado del contexto sociotécnico actual de la energía nuclear, integrando diversas escalas —desde la física fundamental hasta las políticas energéticas globales— para ofrecer una visión transversal y fundamentada del papel que la fisión y la fusión pueden desempeñar en el futuro energético del planeta.

4. Marco teórico

4.1. Conceptos básicos

4.1.1. Estructura del átomo y el núcleo

La física nuclear se fundamenta en la comprensión del átomo, compuesto por un núcleo central (protones y neutrones) y electrones en niveles energéticos. El núcleo, de altísima densidad ($2,3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$), se mantiene unido por la interacción nuclear fuerte. Su estabilidad se explica con modelos como el de capas.

Se describe un átomo mediante la notación ${}^A_Z X$, donde Z es el número de protones y A la suma de protones y neutrones. Los elementos con mismo Z y diferente A son isótopos. Estos conceptos son esenciales para entender la fisión y la fusión.

La ionización afecta a los electrones, pero los procesos nucleares involucran exclusivamente el núcleo. Así, el número atómico y el másico permiten clasificar los elementos y analizar su comportamiento nuclear.

4.1.2. Fuerzas fundamentales y energía de ligadura

Las cuatro fuerzas fundamentales son: fuerte, débil, electromagnética y gravitatoria. La fuerza nuclear fuerte, de corto alcance pero intensa, mantiene cohesionado el núcleo. La débil interviene en desintegraciones radiactivas; la electromagnética actúa entre cargas eléctricas; la gravedad, aunque débil, domina a gran escala.

La energía de ligadura nuclear es la que mantiene unido al núcleo, producto del defecto de masa según $E = mc^2$. Esta energía es clave en las reacciones de fisión y fusión. La energía de ligadura por nucleón alcanza su máximo en el hierro-56, lo que explica su alta

estabilidad.

En núcleos ligeros predomina la fusión, mientras que en pesados la fisión permite liberar energía. Los elementos más pesados que el hierro se forman en supernovas mediante procesos de captura de neutrones.

4.1.3. Radiactividad y tipos de decaimiento nuclear

Los núcleos inestables se estabilizan mediante decaimiento nuclear, fenómeno regido por la ley exponencial $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$. Los principales tipos de decaimiento son:

- **Alfa:** emisión de ${}^4_2\text{He}$, reduce Z en 2 y A en 4. Alta ionización, baja penetración.
- **Beta:** conversión de un neutrón en protón (beta $^-$) o de un protón en neutrón (beta $^+$ o captura electrónica), ajustando la relación n/p .
- **Neutrones:** emisión libre de neutrones, frecuente en fisión.
- **Gamma:** emisión de fotones tras otras desintegraciones, sin alterar Z ni A , muy penetrante.

Estos procesos liberan energía (según $E = mc^2$) y tienen múltiples aplicaciones: en medicina (PET), geología (datación con C-14), energía (reactores nucleares) y astrofísica (nucleosíntesis estelar).

En resumen, el decaimiento nuclear permite que núcleos inestables alcancen mayor estabilidad, liberando energía útil y esencial para comprender fenómenos naturales y tecnológicos.

4.2. Procesos de fisión nuclear

4.2.1. Fundamentos físicos de la fisión nuclear

El descubrimiento del neutrón por Chadwick (1932) permitió estudiar núcleos sin la repulsión de Coulomb. Fermi bombardeó elementos con neutrones, observando radiactividad inducida. En 1938, Hahn y Strassmann detectaron productos más ligeros al irradiar uranio, y Meitner y Frisch interpretaron que se trataba de *fisión nuclear*: el núcleo se divide en dos fragmentos más estables.

Físicamente, la fisión surge de la competencia entre la fuerza nuclear fuerte y la repulsión electrostática. En núcleos pesados como ^{235}U o ^{239}Pu , la captura de un neutrón excita el núcleo hasta un punto crítico donde se fragmenta. Cada fisión emite neutrones secundarios, posibilitando una *reacción en cadena*, base de reactores o explosivos nucleares.

La fisión nuclear es un fenómeno en el que un núcleo atómico muy pesado, como el del uranio, se divide en dos fragmentos más ligeros. Este proceso libera una enorme cantidad de energía. Pero, ¿por qué ocurre esto? La respuesta se encuentra en la estructura interna del núcleo atómico.

Cada núcleo está formado por protones y neutrones. Estos están unidos entre sí por una fuerza muy intensa, la **fuerza nuclear fuerte**. Pero los protones, al tener carga positiva, también se repelen entre sí debido a la **fuerza electromagnética**. Cuanto más grande es el núcleo, mayor es esa repulsión, y más fácil es que el núcleo se vuelva inestable.

La fisión se produce porque los fragmentos que se generan al dividir un núcleo pesado están más firmemente unidos internamente que el núcleo original. Es decir, la energía que los mantiene unidos por cada partícula (energía de enlace por nucleón) es mayor en los fragmentos que en el núcleo original. Esa diferencia se transforma en energía liberada, que se manifiesta principalmente en forma de **energía cinética** de los fragmentos.

En el caso del ^{238}U , los productos de fisión tienen una energía de enlace por nucleón mayor (unos 8,5 MeV frente a los 7,6 MeV del núcleo original). Esa diferencia total de

unos 214 MeV por cada evento de fisión es lo que se aprovecha en los reactores nucleares.

La barrera de Coulomb

A pesar de esa ganancia de energía, la fisión no ocurre de forma espontánea en la mayoría de los núcleos pesados. Esto se debe a una especie de “muralla invisible” llamada **barrera de Coulomb**, que representa la energía necesaria para que los fragmentos logren separarse entre sí, venciendo la atracción de la fuerza nuclear que aún los une.

En el caso del uranio, esta barrera es más alta (aproximadamente 250 MeV) que la energía liberada (214 MeV), lo cual impide que el proceso ocurra por sí solo. Para superar esta barrera, el núcleo necesita un aporte extra de energía externa, como la que aporta un neutrón.

Fisión espontánea e inducida

En algunos casos raros, la fisión puede ocurrir sin ninguna intervención: esto se llama **fisión espontánea**. Es más común en núcleos extremadamente pesados, donde la barrera de Coulomb prácticamente desaparece. Pero en la mayoría de los casos, hace falta un “empujón” externo para provocar la fisión. Ese empujón puede ser, por ejemplo, la captura de un neutrón.

Cuando un núcleo captura un neutrón, entra en un estado excitado y puede deformarse hasta romperse. Dependiendo de su estructura interna, esta energía puede ser suficiente o no para provocar la fisión. En algunos casos, el núcleo simplemente reemite el neutrón. En otros, pueden producirse **resonancias nucleares** que permiten la fisión incluso sin alcanzar la energía teórica mínima.

Deformación del núcleo y activación

Los núcleos no son esferas rígidas. Pueden deformarse, como una gota de agua que se aplasta. Esta deformación cambia su energía interna. Si la deformación es suficiente, el núcleo se vuelve inestable y se rompe.

La energía que se necesita para alcanzar ese punto crítico se llama **energía de acti-**

vación. Esta varía de un núcleo a otro y se puede estimar con modelos que comparan el núcleo con una gota de líquido cargada (modelo de gota líquida). Algunos núcleos, por su número de protones y neutrones, son más estables porque sus capas internas están “llenas”, algo parecido a los niveles de energía de los electrones. Estos efectos se conocen como **efectos de capas nucleares**.

El proceso de fisión

Una vez que el núcleo ha recibido suficiente energía, se deforma y se parte en dos fragmentos. Estos salen disparados con gran velocidad, y además se liberan neutrones. En el caso del ^{235}U , por ejemplo, suelen liberarse unos 2 o 3 neutrones por fisión. Estos pueden provocar nuevas fisiones en otros núcleos, generando así una **reacción en cadena**.

Esta cadena de reacciones permite mantener un reactor nuclear funcionando de forma sostenida, o bien desencadenar una explosión incontrolada en una bomba nuclear.

Neutrones y fragmentos

Los fragmentos de fisión no son iguales: uno suele ser más pesado que el otro. Además, contienen un exceso de neutrones, por lo que emiten parte de ellos casi de inmediato (**neutrones rápidos**) y otros más tarde (**neutrones diferidos**), tras desintegrarse.

Aunque estos últimos solo representan un pequeño porcentaje, son fundamentales para controlar un reactor, ya que permiten ajustar la velocidad de la reacción de forma gradual mediante sistemas mecánicos.

Residuos y radiactividad

Los productos de fisión son altamente radiactivos y se desintegran en cadena, emitiendo radiación durante semanas, años o incluso milenios. Estos residuos constituyen uno de los principales retos a largo plazo de la energía nuclear, tanto por su gestión como por su seguridad.

La energía liberada

La fisión de un núcleo como el ^{235}U libera aproximadamente **200 MeV** de energía. La mayor parte se encuentra en el movimiento de los fragmentos, pero también se libera en forma de radiación gamma, neutrones rápidos, desintegraciones beta posteriores y neutrinos. Estos últimos no pueden aprovecharse porque escapan casi sin interactuar con la materia.

Reacción en cadena y control

Cuando los neutrones liberados en una fisión provocan nuevas fisiones, se genera una **reacción en cadena**. Para que esta se mantenga constante, cada fisión debe provocar, en promedio, exactamente otra fisión. Esta condición se representa con el **factor de reproducción k** .

- Si $k = 1$, la reacción es estable.
- Si $k < 1$, se apaga.
- Si $k > 1$, crece de forma exponencial.

Los reactores controlan este proceso mediante materiales que moderan la energía de los neutrones (como el carbono o el agua) y **barras de control** que absorben el exceso de neutrones. El equilibrio entre producción y pérdida de neutrones determina si el reactor puede mantenerse funcionando de manera segura.

Diseño y eficiencia del reactor

El diseño de una pila o reactor nuclear debe tener en cuenta la probabilidad de que los neutrones provoquen nuevas fisiones en lugar de perderse o ser absorbidos sin efecto. Para ello se emplea la **fórmula de los cuatro factores**, que incluye:

- La eficiencia de generación de neutrones (η)
- El aprovechamiento de neutrones rápidos (ε)

- La fracción que escapa a la absorción en resonancias (p)
- La fracción que produce fisión en lugar de captura (f)

Estos parámetros se optimizan mediante el tipo de combustible, la geometría del reactor y los materiales moderadores o absorbentes. El objetivo es alcanzar y mantener la **críticidad**, es decir, que el reactor funcione de manera controlada y segura.

4.2.2. Aplicaciones de la fisión nuclear

La **fisión nuclear** tiene aplicaciones clave en energía, defensa, medicina, agricultura, hidrología e investigación científica.

En los **reactores nucleares de potencia**, núcleos de ^{235}U o ^{239}Pu se fisionan controladamente para generar calor, usado para producir electricidad sin emisiones de CO_2 . También se emplea en **reactores de propulsión** naval y se investiga su uso en **propulsión térmica espacial**.

Los **reactores de investigación** producen radioisótopos para medicina e industria, como el ^{99}Mo (precursor del ^{99m}Tc), fundamental en diagnóstico por imagen. La **medicina nuclear** se aplica en oncología, cardiología, neurología, neumología y pediatría, mediante:

- **Radiofármacos**
- **Gammagrafías**
- **Radioisótopos**

También se utiliza en **radioterapia**, esterilización, trazadores biológicos y diagnóstico celular. En España: 35.500 instalaciones de radiodiagnóstico (34 millones de pruebas/año), 155 centros de radioterapia y 187 de medicina nuclear (900.000 exploraciones/año). A nivel global, 30 millones de personas acceden anualmente a medicina nuclear, con más de 60 enfermedades tratables (*Aplicaciones de la tecnología nuclear - Foro Nuclear, s.f.*) .

En **hidrología isotópica**, isótopos como ^3H y ^{14}C permiten rastrear el agua en el ciclo hidrológico, identificar fuentes, tasas de recarga y riesgos como la intrusión salina.

Las **sondas neutrónicas** permiten medir la humedad del suelo, con ahorros de hasta un 40 % en agua. También se usan en estudios climáticos de largo plazo (*Aplicaciones de la tecnología nuclear - Foro Nuclear, s.f.*) .

En **agricultura**, se emplean radioisótopos y radiación para inducir mutaciones, mejorar variedades, controlar plagas y reducir fertilizantes. La **irradiación de alimentos** alarga la vida útil y conserva propiedades físicas sin usar aditivos ni calor. Esta técnica está respaldada por FAO, OMS y OIEA (*Aplicaciones de la tecnología nuclear - Foro Nuclear, s.f.*) .

En el ámbito **militar**, la fisión permite la creación de **armas nucleares**, que liberan energía en una reacción en cadena descontrolada. La **proliferación nuclear** es un reto internacional clave.

Por último, en **ciencia**, los reactores de investigación generan haces de neutrones utilizados en estudios de materiales, física fundamental y procesos industriales.

En suma, la fisión nuclear ofrece múltiples beneficios, aunque requiere un estricto control por sus implicaciones en seguridad, residuos y geopolítica.

4.2.3. Ventajas y desafíos de la fisión

La **fisión nuclear** es una tecnología de alto impacto: permite obtener enormes cantidades de energía a partir de pequeñas masas de combustible, con mínimas emisiones de CO₂, y una alta estabilidad operativa. Una simple pastilla de uranio puede liberar tanta energía como toneladas de carbón o barriles de petróleo, con menor huella ambiental en transporte y almacenamiento.

Frente a fuentes renovables intermitentes, la fisión ofrece **fiabilidad** y **operación continua**, fortaleciendo la resiliencia de las redes eléctricas. También contribuye a la **seguridad energética**, permitiendo a los países reducir su dependencia de combustibles fósiles y diversificar su matriz energética.

Más allá del ámbito energético, la fisión impulsa el avance científico y médico. Los **radioisótopos producidos en reactores** son esenciales para el diagnóstico por imagen, la radioterapia y otras técnicas de medicina nuclear, mejorando la salud pública global.

Sin embargo, sus beneficios se equilibran con desafíos significativos. El principal es la **gestión de residuos radiactivos**, especialmente los de alta actividad y larga vida media, que requieren soluciones de almacenamiento y contención a escala de milenios. A pesar de los avances tecnológicos en reciclaje y reducción de residuos, el problema persiste como uno de los principales puntos de crítica.

Otro aspecto crítico es la **seguridad**. Aunque los accidentes nucleares son raros, eventos como *Chernóbil* y *Fukushima* han marcado la percepción pública, revelando que, aunque improbable, el riesgo catastrófico existe. Por ello, los diseños modernos priorizan la **seguridad intrínseca** y la automatización de respuestas ante fallos.

A futuro, la **nueva generación de reactores** (como los tipo IV y los **modulares**) promete mejorar la eficiencia, minimizar residuos y reforzar la seguridad, aunque requieren fuertes inversiones y desarrollo tecnológico.

La fisión representa, en definitiva, tanto una oportunidad como un reto. Puede ser un pilar de la transición energética global si se gestiona de forma responsable y con una visión sostenible. Pero quizás, más allá del uranio y el plutonio, el verdadero horizonte se halle en otro rincón de la física nuclear: la **fusión**. Si las estrellas son los hornos del universo, es la fusión su combustible. Un proceso limpio, sin residuos de larga vida, con abundante materia prima y gran potencial energético.

¿Será, entonces, la *energía de fusión* el "Santo Grial" que logre combinar todo lo que la fisión promete pero aún no resuelve? A continuación, exploraremos este fascinante camino.

4.3. Procesos de fusión nuclear

4.3.1. Fundamentos de la fusión nuclear

La fusión nuclear es el proceso mediante el cual dos núcleos atómicos ligeros se unen para formar un núcleo más pesado, liberando una enorme cantidad de energía. Este fenómeno es el que ocurre de forma natural en el interior del Sol y de todas las estrellas, y es responsable de la luz y el calor que emiten.

El interés en la fusión no se limita al estudio del cosmos: también se busca reproducirla en la Tierra como fuente de energía limpia y segura. A diferencia de la fisión, que divide núcleos pesados, la fusión produce mucha menos radiactividad y genera una energía aún mayor por cada unidad de masa reaccionada.

Sin embargo, lograr que dos núcleos se unan no es fácil. Ambos están cargados positivamente y se repelen mutuamente, como lo harían dos imanes con el mismo polo. Para que lleguen a unirse, deben acercarse muchísimo, lo que solo es posible si tienen suficiente energía. Esto se consigue calentando el material a temperaturas extremas, del orden de millones o incluso cientos de millones de grados. A esas temperaturas, los átomos se desintegran en un gas de partículas cargadas, llamado **plasma**, que es el estado en el que se encuentra la materia en el interior de las estrellas.

En condiciones tan energéticas, algunas partículas logran acercarse lo suficiente como para superar la repulsión eléctrica gracias a un fenómeno cuántico llamado **efecto túnel**, que permite que los núcleos se fusionen incluso si no tienen toda la energía necesaria para vencer la barrera de repulsión. Así, ocurre la fusión y se libera energía.

4.3.2. Reacciones de fusión y su energía

Una de las reacciones más estudiadas en la Tierra es la que combina deuterio (^2H) y tritio (^3H), dos formas pesadas del hidrógeno, para formar helio y un neutrón. Esta reacción libera una gran cantidad de energía (17,6 MeV), y se prefiere en proyectos como el ITER porque ocurre a temperaturas más bajas que otras reacciones.

En las estrellas, sin embargo, el proceso más común es distinto. El llamado **ciclo protón-protón** convierte protones en helio mediante una cadena de reacciones que ocurre lentamente, pero de forma continua, lo que garantiza la estabilidad energética del Sol durante miles de millones de años.

Cuando una estrella agota su hidrógeno, comienza a fusionar helio, y luego elementos más pesados como el carbono y el oxígeno. Este proceso, conocido como **nucleosíntesis estelar**, es el responsable de la formación de la mayoría de los elementos químicos del universo. Sin la fusión, no existiría el carbono necesario para la vida.

Dificultades y condiciones para lograr la fusión

Para lograr la fusión de forma controlada, como se intenta en los laboratorios, hay que recrear las condiciones extremas del interior de las estrellas. Esto implica temperaturas de millones de grados y presiones elevadas. Además, es necesario mantener el plasma caliente durante un tiempo suficiente para que se produzca un número alto de reacciones. Este desafío se aborda con técnicas como el **confinamiento magnético**, que utiliza potentes campos magnéticos para contener el plasma sin que toque las paredes del reactor.

Uno de los criterios clave para que la fusión produzca más energía de la que consume es el **criterio de Lawson**, que establece que el producto entre la densidad del plasma, la temperatura y el tiempo de confinamiento debe superar un determinado valor.

Distribución de energía y productos de fusión

Cuando se produce una reacción de fusión, la energía liberada se reparte entre las partículas resultantes. En la reacción D-T, la mayor parte de la energía se transfiere al neutrón, que es muy difícil de frenar directamente. Por eso, una parte importante de la energía debe ser recogida de forma indirecta, calentando materiales que luego transfieren ese calor a un sistema eléctrico convencional.

Las reacciones de fusión producen poca radiactividad en comparación con la fisión, y los residuos generados son mucho menos peligrosos. Sin embargo, sigue siendo necesario un diseño cuidadoso para capturar la energía de los neutrones y evitar la activación de materiales del reactor.

La fusión en el Sol y las estrellas

El Sol es un reactor natural de fusión que funciona de forma estable desde hace más de cuatro mil millones de años. En su núcleo, las condiciones de temperatura y densidad son tan extremas que permiten que los protones se unan a pesar de su repulsión. Este proceso es muy lento, lo que garantiza una vida larga para la estrella.

El ciclo comienza con la fusión de dos protones para formar deuterio, que después

se combina con otro protón para formar helio-3. Finalmente, dos núcleos de helio-3 se fusionan para formar helio-4, liberando energía en cada paso. En total, la conversión de cuatro protones en un núcleo de helio libera unos 26,7 MeV.

Además de energía, este proceso emite neutrinos, partículas casi sin masa que escapan directamente del Sol y pueden detectarse en la Tierra. El estudio de estos neutrinos ha confirmado las teorías sobre la fusión solar y ha permitido descubrir que los neutrinos cambian de tipo durante su viaje, un fenómeno que ha sido clave para comprender mejor la física de partículas.

Importancia de la fusión nuclear

La fusión nuclear representa una de las mayores esperanzas para el futuro energético de la humanidad. Su combustible es abundante (como el hidrógeno del agua), no produce residuos de larga duración, y no genera gases de efecto invernadero. Además, al no existir una reacción en cadena incontrolable como en la fisión, el riesgo de accidentes catastróficos es mucho menor.

Sin embargo, todavía queda camino por recorrer para lograr que esta tecnología sea viable a gran escala. Los avances actuales en proyectos como ITER o NIF muestran que estamos cada vez más cerca de hacer realidad una fuente de energía limpia, segura y prácticamente inagotable, inspirada en el mismo proceso que ilumina las estrellas.

4.3.3. Ventajas y desafíos de la fusión

La **fusión nuclear** destaca como una de las alternativas energéticas más prometedoras del futuro por sus múltiples beneficios. Utiliza isótopos como el **deuterio**, presente en el agua de mar, y el **tritio**, generable a partir del litio, lo que proporciona una fuente de combustible prácticamente inagotable y con una disponibilidad superior a la de los combustibles fósiles.

Además, la fusión es **limpia y segura**. No genera CO_2 ni gases contaminantes, y su reacción se detiene naturalmente ante cualquier desviación de las condiciones de operación, evitando accidentes como los de Chernóbil o Fukushima. Tampoco produce residuos de

fisión de larga vida, reduciendo considerablemente el problema de la gestión de desechos radiactivos.

Su **eficiencia energética** es notable: un gramo de deuterio-tritio puede liberar tanta energía como la combustión de diez toneladas de carbón. Esto implica menos consumo de recursos y menor ocupación territorial. Además, el desarrollo de esta tecnología impulsa avances científicos en superconductividad, criogenia o física de partículas, con aplicaciones potenciales en medicina, exploración espacial o computación avanzada.

Sin embargo, alcanzar estos beneficios requiere superar **desafíos técnicos considerables**. Para que los núcleos superen la *barrera de Coulomb*, se necesitan temperaturas de más de 10^8 K y sistemas de confinamiento del plasma altamente estables, como los campos magnéticos generados por imanes superconductores que emplean proyectos como ITER.

El **bombardeo de neutrones** de alta energía en el reactor daña materiales y estructuras. Aunque se investigan recubrimientos avanzados, la durabilidad de los componentes sigue siendo un reto. Asimismo, el **manejo del tritio**, un isótopo escaso y radiactivo, exige tecnologías complejas para su producción segura mediante reacciones con litio y su reciclado dentro del reactor.

Los **altos costes** también constituyen una barrera: ITER, por ejemplo, ha superado los \$20 000 millones. Aunque se prevé una reducción a largo plazo, actualmente no compite en precio con otras fuentes renovables. A esto se suma la **complejidad de los sistemas**, que integran superconductores, criogenia y mecanismos de conversión térmica. Además, aún no se ha demostrado un **balance energético positivo sostenido**, es decir, una planta que genere más energía de la que consume para iniciar y mantener la reacción.

En síntesis, la fusión reúne cualidades deseables: abundancia de combustible, ausencia de emisiones, seguridad inherente y gran rendimiento. No obstante, convertirla en una fuente viable de energía requerirá superar obstáculos técnicos, materiales y económicos. Con la colaboración internacional y la innovación continua, se espera que, en las próximas décadas, se convierta en una solución energética limpia y sostenible para el futuro.

4.4. Tipos de reactores nucleares

4.4.1. Funcionamiento general de los reactores de fisión

Aunque los diseños de reactores nucleares pueden parecer muy distintos entre sí, todos comparten los mismos elementos esenciales. Para generar energía mediante fisión, es necesario contar con un combustible capaz de dividirse, un sistema que controle la reacción, y una forma segura de extraer y utilizar la energía liberada. Esto se logra combinando distintos componentes: el combustible, un moderador (en muchos casos), un refrigerante que transporta el calor, un blindaje protector, un sistema de control de neutrones y varios sistemas de seguridad ante emergencias.

Los reactores se clasifican según su propósito. Algunos están diseñados para generar electricidad (reactores de potencia), otros se usan en investigación científica (reactores de investigación), y algunos se emplean para transformar ciertos elementos naturales en materiales aprovechables para la fisión, como el plutonio (reactores reproductores). También pueden clasificarse según la velocidad de los neutrones que utilizan: reactores térmicos, intermedios o rápidos. Cada uno responde a una necesidad tecnológica distinta.

El combustible más utilizado es el uranio, que puede encontrarse en estado natural o enriquecido. Enriquecerlo significa aumentar la proporción del isótopo fisible ^{235}U , lo que mejora la eficiencia del reactor. También se emplean otros elementos como el plutonio-239 o el uranio-233, obtenidos por transformación nuclear dentro del propio reactor.

El moderador es el material que frena los neutrones para aumentar la probabilidad de que provoquen nuevas fisiones. Los más usados son el agua (ligera o pesada), el grafito y algunos compuestos especiales. En cambio, los reactores rápidos no utilizan moderador, lo que les permite aprovechar mejor ciertos combustibles y producir más material fisible del que consumen.

El refrigerante extrae el calor generado por la fisión para producir vapor y mover turbinas que generan electricidad. Puede ser agua, gas o un metal líquido como el sodio. En los reactores más comunes (PWR y BWR), se utiliza agua a alta presión o en ebullición.

Otros modelos, como los rápidos, utilizan sodio líquido para mejorar la transferencia de calor.

Finalmente, los productos de la fisión son radiactivos y continúan desintegrándose incluso después de apagar el reactor. Esto produce calor residual que debe gestionarse con cuidado. Además, algunos productos como el xenón-135 absorben neutrones y dificultan el mantenimiento de la reacción, lo que requiere un control preciso del sistema.

4.4.2. Evolución tecnológica: nuevos diseños de reactores

En los últimos años, la investigación se ha enfocado en desarrollar reactores más seguros, eficientes y adaptables a distintas necesidades. Una de las propuestas más prometedoras son los **reactores modulares pequeños** (SMR), que se construyen en serie y se pueden transportar fácilmente. Estos reactores ofrecen mayor seguridad al incorporar sistemas que se apagan solos en caso de emergencia, sin necesidad de intervención humana. Además, pueden usarse no solo para generar electricidad, sino también para producir calor industrial o desalinizar agua.

También se están desarrollando reactores **rápidos enfriados por sodio**, que permiten aprovechar mejor el combustible nuclear y reducir los residuos. Al no usar moderador, utilizan neutrones rápidos que pueden romper incluso núcleos no fisibles en reactores térmicos. Aunque presentan desafíos técnicos, como la alta reactividad del sodio con el agua, han demostrado su viabilidad en varios países, como Rusia, India y Francia.

Otra tecnología avanzada son los **reactores de sales fundidas**, que usan una mezcla líquida de compuestos que actúa tanto como refrigerante como combustible. Al operar a altas temperaturas sin presiones extremas, estos reactores logran una mayor eficiencia térmica. Incorporan sistemas de seguridad pasivos, como tapones de congelación, que solidifican el combustible en caso de sobrecalentamiento, deteniendo la reacción sin intervención humana.

Finalmente, los **reactores de alta temperatura** emplean helio como refrigerante y alcanzan temperaturas muy elevadas, lo que los hace ideales para industrias que necesitan mucho calor o para la producción de hidrógeno. Su diseño asegura una gran contención

de los productos radiactivos gracias al uso de materiales muy resistentes y estables.

4.4.3. La fusión nuclear: reactores del futuro

A diferencia de la fisión, que divide núcleos pesados, la **fusión nuclear** une núcleos ligeros como el deuterio y el tritio para formar helio y liberar enormes cantidades de energía. Este es el proceso que ocurre en el interior del Sol. Reproducirlo en la Tierra requiere alcanzar temperaturas altísimas, superiores a los cien millones de grados, para que los núcleos logren acercarse lo suficiente y vencer la repulsión eléctrica.

En esas condiciones, la materia se convierte en **plasma**, un gas muy caliente formado por núcleos e iones libres. Este plasma debe mantenerse confinado el tiempo suficiente para que las reacciones ocurran. Existen dos formas principales de hacerlo: el **confinamiento magnético** y el **confinamiento inercial**.

El confinamiento magnético se basa en el uso de potentes campos magnéticos que rodean al plasma y evitan que escape, como en los **reactores tokamak**. Estos dispositivos han logrado grandes avances, aunque aún no producen más energía de la que consumen. Por su parte, el confinamiento inercial utiliza potentes pulsos láser o haces de partículas para comprimir pequeñas cápsulas de combustible, provocando reacciones breves pero intensas.

Uno de los hitos recientes más destacados ocurrió en 2022 en el *Lawrence Livermore National Laboratory*, donde por primera vez se obtuvo más energía de fusión que la suministrada al combustible, marcando un paso crucial hacia la viabilidad energética de la fusión (*Introductory-Nuclear-Physics-new-Krane_FissionAndFussion, s.f.*).

Los reactores de fusión en desarrollo también buscan aprovechar los neutrones liberados para producir tritio mediante reacciones con litio líquido, cerrando así el ciclo del combustible. Aunque aún quedan desafíos tecnológicos por superar, los progresos realizados muestran que la fusión podría convertirse en una fuente limpia, segura e inagotable de energía en las próximas décadas.

5. Resultados

5.1. Comparación entre fisión y fusión nuclear

Cuadro 5.1: Comparación entre fisión y fusión nuclear

Aspecto	Fisión Nuclear	Fusión Nuclear
Tecnología	Madura, ya operativa	En fase experimental y de desarrollo
Combustible	Uranio, plutonio	Deuterio, tritio (a partir de litio)
Residuos	Altamente radiactivos y longevos	Menores y menos radiactivos
Seguridad	Requiere estrictos sistemas de control	Baja probabilidad de accidentes, se detiene sola
Rendimiento	Alto, limitado por la fisión individual de núcleos	Muy alto por unidad de masa de combustible
Coste	Elevado en construcción, estable en operación	Muy alto actualmente, con potencial de mejora

Ambas tecnologías pueden abastecer grandes demandas energéticas. La fisión es ya una solución viable, aunque con desafíos en residuos y percepción pública. La fusión, aún no comercial, representa una opción más limpia, segura y sostenible a largo plazo, si logra superar sus actuales retos tecnológicos.

5.1.1. Eficiencia energética

La **fusión nuclear** genera entre 4 y 8 veces más energía por kilogramo de combustible que la **fisión** (Chatzis, s.f.). Mientras que 1 kg de deuterio-tritio puede liberar enormes

cantidades de energía, la fisión de 1 kg de uranio, aunque ya millones de veces más potente que combustibles fósiles, queda por debajo.

Ambas tecnologías enfrentan, no obstante, **límites similares en conversión térmica**, con rendimientos eléctricos de entre 30 y 40 %, determinados por el ciclo de Carnot y el uso de turbinas de vapor (Nuclear, s.f.). Esta restricción implica que una fracción significativa del calor generado debe disiparse si no se aprovecha térmicamente.

5.1.2. Costos

La **fisión nuclear** está consolidada comercialmente. Más de 400 reactores operan en el mundo, generando un 10 % de la electricidad global. Las centrales tienen **altos costes de capital** (entre 6.000 y 9.000 millones de euros) y largos plazos de construcción (7–10 años) (*Economics of Nuclear Power - World Nuclear Association*, s.f.), pero una vez operativas ofrecen producción constante, bajo coste de combustible y elevada capacidad de carga (>90 %) (“Nuclear Energy Data – 2021”, s.f.).

El coste medio por kWh oscila entre 0,05 y 0,10 € (“Nuclear Energy Data – 2021”, s.f.), aunque deben considerarse los gastos de **gestión de residuos y desmantelamiento**. Su rentabilidad depende de políticas de apoyo, financiación asequible y experiencia en construcción.

La **fusión**, por su parte, implica hoy **costes de I+D muy elevados**, aún sin producción comercial. El proyecto ITER, por ejemplo, tiene un coste estimado superior a 20.000 millones de euros (*ITER - the way to new energy*, s.f.), y las inversiones globales superan los 30.000 millones (*Fusion energy and ITER*, s.f.). El desarrollo de infraestructuras para confinamiento magnético e inercial representa uno de los mayores desafíos técnicos y económicos actuales.

A largo plazo, sin embargo, se espera que la fusión reduzca sus costes gracias a la fabricación modular, el aprendizaje tecnológico y el uso de **combustibles baratos y abundantes** (deuterio del agua, litio) con menores costes de residuos. Las estimaciones proyectan precios entre **0,04 y 0,07 €/kWh** en escenarios comerciales optimistas (Handley, Slesinski, y Hsu, s.f.), lo que la haría competitiva frente a otras fuentes.

Comparativa de costos con otras fuentes de energía

Cuadro 5.2: Comparación de costos entre fuentes de energía

Fuente de energía	Costo (€/kWh)	Factores clave
Fisión nuclear	0,05 – 0,10	Coste inicial alto, operación fiable y continua
Fusión nuclear (estim.)	0,04 – 0,07	Aún en desarrollo, alto coste de entrada
Solar fotovoltaica	0,03 – 0,08	Costes decrecientes, depende de la radiación solar
Eólica	0,03 – 0,09	Intermitencia y ubicación clave
Gas natural	0,04 – 0,08	Coste volátil según el mercado
Carbón	0,05 – 0,12	Altas emisiones, presión climática

Preguntas clave a considerar

- ¿Cuándo será viable comercializar la fusión nuclear?
- ¿Pueden reducirse los costos de gestión de residuos en fisión?
- ¿Qué políticas climáticas favorecen la inversión nuclear?
- ¿Qué incentivos públicos podrían acelerar la fusión?

Conclusión

La fisión continúa siendo una fuente madura y rentable, pese a sus costes iniciales y desafíos ambientales. La fusión, aún no comercial, se presenta como una solución de futuro con alto potencial energético, mayor seguridad y menores residuos. Si las innovaciones actuales se consolidan, ambas tecnologías podrían coexistir como pilares clave en el sistema energético del siglo XXI.

5.1.3. Impactos medioambientales

Tanto la fisión como la fusión nuclear destacan por su **baja emisión de CO₂** durante la operación, lo que las convierte en tecnologías clave para la mitigación del cambio

climático.

La **fisión nuclear**, sin embargo, genera **residuos radiactivos de alta actividad y larga vida**, como el ^{239}Pu o el ^{90}Sr . Estos requieren almacenamiento seguro por miles de años. No obstante, **reactores de cuarta generación**, como los rápidos enfriados por sodio (SFR) y los de sales fundidas, han mejorado la gestión de residuos: pueden **reutilizar hasta el 98 % del combustible**, reduciendo significativamente el volumen y la peligrosidad del material restante.

La **fusión nuclear**, en cambio, **no produce productos de fisión**, sino helio, un gas inerte. Aunque los neutrones emitidos activan materiales estructurales, estos **residuos inducidos** tienen **vidas medias mucho más cortas** que los residuos de fisión. El uso de **aleaciones avanzadas** permite que la radiactividad remanente decaiga a niveles seguros en **décadas**, eliminando la necesidad de almacenamiento geológico permanente.

En términos de **seguridad**, la fisión exige un control constante de la reacción en cadena, con riesgo de accidentes severos si fallan múltiples sistemas, como se vio en Chernóbil o Fukushima. No obstante, los diseños modernos integran **seguridad pasiva** y múltiples barreras físicas, reduciendo de forma drástica la probabilidad de incidentes.

La fusión, por su parte, **no implica reacciones en cadena**; cualquier pérdida de confinamiento enfría rápidamente el plasma y detiene la reacción, lo que elimina la posibilidad de accidentes graves. El principal riesgo es el **manejo del tritio**, radiactivo pero de vida corta (12 años), y en cantidades mucho menores que el combustible fisible en fisión.

Otro impacto ambiental relevante de la fisión proviene de la **minería de uranio**. Este proceso puede contaminar aguas subterráneas con metales pesados y radionucleidos como el radio o el torio, degradar ecosistemas y emitir gas radón. Las tecnologías modernas, como la **lixiviación in situ**, y las normativas ambientales más exigentes han reducido estos riesgos, aunque el impacto sigue siendo considerable.

En contraste, la fusión requiere **litio y deuterio**, cuya extracción presenta un **impacto medioambiental más moderado**. Además, los reactores avanzados podrían minimizar aún más la extracción de recursos, al aprovechar mejor el combustible y reducir

los residuos.

La posibilidad de **cerrar el ciclo del combustible** en la fisión y el menor impacto estructural de la fusión refuerzan su papel como energías limpias dentro de una transición energética sostenible.

Comparativa de impactos ambientales

Cuadro 5.3: Comparación de impactos ambientales entre fisión y fusión nuclear

Impacto	Fisión Nuclear	Fusión Nuclear
Residuos radiactivos	Gestión mejorada con reciclaje del 98 %, pero aún presente	Pocos residuos, de corta a media duración
Accidentes	Riesgo minimizado con tecnología de seguridad pasiva	Sin riesgo de reacciones incontroladas
Extracción de recursos	Minería de uranio con impacto significativo	Extracción de litio con impacto moderado
Emisiones indirectas	Moderadas en el ciclo del combustible	Bajas, limitadas a la construcción
Sostenibilidad	Mejora en gestión de residuos, reducción de extracción	Potencialmente sostenible a largo plazo

5.1.4. Viabilidad a largo plazo

Avances recientes y estado actual – Fisión

Aunque la fisión nuclear es una tecnología consolidada con décadas de operación comercial, su sostenibilidad futura depende de resolver desafíos clave: la gestión segura de residuos de larga vida, la mejora en seguridad operativa y el control de la proliferación nuclear.

Los esfuerzos actuales se concentran en el desarrollo de **reactores avanzados**, especialmente los de **Generación IV**, que prometen mayor eficiencia en el uso del combustible (incluso con uranio empobrecido o torio), seguridad pasiva mejorada y reducción drástica de residuos mediante el reciclaje de actínidos ([Lokshin, s.f.](#)).

Por otra parte, los **reactores modulares pequeños** (SMR) de hasta ~ 300 MWe suponen una alternativa emergente con diseño estandarizado y menor tiempo de construcción. Estos incorporan sistemas de seguridad intrínsecos y se adaptan mejor a redes eléctricas pequeñas o zonas alejadas (Liou, s.f.).

Varios países han extendido la vida útil de sus reactores hasta los 60–80 años, mientras se investiga la extracción de uranio del agua de mar y el uso del torio para diversificar el suministro.

La fisión sigue siendo **viable a medio y largo plazo**, aunque su competitividad dependerá de políticas de apoyo e innovación tecnológica que reduzca los costes de construcción. Si prosperan los SMR y los reactores avanzados, la fisión podría mantener un papel estable en el suministro eléctrico libre de carbono.

Avances recientes y perspectivas – Fusión

La fusión ha dado pasos relevantes que acercan su viabilidad. En diciembre de 2022, el NIF en EE.UU. logró una reacción por confinamiento inercial con ganancia energética neta: 3.15 MJ producidos frente a 2.05 MJ entregados al combustible (Pais, s.f.), replicado luego en julio de 2023. Aunque la eficiencia global aún es baja, se confirmó el principio de *ignición*.

En paralelo, el experimento europeo JET alcanzó en 2021 una liberación récord de 59 MJ sostenida por 5 segundos ($Q \approx 0.33$) (*JET makes history, again*, s.f.), mientras que el proyecto ITER aspira a obtener, en la década de 2030, plasmas en combustión con $Q \geq 10$, sostenidos durante varios minutos (*What will ITER do?*, s.f.).

Nuevos diseños como SPARC (MIT), con superconductores de alta temperatura, permiten campos magnéticos más intensos en dispositivos compactos.

La hoja de ruta prevé **prototipos funcionales en los años 2035–2040**, con posibilidades comerciales en la década de 2050 si se mantienen el ritmo de inversión y los avances en ingeniería (Rodríguez, s.f.).

La fusión destaca por su promesa de ser una fuente limpia, con recursos virtualmente inagotables y residuos de baja peligrosidad. Los desafíos principales siguen siendo tecno-

lógicos y económicos, pero el camino hacia su viabilidad ya se ve como una posibilidad realista para la segunda mitad del siglo XXI.

Conclusión

Fisión y fusión representan caminos energéticos con enfoques distintos pero potencialmente complementarios.

La **fisión** es ya una tecnología operativa, cuyos desarrollos se centran en mejorar la seguridad, reducir residuos y abaratar costes con nuevos diseños como los SMR y los reactores rápidos.

La **fusión**, aún en fase experimental, ha superado hitos clave que acercan su comercialización. De lograrse su estabilización técnica y su competitividad económica, se convertiría en una fuente **limpia, abundante y segura** de energía.

En conjunto, ambas podrían integrarse en un futuro sistema energético global: la fisión como soporte inmediato y la fusión como la gran esperanza energética del futuro.

5.2. Investigación y desarrollo de la fusión nuclear

5.2.1. Enfoques y tecnologías de fusión nuclear

La fusión controlada busca reproducir en la Tierra la energía de las estrellas mediante dos enfoques principales: el **confinamiento magnético** y el **confinamiento inercial**.

En el confinamiento magnético, se emplean intensos campos magnéticos para mantener el plasma (mezcla de deuterio y tritio) a temperaturas superiores a 10^8 K dentro de una cámara toroidal. El diseño más común es el **tokamak**, un reactor en forma de rosquilla que aísla el plasma de las paredes del reactor durante suficiente tiempo para permitir la fusión (*Gran avance para la fusión nuclear: el 'sol artificial' establece un récord de tiempo a 100 millones de grados Celsius - KTVZ, s.f.*). Variantes incluyen el **tokamak esférico** y el **stellarator**, que mejora la estabilidad del plasma a costa de una geometría más compleja.

El confinamiento inercial, en cambio, comprime cápsulas milimétricas de combustible mediante haces láser o partículas de altísima energía, provocando una implosión que genera fusión por un instante. Ejemplo destacado es la **Instalación Nacional de Ignición (NIF)** en EE.UU., con 192 láseres convergiendo sobre el blanco de combustible.

Ambos enfoques han alcanzado **hitos experimentales recientes** y representan los caminos más prometedores hacia un reactor de fusión funcional.

5.2.2. ITER (Reactor Termonuclear Experimental Internacional)

ITER es el mayor proyecto de fusión por confinamiento magnético del mundo, situado en Cadarache (Francia) y financiado por más de 30 países. Su objetivo es generar **500 MW de potencia de fusión durante 400 segundos** a partir de 50 MW de calentamiento, demostrando un rendimiento energético neto positivo (>10) (Michael Banks, s.f.-b; « *ITER ou le rêve prométhéen, et exorbitant, de la domestication du Soleil* », s.f.) .

El reactor, basado en un diseño tipo *tokamak*, usará una mezcla de deuterio y tritio confinada a más de 150×10^6 °C mediante campos magnéticos de hasta 13 T. Aunque su primer plasma se esperaba en 2025, problemas técnicos han retrasado el encendido real hasta **2035**, y las primeras pruebas con combustible hasta **2039** (Omar Kardoudi, s.f.) . El presupuesto acumulado ya supera los **20.000 millones de dólares**.

ITER validará tecnologías críticas: imanes superconductores, sistemas de refrigeración, materiales resistentes al bombardeo neutrónico y manejo de calor. También sentará las bases del futuro **DEMO**, el prototipo de reactor comercial que se espera para mediados del siglo XXI.

A pesar de los desafíos (estabilidad del plasma, resistencia de materiales, gestión del tritio), ITER representa un avance crucial hacia la energía de fusión. Basado en la experiencia de reactores como JET, su desarrollo impulsa la cooperación internacional y abre la puerta a una fuente energética limpia, abundante y prácticamente inagotable.

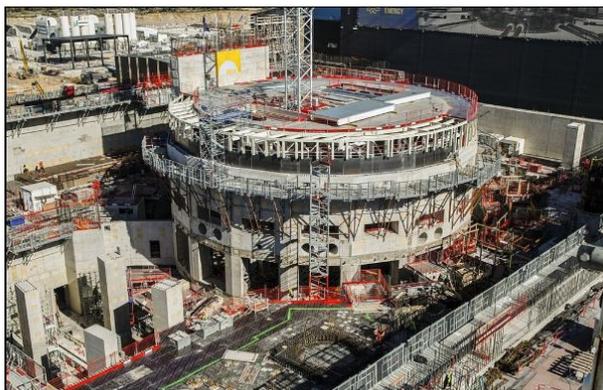


Figura 5.1: Construcción del complejo experimental ITER en Cadarache, Francia (fotografía de 2018)

5.2.3. NIF (National Ignition Facility, EE. UU.)

La **Instalación Nacional de Ignición (NIF)**, ubicada en el Laboratorio Lawrence Livermore (California), es el mayor laboratorio del mundo dedicado a la fusión por confinamiento inercial. Utiliza **192 haces láser** para comprimir cápsulas milimétricas de deuterio-tritio, generando condiciones de temperatura y presión extremas en escalas temporales de nanosegundos. Su meta es alcanzar reacciones de fusión controladas y autosostenidas similares a las del Sol.

En diciembre de 2022, logró un **hito histórico**: la primera ignición por fusión en laboratorio, donde la energía liberada (**3,15 MJ**) superó la energía láser absorbida por el blanco (**2,05 MJ**), confirmando la posibilidad de un *plasma ardiente autosostenido* ([Ha nacido una estrella - Alfa 53 - CSN, s.f.](#); [Científicos de EEUU lograron repetir la fusión nuclear - Infobae, s.f.](#)). Este resultado fue replicado en 2023 y superado en febrero de 2024, alcanzando **5,2 MJ** de energía de fusión ([Alcanzan la fusión nuclear neta por segunda vez, un hito que la acerca a su uso comercial, s.f.](#)). No obstante, el balance energético total sigue siendo negativo: el sistema consume más de 300 MJ de electricidad por disparo ([Energía de fusión nuclear: un paso más en un largo camino | National Geographic, s.f.](#)).

Funcionamiento: confinamiento inercial por láser indirecto

En el NIF, los láseres no impactan directamente el combustible, sino que calientan las paredes de una cavidad metálica (*hohlraum*) para producir rayos X. Estos inducen una

implosión simétrica de la cápsula, comprimiendo el combustible hasta densidades ~ 100 veces las del plomo. Si la simetría y la energía son suficientes, una parte del combustible alcanza *ignición*, y la energía de las partículas alfa mantiene la reacción por inercia.

El control de inestabilidades hidrodinámicas y mejoras en la precisión láser fueron claves para lograr una implosión esférica efectiva y alcanzar la ignición (*Ha nacido una estrella - Alfa 53 - CSN, s.f.*).

El sistema láser del NIF

Los **192 haces láser** se amplifican desde una fuente semilla de nanojulios hasta **2 MJ**, mediante vidrio dopado con neodimio y lámparas de destello. Se convierten a luz UV (351 nm) para máxima absorción, y se sincronizan con precisión de picosegundos. Durante cada disparo, el sistema alcanza una **potencia pico de 500 teravatios** durante unos **20 ns** (*Ha nacido una estrella - Alfa 53 - CSN, s.f.*).

Este láser es el más potente jamás construido, pero tiene una eficiencia eléctrica-óptica muy baja (menor al 1%), lo que limita su viabilidad comercial. Ya se investiga el uso de **láseres de diodo** o **excímeros** como alternativa eficiente para futuras plantas de fusión.

Desafíos hacia la generación eléctrica por fusión inercial

- **Eficiencia energética global:** Se necesita multiplicar la energía de fusión generada por un factor de 30–100 respecto a la energía láser suministrada para obtener ganancia neta eléctrica.
- **Cadencia de disparo:** Hoy en día se realiza un disparo cada varias horas. Un reactor funcional debería operar a **10 disparos por segundo**, lo que exige avances en automatización, alineación óptica y refrigeración.
- **Fabricación de cápsulas:** Las cápsulas de deuterio-tritio son complejas y costosas. Un reactor necesitaría fabricar miles por día. Además, el **tritio**, escaso en la naturaleza, deberá generarse *in situ* mediante mantos de litio bombardeados por neutrones.

- **Desarrollo de láseres más eficientes:** El uso actual de lámparas de destello limita la eficiencia. Se buscan sistemas con eficiencias óptico-eléctricas superiores al 10–15 %.
- **Resistencia de materiales:** El reactor debe soportar pulsos frecuentes de alta energía, neutrones de 14 MeV y calor extremo. Se requieren nuevos materiales, cámaras de reacción reemplazables y sistemas ópticos resistentes al daño por radiación.

En resumen, el NIF ha demostrado la posibilidad física de la ignición por fusión, pero aún debe superar barreras en eficiencia, repetitividad, ingeniería y economía para convertirse en una fuente práctica de energía. Es, sin embargo, un hito científico que valida el principio de fusión inercial y guía el diseño de futuras instalaciones comerciales.

5.2.4. Proyecto IFMIF-DONES en Granada

El **IFMIF-DONES** (International Fusion Materials Irradiation Facility – Demo Oriented Neutron Source), ubicado en Escúzar (Granada), tiene como objetivo evaluar materiales para futuros reactores como ITER y DEMO, simulando el ambiente neutrónico del interior de una planta de fusión mediante la colisión de **deuterones sobre litio líquido** (*IFMIF-DONES*, s.f.).

La instalación, con una inversión prevista de **700 millones de euros**, está liderada por España y Croacia. Contará con un acelerador de partículas de alta intensidad y un blanco líquido de litio. En enero de 2025 se inauguró la *Industry Office*, y en diciembre de 2024 se licitó un contrato técnico de 11 millones de euros para la construcción de los edificios principales (*Se pone en marcha la construcción del acelerador IFMIF DONES en Granada*, s.f.).

6. Discusión

6.1. Panorama geopolítico y estrategias nacionales en energía nuclear

Durante las últimas cinco décadas, la energía nuclear ha evolucionado de forma desigual según los contextos geopolíticos, las estrategias de seguridad energética y las prioridades políticas de cada país. Esta sección discute críticamente esa diversidad de enfoques nacionales, así como el abandono nuclear en algunos casos, con una visión comparada y centrada en las decisiones estratégicas.

Francia es un caso paradigmático de apuesta política por la independencia energética: tras la crisis del petróleo de 1973, desarrolló una red nuclear centralizada que hoy cubre más del 70 % de su electricidad, con fuerte apoyo estatal y una industria robusta (“[Nuclear Energy Data – 2021](#)”, s.f.). Este modelo contrasta con el de Alemania, que tras el accidente de Fukushima en 2011, optó por cerrar progresivamente sus reactores, culminando su salida nuclear en 2023. Esta decisión fue ampliamente influenciada por la presión social y la cultura política verde, aunque ha generado dependencia de combustibles fósiles a corto plazo ([Wehrmann, s.f.](#)).

En Asia, China ha emergido como el principal impulsor de nueva capacidad nuclear, tanto para el consumo interno como para la exportación de tecnología. Con decenas de reactores en construcción, China combina seguridad energética, innovación y diplomacia nuclear. Por su parte, Japón, fuertemente afectado por Fukushima, ha reactivado de forma gradual algunos reactores con altos estándares de seguridad, mientras que Corea del Sur ha consolidado su capacidad tecnológica hasta convertirse en exportador de reactores,

como en el caso de Barakah (Emiratos Árabes).

Estados Unidos mantiene el mayor número de reactores operativos, pero su expansión se ha visto limitada por costes elevados y demoras en nuevos proyectos. Aun así, su liderazgo en investigación nuclear (tanto en fisión como en fusión) sigue siendo relevante, con proyectos como el AP1000 o los desarrollos del NIF ([Lavanya Ahire, s.f.](#)).

En contraste, países como Italia o Austria renunciaron completamente a la energía nuclear. En Italia, un referéndum tras Chernóbil (1987) decidió el cierre de sus cuatro reactores y la prohibición constitucional de la tecnología nuclear, mientras Austria nunca llegó a activar su única planta, abandonada por presión popular. Estos casos reflejan el peso de la opinión pública y el rol simbólico de la energía nuclear en determinadas culturas políticas.

Desde una perspectiva global, el mapa nuclear actual se divide entre países que consolidan su industria con apoyo estatal, como China, Rusia o Francia; aquellos que combinan regulación con apertura a la inversión privada, como Reino Unido o Emiratos Árabes; y los que han optado por abandonar total o parcialmente esta tecnología. En todos los casos, las decisiones han estado condicionadas por crisis energéticas, accidentes nucleares, presiones sociales y la evolución de los marcos regulatorios internacionales.

Cabe destacar que mientras la fisión ha generado fuertes debates sociales y decisiones políticas polarizadas, la fusión nuclear no ha sufrido ese nivel de rechazo. Incluso países críticos con la fisión, como Alemania o Austria, participan activamente en proyectos internacionales como ITER o W7-X, lo que sugiere un consenso más amplio sobre el potencial futuro de esta tecnología ([What will ITER do?, s.f.](#)).

En conclusión, la energía nuclear ha sido tanto una herramienta de independencia energética como un campo de disputa social y geopolítica. Las trayectorias nacionales muestran que no existe un único modelo válido, sino decisiones adaptadas a contextos políticos, culturales y económicos concretos.

6.2. Implicaciones éticas y sociales de la energía nuclear

6.2.1. Seguridad y gestión de residuos

Seguridad nuclear

La seguridad nuclear es esencial para minimizar los riesgos asociados con instalaciones nucleares. Tras accidentes como Chernóbil o Fukushima, se reforzaron los estándares internacionales (IAEA) y se aplicaron sistemas de defensa en profundidad: múltiples barreras físicas, sistemas redundantes de refrigeración y estructuras resistentes a desastres naturales. La formación continua del personal, simulacros de emergencia y monitoreo constante con sensores de radiación y sistemas de alerta precoz aseguran un entorno controlado y resiliente.

Gestión de residuos nucleares

Los residuos se clasifican por su radiactividad: baja (ropa, herramientas), media (componentes irradiados) y alta actividad (combustible gastado). La gestión implica acondicionamiento (compactación, vitrificación o encapsulación), almacenamiento intermedio (piscinas de enfriamiento y contenedores secos) y almacenamiento definitivo (depósitos geológicos profundos como Onkalo en Finlandia). Los residuos de alta actividad requieren aislamiento durante milenios mediante barreras tecnológicas y geológicas. Las innovaciones como la transmutación nuclear o los reactores rápidos buscan reducir su vida y peligrosidad.

6.2.2. Percepción pública y aceptación social

La opinión pública sobre la energía nuclear está marcada por eventos como Chernóbil y Fukushima, amplificadas por el desconocimiento técnico y el temor a los residuos y la proliferación. Sin embargo, en contextos como Francia o Suecia, donde hay confianza

institucional, la aceptación es mayor. El cambio climático ha renovado el interés por la nuclear como opción baja en carbono. La aceptación social dependerá de la transparencia, educación y nuevas tecnologías como los SMR o la fusión.

6.2.3. Proliferación nuclear y riesgos globales

El uso militar de la tecnología nuclear plantea riesgos estratégicos. Aunque el TNP ha limitado la proliferación, países como Corea del Norte han desarrollado armas fuera de ese marco. También preocupa el acceso de grupos terroristas a materiales nucleares. La IAEA supervisa instalaciones civiles para prevenir desvíos, pero la cooperación internacional es crucial. Paradójicamente, la doctrina de la *destrucción mutua asegurada* ha contribuido a evitar guerras entre potencias nucleares, generando un frágil equilibrio estratégico. La disyuntiva ética entre el uso pacífico y el destructivo de la energía nuclear sigue siendo uno de los mayores retos globales del siglo XXI.

6.3. Discusión de oportunidades y desafíos reales de la fisión y fusión nuclear

La energía nuclear se encuentra en un momento de redefinición estratégica. Mientras el mundo intensifica la lucha contra el cambio climático y se enfrenta a crisis energéticas cíclicas, resurgen con fuerza los debates sobre el papel real de la fisión y la fusión nuclear. En esta sección se abordan las oportunidades y limitaciones de ambas tecnologías desde una perspectiva crítica, pero abiertamente favorable a su integración como pilares del sistema energético del futuro.

La fisión nuclear: una tecnología madura con valor estratégico inmediato

La fisión nuclear representa una de las pocas fuentes de energía despachables, con alta densidad energética, baja huella de carbono y disponibilidad tecnológica inmediata. A

diferencia de las fuentes renovables intermitentes, la fisión es capaz de generar electricidad de forma continua, estable y predecible. Esta característica no solo permite cubrir la demanda base de forma fiable, sino también aportar resiliencia frente a crisis como la vivida en Europa tras la invasión de Ucrania.

A pesar de su eficacia, la fisión sigue siendo objeto de resistencias sociales y políticas vinculadas al temor por accidentes nucleares (como Chernóbil o Fukushima), la gestión de residuos de larga vida y el riesgo de proliferación. Sin embargo, dichas preocupaciones deben situarse en contexto: los sistemas de seguridad modernos, las tecnologías de contención pasiva, los avances en diseño (Generación III y IV) y la experiencia acumulada demuestran que el riesgo nuclear se ha reducido enormemente y es, en términos estadísticos, comparable o inferior al de muchas otras fuentes energéticas convencionales.

El verdadero desafío de la fisión hoy no es tanto técnico como político y financiero. El coste inicial elevado, junto con marcos regulatorios lentos y a veces incoherentes, ha dificultado nuevas inversiones en varios países. No obstante, herramientas como los reactores modulares pequeños (SMR), los modelos híbridos de financiación público-privada y las reformas en licenciamiento podrían revertir esta tendencia. Mientras la fusión no sea viable comercialmente, prescindir de la fisión sería, desde una perspectiva de planificación energética seria, una renuncia injustificable.

Renovables: imprescindibles pero no suficientes

La transición energética no puede ni debe prescindir de las energías renovables. La solar, la eólica y otras fuentes limpias tienen un papel crucial en la descarbonización, la descentralización y la democratización del acceso a la energía. Sin embargo, su dependencia de factores meteorológicos introduce inestabilidad en la red, exige costosas infraestructuras de respaldo (almacenamiento, interconexión o generación fósil auxiliar) y plantea interrogantes sobre su escalabilidad y coste total a largo plazo.

En este escenario, la energía nuclear aparece no como una competidora de las renovables, sino como su complemento lógico. La combinación de renovables e instalaciones nucleares permite configurar sistemas energéticos limpios y estables, capaces de cubrir

tanto la demanda base como los picos sin recurrir al carbón o al gas. Esta complementariedad no solo es técnica, sino también estratégica: los países que apuestan por una matriz diversificada serán menos vulnerables a las tensiones geopolíticas o al colapso de precios de combustibles fósiles.

La fusión nuclear: la gran promesa a medio-largo plazo

La fusión nuclear representa la culminación de la aspiración energética humana: una fuente casi inagotable, segura, sin emisiones y con residuos significativamente menos problemáticos. Aunque aún no es comercialmente viable, los avances logrados en la última década —como la ignición en el NIF (2022) o los récords del tokamak EAST— marcan un punto de inflexión. La combinación de confinamiento magnético, superconductores de alta temperatura, impresión 3D y nuevas configuraciones (como stellarators o reactores compactos) abre horizontes realistas para lograr reactores comerciales en la segunda mitad del siglo XXI.

Es importante subrayar que la investigación en fusión no se ha detenido ni siquiera en los países con políticas antinucleares más radicales. Alemania, por ejemplo, alberga el stellarator Wendelstein 7-X, uno de los proyectos más avanzados del mundo. Esta paradoja demuestra que la fusión goza de un consenso transversal, incluso entre sectores tradicionalmente reacios a la nuclear, gracias a su perfil de seguridad y sostenibilidad.

Conclusión: hacia un sistema energético del siglo XXI

La fisión nuclear debe ser entendida como el puente firme que nos llevará a la era de la fusión. Prescindir de ella hoy sería una irresponsabilidad tanto ambiental como geopolítica. Las renovables son imprescindibles, pero no pueden sostener por sí solas la estabilidad de una red eléctrica moderna. La solución está en la combinación inteligente: renovables para lo variable, fisión para lo constante y fusión para el futuro.

Cuando la fusión nuclear se convierta en una tecnología madura, desplazará progresivamente a todas las demás, incluidas las propias renovables, por su superioridad técnica y energética. Mientras tanto, la humanidad debe aprovechar los recursos tecnológicos ya

disponibles, invirtiendo con ambición en el desarrollo de una matriz energética diversa, resiliente y verdaderamente sostenible.

7. Conclusión

A lo largo de este trabajo se ha llevado a cabo un análisis integral de los procesos de fisión y fusión nuclear, no solo desde el punto de vista físico, sino también tecnológico, histórico, ético y geopolítico. La energía nuclear, protagonista indiscutible del siglo XX y pieza clave del XXI, ha demostrado ser una fuente de energía con un potencial inmenso, pero también con importantes retos.

En primer lugar, se ha observado que **la fisión nuclear**, pese a su asociación con accidentes y residuos, sigue siendo la única tecnología nuclear operativa y madura a gran escala. Sus aplicaciones energéticas están consolidadas gracias a décadas de desarrollo de reactores PWR y BWR, y su evolución reciente con los SMR ofrece soluciones más seguras, modulares y flexibles. Aun así, la fisión conlleva desafíos persistentes en materia de residuos, seguridad y aceptación social.

En contraste, **la fusión nuclear** representa una promesa a largo plazo. Basada en principios físicos distintos, y con una mayor dificultad tecnológica, se ha avanzado en múltiples frentes (ITER, NIF, EAST, JET, IFMIF-DONES...), pero todavía no se ha logrado alcanzar un modelo comercial funcional. Sin embargo, las ventajas que ofrece — como la casi inexistente generación de residuos de larga duración, su seguridad inherente y su abundancia de combustible— justifican las ingentes inversiones públicas y privadas.

Desde el punto de vista técnico, se ha comprobado que tanto la fisión como la fusión permiten liberar enormes cantidades de energía debido al comportamiento de la energía de ligadura nuclear. Los modelos explicativos —gota líquida, modelo de capas, y los estudios sobre reacción en cadena y neutrones diferidos— han sido fundamentales para comprender el comportamiento de los núcleos atómicos y su aprovechamiento energético.

En cuanto a la comparación entre ambas tecnologías, se ha concluido que la **fisión**

sigue siendo la solución más viable a corto y medio plazo, mientras que la **fusión** representa una alternativa potencialmente superior a largo plazo, aunque aún inmadura. Las decisiones energéticas deben, por tanto, conjugar realismo tecnológico con visión de futuro.

Desde una perspectiva realista y ambiciosa, la comercialización de la fusión nuclear podría convertirse en una realidad en el horizonte de las próximas cinco a diez décadas. Mientras tanto, el uso transitorio y estratégico de la fisión nuclear representa una solución perfectamente viable para cubrir la demanda energética global sin depender de combustibles fósiles. Las reservas actuales de uranio, combinadas con tecnologías de reactores avanzados que permiten su reutilización y una gestión más eficiente del combustible, podrían sostener el suministro durante más de un siglo. A ello se suman las posibilidades de hallar nuevos yacimientos aún no descubiertos, así como, en un futuro más lejano, la eventual extracción de materiales nucleares fuera de la Tierra. La sinergia entre la fisión como tecnología de transición y la fusión como meta a largo plazo representa un camino racional y sostenible hacia un futuro energético libre de carbono.

Finalmente, se ha abordado la **dimensión ética, social y geopolítica** de la energía nuclear. La seguridad, la gestión de residuos, la percepción pública y el riesgo de proliferación son elementos clave para su desarrollo. La historia nos ha mostrado tanto los beneficios de la energía nuclear como sus peligros, y solo con una regulación robusta, una comunicación transparente y una apuesta decidida por la innovación podrá consolidarse su papel en la transición energética global.

En conjunto, este trabajo no solo ha proporcionado un marco teórico y técnico para entender la energía nuclear, sino que sienta las bases para futuras investigaciones orientadas al diseño de una estrategia energética nacional, en la que la energía nuclear, tanto de fisión como de fusión, tenga un papel relevante, equilibrado y responsable.

Como continuidad natural, este Trabajo de Fin de Grado abre la puerta a un futuro Trabajo de Fin de Máster centrado en la **seguridad nuclear y la protección radiológica**, donde se abordarán de forma más especializada los mecanismos de control, prevención y mitigación de riesgos asociados a las instalaciones nucleares. Esta línea de investiga-

ción permitirá profundizar en la interfaz entre tecnología, regulación y percepción social, con el objetivo de contribuir a un desarrollo nuclear más seguro, aceptado y sostenible, imprescindible en el contexto de la transición energética y el cambio climático.

España, con una sólida base técnica, experiencia operativa y talento científico, está en condiciones de recuperar un papel protagonista en la revolución energética del siglo XXI si se articula una política energética que integre la fisión como solución inmediata y la fusión como objetivo estratégico. En este contexto, el Trabajo de Fin de Máster representaría no solo una especialización académica, sino también una contribución concreta al debate nacional sobre el futuro energético, la seguridad y la sostenibilidad.

Referencias

60 years of progress. (s.f.). Descargado 2025-03-01, de <https://www.iter.org/fusion-energy/60-years-progress>

Advanced nuclear power reactors - world nuclear association. (s.f.). Descargado 2025-04-11, de <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors>

After ITER. (s.f.). Descargado 2025-03-02, de <https://www.iter.org/fusion-energy/after-iter>

Alcanzan la fusión nuclear neta por segunda vez, un hito que la acerca a su uso comercial. (s.f.). Descargado 2025-03-09, de https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2023-08-07/eeuu-repite-hito-historico-fusion-nuclear-energia_3714841/

Aplicaciones de la tecnología nuclear - foro nuclear. (s.f.). Descargado 2025-03-01, de <https://www.foronuclear.org/valores-del-sector/aplicaciones-de-la-tecnologia-nuclear/>

At COP28, countries launch declaration to triple nuclear energy capacity by 2050, recognizing the key role of nuclear energy in reaching net zero | department of energy. (s.f.). Descargado 2025-03-01, de <https://www.energy.gov/articles/cop28-countries-launch-declaration-triple-nuclear-energy-capacity-2050-recognizing-key>

Big tech is paving the way for a nuclear breakthrough - WSJ. (s.f.). Descargado 2025-04-11, de <https://www.wsj.com/business/energy-oil/big-tech-is-paving-the-way-for-a-nuclear-breakthrough-1b21c1a1>

Breaking new ground: JET tokamak's latest fusion energy record shows mastery of fusion

- processes - EUROfusion.* (s.f.). Descargado 2025-03-01, de <https://euro-fusion.org/eurofusion-news/dte3record/>
- Chatzis, I. (s.f.). *¿qué es la fusión y por qué es tan difícil de lograr?* | OIEA. Descargado 2025-03-01, de <https://www.iaea.org/es/energia-de-fusion/que-es-la-fusion-y-por-que-es-tan-dificil-de-lograr>
- Chinese academy of sciences.* (s.f.). Descargado 2025-03-02, de <https://lssf.cas.cn/en/facilities-view.jsp?id=ff8080814ff56599014ff5a5768a0050>
- Científicos de EEUU lograron repetir la fusión nuclear - infobae.* (s.f.). Descargado 2025-03-09, de <https://www.infobae.com/america/ciencia-america/2023/08/06/cientificos-de-eeuu-lograron-repetir-la-fusion-nuclear/>
- Climate change and nuclear power 2022 | IAEA.* (s.f.). Descargado 2025-03-01, de <https://www.iaea.org/topics/nuclear-power-and-climate-change/climate-change-and-nuclear-power-2022>
- Das, A., y Ferbel, T. (s.f.). *Introduction to nuclear and particle physics* (2. ed., repr ed.). World Scientific.
- DEMO - EUROfusion.* (s.f.). Descargado 2025-03-02, de <https://euro-fusion.org/programme/demo/>
- Demonstration power plant DEMO.* (s.f.). Descargado 2025-03-02, de <https://www.ipp.mpg.de/16355/demo>.
- Economics of nuclear power - world nuclear association.* (s.f.). Descargado 2025-03-01, de <https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power>
- Energía de fusión nuclear: un paso más en un largo camino | national geographic.* (s.f.). Descargado 2025-03-09, de <https://www.nationalgeographic.es/ciencia/2022/12/el-sueno-de-la-fusion-nuclear-energetica-esta-mas-cerca-gracias-a-esta-hazana-cientifica>
- Energía de fusión | OIEA.* (s.f.). Descargado 2025-03-02, de <https://www.iaea.org/es/publicaciones/informes/informe-anual/2023//energia-de-fusion>
- English portal - nuclear fusion: WEST beats the world record for plasma duration!* (s.f.).

- Descargado 2025-03-01, de <https://www.cea.fr/english/Pages/News/nuclear-fusion-west-beats-the-world-record-for-plasma-duration.aspx>
- Fast-neutron reactors, fast nuclear reactors* / IAEA. (s.f.). Descargado 2025-04-11, de <https://www.iaea.org/topics/fast-reactors>
- Fast neutron reactors - world nuclear association.* (s.f.). Descargado 2025-04-11, de <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/fast-neutron-reactors>
- Forschungszentrum Jülich. (s.f.). *DEMO*. Descargado de <https://www.fz-juelich.de/en/ifn/ifn-1/forschung/demo>
- Fusion energy and ITER.* (s.f.). Descargado 2025-03-01, de https://energy.ec.europa.eu/topics/research-and-technology/fusion-energy-and-iter_en
- Fusion energy power generation demonstration project, FAST, launched in japan* / NEWS / *kyoto fusioneering.* (s.f.). Descargado 2025-03-02, de <https://kyotofusioneering.com/en/news/2024/11/12/2678>
- Gospodarczyk, M. M. (s.f.). *IAEA releases 2019 data on nuclear power plants operating experience* / IAEA. Descargado 2025-03-01, de <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-releases-2019-data-on-nuclear-power-plants-operating-experience>
- Gran avance para la fusión nuclear: el 'sol artificial' establece un récord de tiempo a 100 millones de grados celsius* - KTVZ. (s.f.). Descargado 2025-03-02, de <https://ktvz.com/cnn-spanish/2024/04/01/gran-avance-para-la-fusion-nuclear-el-sol-artificial-establece-un-record-de-tiempo-a-100-millones-de-grados-celsius/>
- Ha nacido una estrella - alfa 53* - CSN. (s.f.). Descargado 2025-03-09, de <https://www.csn.es/-/ha-nacido-una-estrella>
- Handley, M. C., Slesinski, D., y Hsu, S. C. (s.f.). Potential early markets for fusion energy. , 40(2), 18. Descargado 2025-02-22, de <http://arxiv.org/abs/2101.09150> doi: 10.1007/s10894-021-00306-4
- Hunt, A. (s.f.). *IAEA raises nuclear growth projections, with SMRs ta-*

- king growing share - world nuclear news.* Descargado 2025-03-01, de <https://www.world-nuclear-news.org/articles/iaea-raises-nuclear-growth-projections-with-smrs-taking-growing-share>
- IFMIF-DONES.* (s.f.). Descargado 2025-03-02, de https://ifmif-dones.es/es/Introductory-nuclear-physics-new-krane_fissionandfusion. (s.f.).
- Irena Chatzis. (s.f.). *Demonstration fusion plants | IAEA.* Descargado 2025-03-02, de <https://www.iaea.org/bulletin/demonstration-fusion-plants>
- ITER - the way to new energy.* (s.f.). Descargado 2025-03-01, de <https://www.iter.org/>
- Japan launches FAST fusion power project - nuclear engineering international.* (s.f.). Descargado 2025-03-02, de <https://www.neimagazine.com/news/japan-launches-fast-fusion-power-project/>
- Japan launches FAST fusion project - world nuclear news.* (s.f.). Descargado 2025-03-02, de <https://www.world-nuclear-news.org/articles/japan-launches-fast-fusion-project>
- JET makes history, again.* (s.f.). Descargado 2025-03-01, de <https://www.iter.org/node/20687/jet-makes-history-again>
- Juan Carlos López. (s.f.). *El sector privado promete llegar a la fusión nuclear antes que el plan público: en una década.* Descargado 2025-03-02, de <https://www.xataka.com/energia/sector-privado-promete-llegar-a-fusion-nuclear-plan-publico-decada>
- Kawata, S., Karino, T., y Ogoyski, A. I. (s.f.). Review of heavy-ion inertial fusion physics. , 1(2), 89–113. Descargado 2025-02-21, de <https://pubs.aip.org/mre/article/1/2/89/359174/Review-of-heavy-ion-inertial-fusion-physics> doi: 10.1016/j.mre.2016.03.003
- Krane, K. S., y Halliday, D. (s.f.). *Introductory nuclear physics.* Wiley.
- Lamarsh, J. R., y Baratta, A. J. (s.f.). *Introduction to nuclear engineering* (3rd ed ed.). Prentice Hall.
- Las tecnologías nucleares avanzadas y su papel en la transición energética | foro*

- económico mundial*. (s.f.). Descargado 2025-04-11, de <https://es.weforum.org/stories/2024/10/explicativo-las-tecnologias-nucleares-avanzadas-y-su-papel-en-la-transicion-energetica/>
- Lavanya Ahire. (s.f.). *US scientists repeat fusion ignition breakthrough for 2nd time* / *reuters*. Descargado 2025-03-01, de <https://www.reuters.com/business/energy/us-scientists-repeat-fusion-power-breakthrough-ft-2023-08-06/>
- Liou, J. (s.f.). *¿qué son los reactores modulares pequeños (SMR)?* / *OIEA*. Descargado 2025-02-28, de <https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-son-los-reactores-modulares-pequenos-smr>
- Lokshin, A. (s.f.). *La cuarta generación son los sistemas*. Descargado 2025-02-28, de <https://rosatomnewsletter.com/es/2024/05/29/systemic-approach-to-generation-iv/>
- M. Mitchell Waldrop. (s.f.). *El sueño de la fusión nuclear dispara la inversión en reactores experimentales* | *ciencia* | *EL PAÍS*. Descargado 2025-03-02, de <https://elpais.com/ciencia/2024-04-08/el-sueno-de-la-fusion-nuclear-dispara-la-inversion-en-reactores-experimentales.html>
- Mapped: The world's nuclear power plants - carbon brief*. (s.f.). Descargado 2025-03-01, de <https://www.carbonbrief.org/mapped-the-worlds-nuclear-power-plants/>
- Marta M. Gospodarczyk. (s.f.). *IAEA releases 2019 data on nuclear power plants operating experience* / *IAEA*. Descargado 2025-03-01, de <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-releases-2019-data-on-nuclear-power-plants-operating-experience>
- Martin, B. R. (s.f.). *Nuclear and particle physics: an introduction*. John Wiley. (OCLC: ocm62728542)
- Michael Banks. (s.f.-a). *China's experimental advanced superconducting tokamak smashes fusion confinement record - physics world*. Descargado 2025-03-02, de <https://physicsworld.com/a/chinas-experimental-advanced-superconducting-tokamak-smashes-fusion-confinement-record/>

- Michael Banks. (s.f.-b). *ITER fusion reactor hit by massive decade-long delay and €5bn price hike - physics world*. Descargado 2025-03-02, de <https://physicsworld.com/a/iter-fusion-reactor-hit-by-massive-decade-long-delay-and-e5bn-price-hike/>
- Michael Banks. (s.f.-c). *SMART spherical tokamak produces its first plasma - physics world*. Descargado 2025-03-02, de <https://physicsworld.com/a/smart-spherical-tokamak-produces-its-first-plasma/>
- Microsoft firma un PPA de energía de fusión de 50mw con helion para 2028 - DCD. (s.f.). Descargado 2025-03-02, de <https://www.datacenterdynamics.com/es/noticias/microsoft-firma-un-ppa-de-energia-de-fusion-de-50mw-con-helion-para-2028/>
- Molten salt reactors (MSR) / IAEA. (s.f.). Descargado 2025-04-11, de <https://www.iaea.org/topics/molten-salt-reactors>
- Molten salt reactors - world nuclear association. (s.f.). Descargado 2025-04-11, de <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/molten-salt-reactors>
- Nuclear, F. (s.f.). *¿cómo funciona una central nuclear? - foro nuclear*. Descargado 2025-03-01, de <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/como-funciona-una-central-nuclear/>
- Nuclear energy agency (NEA) - new GIF framework agreement to ensure international co-operation on generation IV systems. (s.f.). Descargado 2025-03-01, de https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_99831/new-gif-framework-agreement-to-ensure-international-co-operation-on-generation-iv-systems
- Nuclear energy data – 2021. (s.f.).
- Nuclear fusion heat record a ‘huge step’ in quest for new energy source | nuclear power | the guardian. (s.f.). Descargado 2025-03-01, de <https://www.theguardian.com/environment/2022/feb/09/nuclear-fusion-heat-record-a-huge-step-in-quest-for-new-energy-source>
- Nuclear power in germany - world nuclear association. (s.f.). Descargado 2025-03-

- 01, de <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/germany>
- Nuclear power in the world today - world nuclear association.* (s.f.). Descargado 2025-03-01, de <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today>
- Nuclear power reactors - world nuclear association.* (s.f.). Descargado 2025-04-11, de <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors>
- Omar Kardoudi. (s.f.). *El mayor proyecto de fusión nuclear del mundo se demorona.* Descargado 2025-03-02, de https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2024-06-27/reactor-de-fusion-iter-nuevo-retraso-duda-viabilidad_3912350/
- Pais, R. (s.f.). *Científicos de EE UU logran repetir su éxito de generar energía mediante fusión nuclear | ciencia | EL PAÍS.* Descargado 2025-02-28, de <https://elpais.com/ciencia/2023-08-07/cientificos-de-ee-uu-logran-repetir-su-exito-de-generar-energia-mediante-fusion-nuclear.html>
- Raúl Limón. (s.f.). *El tokamak de fusión nuclear de la universidad de sevilla consigue generar plasma a millones de grados durante un tiempo récord | tecnología | EL PAÍS.* Descargado 2025-03-02, de <https://elpais.com/tecnologia/2025-01-25/el-tokamak-de-fusion-nuclear-de-la-universidad-de-sevilla-consigue-generar-plasma-a-millones-de-grados-durante-un-tiempo-record.html>.
- Response from world nuclear association to the release of the IPCC working group III report, climate change 2022: Mitigation of climate change - world nuclear association.* (s.f.). Descargado 2025-03-01, de <https://world-nuclear.org/news-and-media/press-statements/response-to-the-ipcc-working-group-iii-ar6-report>
- Rodriguez, P. (s.f.). *Energía nuclear: fisión vs fusión.* Descargado 2025-02-28, de <https://www.fundacionbankinter.org/noticias/energia-nuclear-fision-vs-fusion/>
- Sample, I. (s.f.). *Nuclear fusion heat record a 'huge step' in quest for new*

- energy source | nuclear power | the guardian.* Descargado 2025-03-01, de <https://www.theguardian.com/environment/2022/feb/09/nuclear-fusion-heat-record-a-huge-step-in-quest-for-new-energy-source>
- Se pone en marcha la construcción del acelerador IFMIF DONES en granada.* (s.f.). Descargado 2025-03-02, de <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Se-pone-en-marcha-la-construccion-del-acelerador-IFMIF-DONES-en-Granada>
- Small modular reactors (SMR) | IAEA.* (s.f.). Descargado 2025-04-11, de <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>
- Tomorrow bio - home.* (s.f.). Descargado 2025-02-28, de <https://www.tomorrow.bio/es/post/fusion-nuclear-frente-a-fision-cual-es-la-diferencia-y-por-que-es-importante>
- Wehrmann, B. (s.f.). *Q&A - germany's nuclear exit: One year after.* Descargado 2025-03-01, de <https://www.worldnuclearreport.org/Q-A-Germany-s-nuclear-exit-One-year-after>
- What will ITER do?* (s.f.). Descargado 2025-03-01, de <https://www.iter.org/fusion-energy/what-will-iter-do>
- « *ITER ou le rêve prométhéen, et exorbitant, de la domestication du soleil* ». (s.f.). Descargado 2025-03-02, de https://www.lemonde.fr/economie/article/2024/07/04/iter-ou-le-reve-prometheen-et-exorbitant-de-la-domestication-du-soleil_6246775_3234.html

8. Apéndices

8.1. Apéndice A - Desarrollo matemático

8.1.1. Principios fundamentales fisión nuclear

El descubrimiento del neutrón por Chadwick (1932) permitió estudiar núcleos sin la repulsión de Coulomb. Fermi bombardeó elementos con neutrones, observando radiactividad inducida. En 1938, Hahn y Strassmann detectaron productos más ligeros al irradiar uranio, y Meitner y Frisch interpretaron que se trataba de *fisión nuclear*: el núcleo se divide en dos fragmentos más estables.

Físicamente, la fisión surge de la competencia entre la fuerza nuclear fuerte y la repulsión electrostática. En núcleos pesados como ^{235}U o ^{239}Pu , la captura de un neutrón excita el núcleo hasta un punto crítico donde se fragmenta. Cada fisión emite neutrones secundarios, posibilitando una *reacción en cadena*, base de reactores o explosivos nucleares.

8.1.2. ¿Por qué se produce la fisión nuclear?

La fisión es favorecida cuando los productos tienen mayor energía de enlace por nucleón. Por ejemplo, el ^{238}U tiene 7,6 MeV/nucleón, mientras que los fragmentos (ej. ^{119}Pd) alcanzan 8,5 MeV. Esto implica una ganancia energética:

$$\Delta E \approx -1809 \text{ MeV} \rightarrow -2033 \text{ MeV} \Rightarrow 214 \text{ MeV}$$

Esta energía se libera como energía cinética de los fragmentos. A mayor energía libe-

rada, mayor probabilidad de fisión.

8.1.3. Barrera de Coulomb e inhibición

La fisión espontánea en núcleos como ^{238}U es improbable debido a la *barrera de Coulomb*, que debe superarse para que los fragmentos se separen:

$$R_1 = R_2 = 1,25 \cdot (119)^{1/3} = 6,1 \text{ fm} \Rightarrow R = 12,2 \text{ fm}$$

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Z_1 Z_2 e^2}{R} = (1,44 \text{ MeV} \cdot \text{fm}) \cdot \frac{46^2}{12,2 \text{ fm}} \approx 250 \text{ MeV}$$

Aunque se liberan 214 MeV, esta energía es insuficiente para superar los 250 MeV de barrera, inhibiendo la fisión espontánea. La asimetría en los fragmentos (como ^{79}Zn y ^{159}Sm) reduce la barrera (221 MeV), pero su formación directa es improbable. Además, estos cálculos simplifican una dinámica nuclear mucho más compleja.

8.1.4. Fisión espontánea e inducida

Cuando la energía liberada es comparable a la barrera, puede ocurrir **fisión espontánea**. Para núcleos con $A \gtrsim 300$, esta barrera desaparece. En núcleos más ligeros, se requiere energía externa (neutrón o fotón) para alcanzar un *estado compuesto intermedio* capaz de inducir la fisión.

En algunos casos, la energía del neutrón capturado no es suficiente y predomina la reemisión. En otros, pueden ocurrir **resonancias nucleares** que favorecen la **fisión por debajo del umbral**.

La **fisibilidad** depende de la energía del neutrón incidente. Núcleos como ^{235}U son sensibles a **neutrones térmicos**, mientras que otros requieren **neutrones rápidos** (energías $\sim \text{MeV}$), todo ello regulado por el espectro de resonancias del núcleo.

8.1.5. Energía de activación y deformación nuclear

La **energía de activación**, o altura de la barrera de fisión respecto al estado fundamental, se estima mediante el **modelo de gota líquida**, ajustado por efectos de capas nucleares. Para núcleos con $A \approx 280$, las barreras son bajas, favoreciendo la fisión; sin embargo, núcleos superpesados ($A \approx 300$) pueden ser más estables por cierre de capas.

La deformación nuclear modifica su energía de enlace. Asumiendo volumen constante, el área superficial del núcleo deformado elipsoidalmente es:

$$S = 4\pi R^2 \left(1 + \frac{2}{5}\varepsilon^2 + \dots \right) \quad (8.1)$$

con $\varepsilon = \frac{\beta\sqrt{5}}{4\pi}$. La variación de energía al deformarse es:

$$\Delta E = B(\varepsilon) - B(0) \quad (8.2)$$

La condición para fisión espontánea se establece como:

$$\frac{1}{5}a_c Z^2 A^{-1/3} > \frac{2}{5}a_s A^{2/3} \Rightarrow \frac{Z^2}{A} > 47 \quad (8.3)$$

Núcleos con $\frac{Z^2}{A} > 47$ son inestables a escala de $\sim 10^{-20}$ s. En uranio y cercanos, el estado fundamental es ya deformado (elipsoidal), favoreciendo la fisión.

8.1.6. Modelo de gota líquida y efectos de capas nucleares

El **modelo de gota líquida** considera el núcleo como fluido cargado positivamente, unido por la fuerza nuclear fuerte. Explica la deformación y la escisión como competencia entre energía superficial y repulsión de Coulomb. Isótopos como ^{235}U pueden sufrir fisión inducida tras capturar un neutrón térmico si la energía de activación es baja.

Sin embargo, este modelo no predice con precisión la distribución de masas de los fragmentos ni las probabilidades relativas de fisión, al no considerar la estructura cuántica del núcleo.

Efectos de capas

La **estructura de capas nucleares** añade estabilidad en núcleos con números mágicos (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, etc.). Estos efectos modifican la forma de la barrera de fisión (a veces con dos máximos) y explican fenómenos como **isómeros de fisión**, estados excitados que también pueden fisiónarse.

La distribución de masas de los fragmentos tiende hacia núcleos con configuraciones más estables, generando asimetrías con picos en valores cercanos a los números mágicos. Estos efectos cuánticos son fundamentales para describir con precisión la fisión más allá de una visión puramente macroscópica.

8.1.7. Mecanismo de fisión

La fisión inicia cuando el núcleo, tras absorber energía (p. ej., por captura de un neutrón), se deforma más allá de un umbral crítico. La repulsión de Coulomb supera la fuerza nuclear fuerte, provocando la escisión en fragmentos y la liberación de varios neutrones y 200 MeV (caso de ^{235}U). Si estos neutrones son capturados por otros núcleos fisibles, se genera una **reacción en cadena**, base de reactores y armas nucleares. Este proceso plantea grandes oportunidades energéticas, pero también riesgos de seguridad y proliferación.

Distribución de masas en los fragmentos

La fisión inducida por neutrones térmicos no produce fragmentos iguales, sino una distribución **asimétrica**, típica de masas $A_1 \approx 95$ y $A_2 \approx 140$, como en:



Los fragmentos tienen exceso de neutrones y emiten **neutrones rápidos** (prompt) en $\sim 10^{-16}$ s. El número medio de neutrones por fisión (ν) depende del isótopo:

$$\nu = 2,48 \quad \text{para } {}^{233}\text{U}$$

$$\nu = 2,42 \quad \text{para } {}^{235}\text{U}$$

$$\nu = 2,86 \quad \text{para } {}^{239}\text{Pu}$$

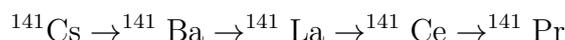
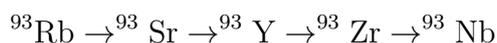
La distribución de neutrones sigue un patrón estadístico gaussiano independiente del núcleo fisible Fig. 8.10 .

Neutrones diferidos

Además de los neutrones inmediatos, algunos se emiten con retraso tras la desintegración beta de fragmentos excitados (p. ej., ${}^{93}\text{Rb} \rightarrow {}^{93}\text{Sr}$), con vidas medias de segundos. Representan solo 1% del total, pero son esenciales para el **control de reactores**, ya que permiten ajustar la reactividad en tiempos accesibles para sistemas mecánicos.

Desintegración de productos de fisión

Los fragmentos son altamente radiactivos y se estabilizan mediante cadenas de desintegración β y γ , como:



Estos residuos presentan vidas medias variables y constituyen el principal reto en la gestión de **residuos radiactivos**.

Secciones eficaces

Las **secciones eficaces** varían entre isótopos. Para ${}^{235}\text{U}$:

- Fisión: $\sigma_f = 584$ b - Captura: 97 b - Dispersión: 9 b

Presenta comportamiento $1/v$ y resonancias entre 1–100 eV. Es muy eficiente con **neutrones térmicos**, por lo que es necesario **moderarlos**.

En cambio, ^{238}U solo fisiona con **neutrones rápidos**, ya que su sección eficaz en la región térmica es despreciable. Esto se debe a que la energía del neutrón térmico no basta para superar la barrera de fisión de este isótopo.

8.1.8. Energía en la fisión

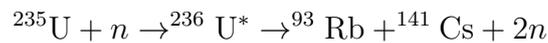
La captura de un neutrón por ^{235}U forma $^{236}\text{U}^*$ con una energía de excitación:

$$E_{ex} = [m(^{236}\text{U}^*) - m(^{236}\text{U})] c^2 = 6,5 \text{ MeV}$$

Esta energía supera la barrera de fisión (6.2 MeV), permitiendo el proceso. En cambio, ^{238}U produce sólo 4.8 MeV, insuficientes frente a su barrera (6.6 MeV), requiriendo neutrones rápidos. La diferencia proviene del término de **apareamiento** (δ), que favorece la fisión en núcleos impares como ^{235}U .

Energía liberada

En la fisión:



se liberan 200 MeV, distribuidos como:

- Fragmentos: 165 MeV
- Neutrones rápidos: 5 MeV
- Gamma inmediata: 8 MeV
- Decaimientos beta: 19 MeV
- Gamma secundaria: 7 MeV
- Neutrinos: 12 MeV (no útiles)

8.1.9. Reacción en cadena y factor de reproducción

Cada fisión de ^{235}U genera 2.5 neutrones, que pueden inducir nuevas fisiones. El **factor de reproducción** k_∞ indica el cambio en el número de neutrones térmicos de una generación a otra. Para sostener una reacción: $k_\infty \geq 1$. Muchos neutrones se pierden durante la **moderación** y absorción.

Moderación y estructura del reactor

Los neutrones se moderan mediante colisiones con núcleos ligeros como el **carbono**, cuyo uso como **moderador** se justifica por su baja sección eficaz de captura (0.0034 b). Un reactor consta de bloques de uranio y grafito y puede operar en estado:

- Crítico ($k = 1$): flujo constante
- Subcrítico ($k < 1$): decreciente
- Supercrítico ($k > 1$): creciente

Cálculo de k_∞

El número de neutrones rápidos producidos por neutrones térmicos se estima como:

$$\eta = \nu \cdot \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_a}$$

Para ^{235}U :

$$\eta = 2,5 \cdot \frac{584}{584 + 97} = 2,08$$

Para uranio natural:

$$\sigma_f = 4,20 \text{ b}, \quad \sigma_a = 3,43 \text{ b} \Rightarrow \eta = 1,33$$

Con uranio enriquecido al 3%: $\eta = 1,84$, permitiendo más pérdidas sin perder criticidad.

Factores que influyen en k_∞

$$k_\infty = \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f$$

Donde:

- $\varepsilon \approx 1,03$: Fisión rápida de ^{238}U
- $p \approx 0,9$: Escapatoria a captura resonante
- $f \approx 0,9$: Uso de neutrones térmicos para fisión

Esta es la **fórmula de los cuatro factores**, base del análisis de criticidad en reactores.

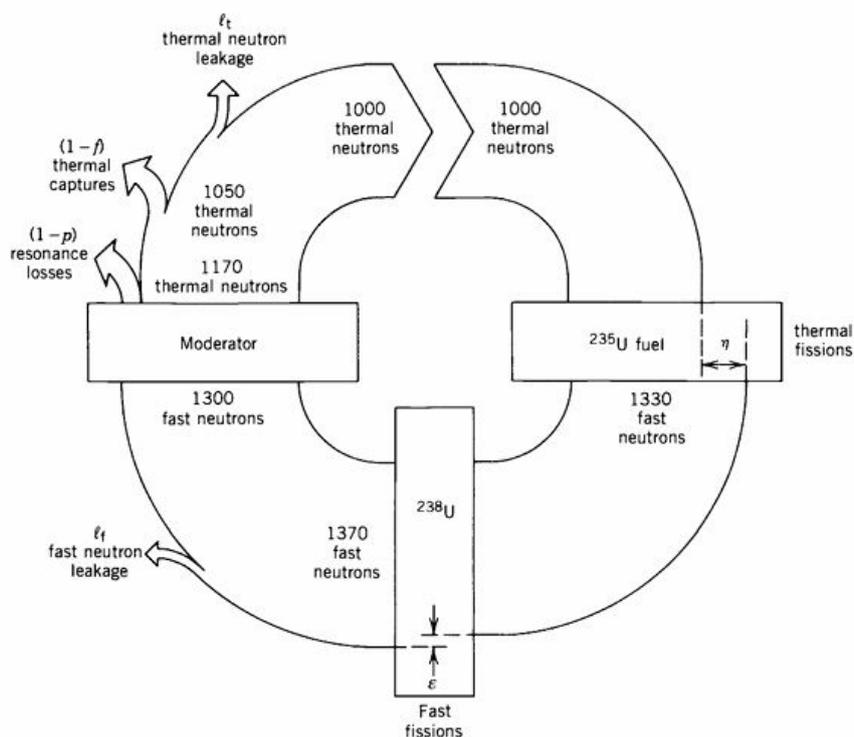


Figura 8.1: Representación esquemática de los procesos que ocurren durante una sola generación de neutrones. El ciclo ha sido dibujado para un factor de reproducción k de exactamente 1,000 (Krane, 1988)

Diseño práctico de la pila nuclear

El diseño de una pila debe equilibrar los factores ε , p , f para optimizar el rendimiento. En grandes masas de uranio, el **factor de escape resonante** p disminuye, ya que los neutrones intermedios (10–100 eV) son absorbidos en la superficie. Sin embargo, masas excesivas reducen la densidad de neutrones térmicos en el interior.

Para uranio natural y grafito, $k_\infty \approx 1,11$, pero las fugas externas reducen el valor real:

$$k = \eta\varepsilon pf(1 - \ell_f)(1 - \ell_t)$$

donde ℓ_f y ℓ_t son las fracciones de fuga de neutrones rápidos y térmicos. Las pérdidas disminuyen con el tamaño de la pila, dependiendo de la **longitud de migración**:

$$M = \sqrt{L_d^2 + L_s^2}$$

Para grafito: $L_s = 18,7$ cm, $L_d = 50,8$ cm. El **radio crítico** R_c necesario para alcanzar $k = 1$ es:

$$R_c = \frac{\pi M}{\sqrt{k_\infty - 1}} \approx 5 \text{ m}$$

Constantes de tiempo y control del reactor

El tiempo característico τ de evolución del número de neutrones incluye la moderación ($\sim 10^{-6}$ s) y la difusión térmica ($\sim 10^{-3}$ s). La evolución es:

$$N(t) = N_0 e^{(k-1)t/\tau}$$

Con $k = 1$, el reactor es crítico; si $k > 1$, los neutrones crecen exponencialmente. Para $k = 1,01$, el crecimiento ocurre en 0.1 s, potencialmente peligroso.

El control se realiza con **barras de control** (p. ej., cadmio), que absorben neutrones térmicos y ajustan la criticidad. Los **neutrones diferidos**, emitidos en segundos o minutos, permiten una regulación gradual y segura del reactor.

Referencias básicas

- Krane, K. S. (1988). *Introductory Nuclear Physics*. John Wiley & Sons.
- B. R. Martin, *Nuclear and Particle Physics: An Introduction*, Wiley, 2013.
- J. R. Lamarsh, A. J. Baratta, *Introduction to Nuclear Engineering*, Prentice Hall, 2001.
- H. A. Enge, *Introduction to Nuclear Physics*, Addison-Wesley, 1972.

8.1.10. Principios fundamentales fusión nuclear

La **fusión nuclear**, proceso inverso a la fisión, consiste en unir núcleos ligeros (como deuterio y tritio) para formar núcleos más pesados y estables, liberando grandes cantidades de energía. Es el mecanismo que alimenta al Sol y a las estrellas, y representa una fuente energética limpia, con menos residuos radiactivos que la fisión.

Para lograrla, es necesario superar la **barrera de Coulomb**, ya que los núcleos cargados positivamente se repelen. Esto requiere temperaturas extremas ($\sim 10^8 - 10^{11}$ K), donde las partículas alcanzan energías cinéticas suficientes. Por ejemplo, la fusión de dos núcleos de ^{20}Ne necesita 21.2 MeV para vencer la repulsión y genera en total 41.9 MeV, con una ganancia neta de energía por partícula de un factor 2 (Krane y Halliday, s.f.) .

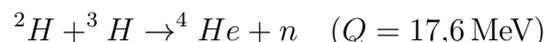
Los aceleradores de partículas permiten alcanzar esas energías, pero con corrientes bajas (nanoamperios), generando potencias de apenas unos W. Por eso, la alternativa viable es la **fusión termonuclear**, donde un plasma caliente alcanza las condiciones necesarias para que las partículas superen la barrera de Coulomb.

Este proceso no solo se estudia para obtener energía, sino también para comprender la vida de las estrellas y la síntesis de elementos. Al agotarse el hidrógeno en una estrella, comienzan reacciones con helio, carbono y elementos más pesados hasta llegar al hierro, punto de máxima estabilidad. Estas reacciones nucleares son responsables de la **nucleosíntesis estelar**.

No obstante, la fusión también ha sido usada con fines destructivos en las **armas termonucleares**, que liberan energía en milisegundos con consecuencias catastróficas.

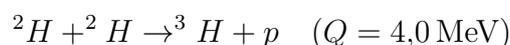
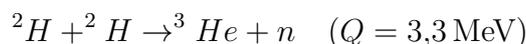
8.1.11. Reacciones de fusión nuclear

La reacción más estudiada para fines energéticos es:

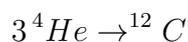


donde el neutrón resultante tiene 14.1 MeV. Esta reacción (D-T) es preferida en proyectos como ITER por su alta sección eficaz a temperaturas alcanzables, aunque presenta el inconveniente de que gran parte de la energía se transfiere al neutrón, dificultando su aprovechamiento directo.

Otras reacciones viables en laboratorio incluyen las reacciones D-D:



En el interior de las estrellas, el proceso de **fusión del hidrógeno** ocurre mediante cadenas que convierten protones en helio. Cuando el hidrógeno se agota, el helio se fusiona mediante el **proceso triple-alfa**:



precedido por la formación de un ${}^8\text{Be}$ inestable:



La existencia transitoria del ${}^8\text{Be}$ permite, mediante colisiones resonantes, formar carbono-12, esencial para la vida. A temperaturas más altas, las estrellas fusionan elementos más pesados hasta llegar al hierro-56, el núcleo de mayor energía de enlace por nucleón.

El objetivo actual de los proyectos de fusión controlada como ITER es alcanzar estas reacciones de manera sostenible mediante técnicas como el **confinamiento magnético**, generando temperaturas suficientes y densidades adecuadas de núcleos reactivos para obtener energía neta positiva (Krane y Halliday, s.f.).

8.1.12. Características de la fusión

Liberación de energía en la fusión

La energía liberada en una reacción de fusión se cuantifica mediante el valor Q , que representa la diferencia entre las masas iniciales y finales. Dado que las energías cinéticas iniciales (1–10 keV) son pequeñas respecto a Q (varios MeV), puede considerarse:

$$\frac{1}{2}m_b v_b^2 + \frac{1}{2}m_\gamma v_\gamma^2 \simeq Q, \quad \text{con} \quad m_b v_b = m_\gamma v_\gamma.$$

De ello se deduce que la partícula más ligera recibe mayor fracción de energía:

$$\frac{\frac{1}{2}m_b v_b^2}{\frac{1}{2}m_\gamma v_\gamma^2} = \frac{m_\gamma}{m_b}.$$

En la reacción D-T, el neutrón (más ligero) recibe el 80 % de los 17.6 MeV liberados, lo que dificulta el aprovechamiento directo de la energía, ya que su energía debe transformarse por vía térmica en materiales. En reacciones D-D, los productos también reparten la energía de forma asimétrica (75 % al neutrón o protón), lo que influye en el diseño de reactores y en la dinámica estelar (Krane y Halliday, s.f.).

Barrera de Coulomb

La repulsión entre núcleos cargados positivamente se describe mediante la barrera de Coulomb:

$$V_c = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0(R_a + R_X)} Z_a Z_X,$$

donde Z_a , Z_X son los números atómicos y R_a , R_X los radios nucleares. Esta barrera

dificulta la fusión, especialmente con núcleos pesados. Las reacciones con núcleos ligeros, como deuterio y tritio, tienen V_c menores (0.4 MeV), aunque todavía por encima de las energías térmicas típicas. La fusión ocurre gracias al **túnel cuántico**, permitiendo atravesar la barrera con energías subcríticas, lo cual es esencial tanto en las estrellas como en los reactores (Krane y Halliday, s.f.).

Sección eficaz

La **sección eficaz** σ mide la probabilidad de fusión y depende de la energía de colisión:

$$\sigma(E) = \frac{S(E)}{E} e^{-2\pi\eta(E)},$$

donde $S(E)$ es el *factor astrofísico* y $\eta(E)$ refleja la penetración cuántica de la barrera. La sección eficaz crece con la energía hasta un máximo y luego decrece. Se mide en barns ($1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$). La elección del par de núcleos afecta significativamente el valor de σ ; de ahí que la reacción D-T, con su mayor σ a temperaturas moderadas, sea la preferida (Krane y Halliday, s.f.).

Tasa de reacción

La tasa de reacciones por unidad de volumen y tiempo es:

$$R = n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle,$$

donde n_1, n_2 son las densidades y $\langle \sigma v \rangle$ es el promedio sobre la distribución de velocidades de Maxwell-Boltzmann:

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2k_B T}\right), \quad \langle \sigma v \rangle = \int_0^\infty \sigma(v) v f(v) dv.$$

Existe un *pico de Gamow* donde la fusión es más probable. A bajas T , las partículas no tienen suficiente energía; a temperaturas muy altas, las pérdidas aumentan. El **criterio de Lawson** establece que $nT\tau$ debe superar un umbral para que la energía generada por fusión compense las pérdidas.

La reacción D-T alcanza $\langle\sigma v\rangle$ altos a temperaturas relativamente bajas, siendo preferida frente a otras como D-D o D- ^3He , que requieren mayores temperaturas y tienen menor rendimiento.

En suma, la sección eficaz, la tasa de reacción y los efectos cuánticos determinan la viabilidad práctica de una reacción de fusión, siendo parámetros centrales en el diseño de reactores y el estudio de los procesos estelares.

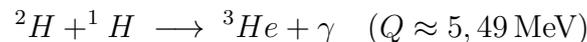
8.1.13. La fusión en el Sol: un reactor natural perfecto

El Sol funciona como un reactor termonuclear autosostenido, estable desde hace miles de millones de años. En su núcleo, a temperaturas de $\sim 15 \times 10^6 \text{ K}$ y densidades de 125 g/cm^3 , los protones poseen suficiente energía para superar parcialmente la repulsión electrostática y fusionarse.

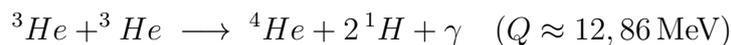
El proceso dominante es el **ciclo protón-protón**, que convierte cuatro protones en un núcleo de helio-4 mediante una cadena de reacciones que libera positrones, neutrinos y energía. El paso inicial es extremadamente lento por depender de la interacción débil:



Formado el deuterón, reacciona rápidamente con otro protón:



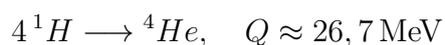
Finalmente, dos núcleos de helio-3 se fusionan:



La reacción global puede escribirse como:



Y considerando la aniquilación de los positrones con electrones del medio:



Parte de esta energía escapa del Sol como neutrinos, mientras que el resto se transfiere a las capas exteriores, alcanzando la fotosfera, donde se emite como luz y calor (Krane y Halliday, s.f.) .

Astrofísicamente, esta producción lenta de energía garantiza una larga vida para el Sol (unos 10^{10} años), manteniéndolo en equilibrio hidrostático gracias a la presión generada que compensa la gravedad.

La detección de **neutrinos solares** en la Tierra ha validado este modelo, aunque inicialmente se observó un déficit que motivó investigaciones sobre las **oscilaciones de sabor**, revelando que los neutrinos cambian de tipo en su camino desde el núcleo solar.

Así, la fusión solar no solo sostiene la vida en la Tierra, sino que es clave para entender la evolución estelar, la nucleosíntesis de elementos ligeros y los principios sobre los que se fundamenta la fusión controlada en la Tierra.

8.2. Apéndice B - Proyectos internacionales de fusión

8.2.1. Enfoques y tecnologías de fusión nuclear

La fusión controlada busca reproducir en la Tierra la energía de las estrellas mediante dos enfoques principales: el **confinamiento magnético** y el **confinamiento inercial**.

En el confinamiento magnético, se emplean intensos campos magnéticos para mantener el plasma (mezcla de deuterio y tritio) a temperaturas superiores a 10^8 K dentro de una cámara toroidal. El diseño más común es el **tokamak**, un reactor en forma de rosquilla que aísla el plasma de las paredes del reactor durante suficiente tiempo para permitir la fusión (*Gran avance para la fusión nuclear: el 'sol artificial' establece un récord de tiempo a 100 millones de grados Celsius - KTVZ, s.f.*). Variantes incluyen el **tokamak esférico** y el **stellarator**, que mejora la estabilidad del plasma a costa de una geometría más compleja.

El confinamiento inercial, en cambio, comprime cápsulas milimétricas de combustible mediante haces láser o partículas de altísima energía, provocando una implosión que genera fusión por un instante. Ejemplo destacado es la **Instalación Nacional de Ignición (NIF)** en EE.UU., con 192 láseres convergiendo sobre el blanco de combustible.

Ambos enfoques han alcanzado **hitos experimentales recientes** y representan los caminos más prometedores hacia un reactor de fusión funcional.

8.2.2. ITER (Reactor Termonuclear Experimental Internacional)

ITER es el mayor proyecto de fusión por confinamiento magnético del mundo, situado en Cadarache (Francia) y financiado por más de 30 países. Su objetivo es generar **500 MW de potencia de fusión durante 400 segundos** a partir de 50 MW de calentamiento, demostrando un rendimiento energético neto positivo (>10) (*Michael Banks, s.f.-b; « ITER ou le rêve prométhéen, et exorbitant, de la domestication du Soleil », s.f.*).

El reactor, basado en un diseño tipo *tokamak*, usará una mezcla de deuterio y tritio

confinada a más de 150×10^6 °C mediante campos magnéticos de hasta 13 T. Aunque su primer plasma se esperaba en 2025, problemas técnicos han retrasado el encendido real hasta **2035**, y las primeras pruebas con combustible hasta **2039** (Omar Kardoudi, s.f.) . El presupuesto acumulado ya supera los **20.000 millones de dólares**.

ITER validará tecnologías críticas: imanes superconductores, sistemas de refrigeración, materiales resistentes al bombardeo neutrónico y manejo de calor. También sentará las bases del futuro **DEMO**, el prototipo de reactor comercial que se espera para mediados del siglo XXI.

A pesar de los desafíos (estabilidad del plasma, resistencia de materiales, gestión del tritio), ITER representa un avance crucial hacia la energía de fusión. Basado en la experiencia de reactores como JET, su desarrollo impulsa la cooperación internacional y abre la puerta a una fuente energética limpia, abundante y prácticamente inagotable.

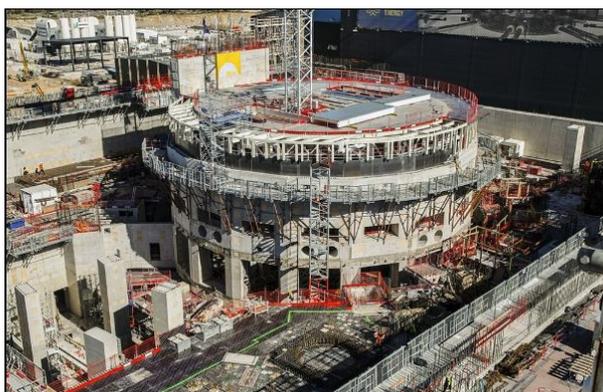


Figura 8.2: Construcción del complejo experimental ITER en Cadarache, Francia (fotografía de 2018)

8.2.3. NIF (National Ignition Facility, EE. UU.)

La **Instalación Nacional de Ignición (NIF)**, ubicada en el Laboratorio Lawrence Livermore (California), es el mayor laboratorio del mundo dedicado a la fusión por confinamiento inercial. Utiliza **192 haces láser** para comprimir cápsulas milimétricas de deuterio-tritio, generando condiciones de temperatura y presión extremas en escalas temporales de nanosegundos. Su meta es alcanzar reacciones de fusión controladas y autosostenidas similares a las del Sol.

En diciembre de 2022, logró un **hito histórico**: la primera ignición por fusión en laboratorio, donde la energía liberada (**3,15 MJ**) superó la energía láser absorbida por el blanco (**2,05 MJ**), confirmando la posibilidad de un *plasma ardiente autosostenido* (*Ha nacido una estrella - Alfa 53 - CSN, s.f.*; *Científicos de EEUU lograron repetir la fusión nuclear - Infobae, s.f.*). Este resultado fue replicado en 2023 y superado en febrero de 2024, alcanzando **5,2 MJ** de energía de fusión (*Alcanzan la fusión nuclear neta por segunda vez, un hito que la acerca a su uso comercial, s.f.*). No obstante, el balance energético total sigue siendo negativo: el sistema consume más de 300 MJ de electricidad por disparo (*Energía de fusión nuclear: un paso más en un largo camino | National Geographic, s.f.*).

Funcionamiento: confinamiento inercial por láser indirecto

En el NIF, los láseres no impactan directamente el combustible, sino que calientan las paredes de una cavidad metálica (*hohlraum*) para producir rayos X. Estos inducen una implosión simétrica de la cápsula, comprimiendo el combustible hasta densidades ~ 100 veces las del plomo. Si la simetría y la energía son suficientes, una parte del combustible alcanza *ignición*, y la energía de las partículas alfa mantiene la reacción por inercia.

El control de inestabilidades hidrodinámicas y mejoras en la precisión láser fueron claves para lograr una implosión esférica efectiva y alcanzar la ignición (*Ha nacido una estrella - Alfa 53 - CSN, s.f.*).

El sistema láser del NIF

Los **192 haces láser** se amplifican desde una fuente semilla de nanojulios hasta **2 MJ**, mediante vidrio dopado con neodimio y lámparas de destello. Se convierten a luz UV (351 nm) para máxima absorción, y se sincronizan con precisión de picosegundos. Durante cada disparo, el sistema alcanza una **potencia pico de 500 teravatios** durante unos **20 ns** (*Ha nacido una estrella - Alfa 53 - CSN, s.f.*).

Este láser es el más potente jamás construido, pero tiene una eficiencia eléctrica-óptica muy baja (menor al 1%), lo que limita su viabilidad comercial. Ya se investiga el uso de **láseres de diodo** o **excímeros** como alternativa eficiente para futuras plantas de fusión.

Desafíos hacia la generación eléctrica por fusión inercial

- **Eficiencia energética global:** Se necesita multiplicar la energía de fusión generada por un factor de 30–100 respecto a la energía láser suministrada para obtener ganancia neta eléctrica.
- **Cadencia de disparo:** Hoy en día se realiza un disparo cada varias horas. Un reactor funcional debería operar a **10 disparos por segundo**, lo que exige avances en automatización, alineación óptica y refrigeración.
- **Fabricación de cápsulas:** Las cápsulas de deuterio-tritio son complejas y costosas. Un reactor necesitaría fabricar miles por día. Además, el **tritio**, escaso en la naturaleza, deberá generarse *in situ* mediante mantos de litio bombardeados por neutrones.
- **Desarrollo de láseres más eficientes:** El uso actual de lámparas de destello limita la eficiencia. Se buscan sistemas con eficiencias óptico-eléctricas superiores al 10–15%.
- **Resistencia de materiales:** El reactor debe soportar pulsos frecuentes de alta energía, neutrones de 14 MeV y calor extremo. Se requieren nuevos materiales,

cámaras de reacción reemplazables y sistemas ópticos resistentes al daño por radiación.

En resumen, el NIF ha demostrado la posibilidad física de la ignición por fusión, pero aún debe superar barreras en eficiencia, repetitividad, ingeniería y economía para convertirse en una fuente práctica de energía. Es, sin embargo, un hito científico que valida el principio de fusión inercial y guía el diseño de futuras instalaciones comerciales.

8.2.4. Tokamak SMART de la Universidad de Sevilla

El Tokamak SMART (Small Aspect Ratio Tokamak), desarrollado por la Universidad de Sevilla, es el primer dispositivo diseñado para estudiar configuraciones de plasma con *triangularidad negativa*, una estrategia que mejora la estabilidad al mitigar inestabilidades que expulsan energía hacia las paredes del reactor.



Figura 8.3: Tokamak SMART de la Universidad de Sevilla

En enero de 2025, se logró generar plasma a 10^7 K, duplicando el tiempo previsto de mantenimiento, un avance crucial hacia los 10^8 K necesarios para condiciones de fusión efectivas (Raúl Limón, s.f.). El SMART combina tecnologías de tokamak esférico, triangularidad negativa y campos magnéticos intensos, sentando las bases para futuros reactores compactos, eficientes y de menor coste. Sus avances han suscitado colaboraciones internacionales, consolidándolo como referente científico (Michael Banks, s.f.-c).

8.2.5. Reactor Tokamak Superconductor Avanzado Experimental (EAST) de China

El **EAST**, conocido como el "sol artificial" de China, ha contribuido notablemente al desarrollo de la fusión nuclear desde su puesta en marcha en 2006. El 20 de enero de 2025, logró mantener plasma estable durante 1.066 segundos, estableciendo un récord mundial (Xinhua, 2025), acercándose a las condiciones necesarias para generación eléctrica por fusión.



Figura 8.4: Reactor Tokamak Superconductor Avanzado Experimental (EAST) de China (spanish.peopledaily.com.cn)

EAST colabora con el proyecto ITER y ha contribuido con importantes desarrollos tecnológicos. China se posiciona así como líder en el campo, impulsando avances hacia una energía limpia y sin emisiones (Michael Banks, s.f.-a; Chinese Academy of Sciences, s.f.).

8.2.6. Proyecto FAST en Japón

El **Proyecto FAST** (*Fusion by Advanced Superconducting Tokamak*) fue lanzado en Japón en noviembre de 2024 con el objetivo de validar experimentalmente la generación de energía por fusión para la década de 2030. Se basa en la reacción D-T e integra conversión energética y tecnologías avanzadas de combustible (*Japan launches FAST fusion project - World Nuclear News, s.f.*).

El FAST emplea un tokamak compacto de baja relación de aspecto con bobinas superconductoras de alta temperatura, apuntando a generar 50–100 MW durante hasta



Figura 8.5: Proyecto FAST en Japón (Xataka)

1.000 segundos por descarga. En total, busca acumular 1.000 horas de operación, resolviendo desafíos como la gestión del ciclo del tritio o la extracción eficiente de calor (*Japan launches FAST fusion power project - Nuclear Engineering International, s.f.*).

El consorcio incluye instituciones líderes como la Universidad de Tokio, Kyoto Fusioning Ltd y Tokamak Energy, además de socios industriales como Mitsui, Mitsubishi, Marubeni o KAJIMA (*Fusion Energy Power Generation Demonstration Project, FAST, Launched in Japan | NEWS | Kyoto Fusioning, s.f.*). Se prevé completar el diseño en 2025 y avanzar en regulación, ingeniería y selección de emplazamiento.

El FAST representa un paso clave hacia una fusión funcional y sostenible, mediante una estrategia tecnológica integral y colaboración global.

8.2.7. Avances en el Joint European Torus (JET)

El **Joint European Torus (JET)**, ubicado en Culham (Reino Unido), ha sido una referencia internacional en la investigación de la fusión nuclear desde 1983. En febrero de 2024, estableció un nuevo récord mundial al liberar **69,26 MJ** de energía de fusión en un pulso de seis segundos, usando apenas **0,21 miligramos** de combustible. Esta energía equivale a la combustión de **2 kg de carbón**, pero sin generar emisiones contaminantes (*Breaking New Ground: JET Tokamak's Latest Fusion Energy Record Shows Mastery of Fusion Processes - EUROfusion, s.f.*).

JET ha sido el único dispositivo capaz de operar con **mezcla de deuterio-tritio**, la misma que se empleará en ITER y DEMO, lo que ha permitido estudiar condiciones reales de operación para futuros reactores comerciales (*JET makes history, again, s.f.*). Su



Figura 8.6: JET (Xataka)

último pulso operativo tuvo lugar en diciembre de 2023, tras 40 años y 105.842 descargas experimentales. Se prevé que su desmantelamiento se prolongue hasta 2040 (*Breaking New Ground: JET Tokamak's Latest Fusion Energy Record Shows Mastery of Fusion Processes - EUROfusion, s.f.*).

8.2.8. Proyecto IFMIF-DONES en Granada

El **IFMIF-DONES** (International Fusion Materials Irradiation Facility – Demo Oriented Neutron Source), ubicado en Escúzar (Granada), tiene como objetivo evaluar materiales para futuros reactores como ITER y DEMO, simulando el ambiente neutrónico del interior de una planta de fusión mediante la colisión de **deuterones sobre litio líquido** (*IFMIF-DONES, s.f.*).

La instalación, con una inversión prevista de **700 millones de euros**, está liderada por España y Croacia. Contará con un acelerador de partículas de alta intensidad y un blanco líquido de litio. En enero de 2025 se inauguró la *Industry Office*, y en diciembre de 2024 se licitó un contrato técnico de 11 millones de euros para la construcción de los edificios principales (*Se pone en marcha la construcción del acelerador IFMIF DONES en Granada, s.f.*).

8.2.9. DEMO: Reactor de demostración de fusión nuclear

El proyecto **DEMO** (Demonstration Power Plant) busca construir el primer reactor de fusión que genere **electricidad de forma continua**, cerrando el ciclo iniciado por ITER. A diferencia de ITER, DEMO no solo estudiará el plasma, sino que generará

energía útil para la red eléctrica (*DEMO - EUROfusion, s.f.*).

Objetivos principales

- **Producción continua de electricidad:** validar la viabilidad económica y técnica de una planta de fusión en operación estable.
- **Producción de tritio in situ:** regenerar tritio a partir de litio mediante reacciones nucleares.
- **Integración tecnológica:** sistemas de extracción de calor, imanes superconductores, y materiales resistentes al daño neutrónico (*Demonstration Power Plant DEMO, s.f.*).

Desafíos técnicos

- **Confinamiento del plasma:** mantener temperaturas de $\sim 150 \times 10^6$ K mediante campos magnéticos intensos.
- **Resistencia de materiales:** soportar el bombardeo constante de neutrones rápidos (~ 14 MeV) sin degradación estructural (*Forschungszentrum Jülich, s.f.*).
- **Colaboración internacional:** EUROfusion, Japón y China desarrollan conjuntamente el diseño. China avanza en su propio puente hacia DEMO, el CFETR (*After ITER, s.f.*).

El éxito de DEMO será clave para inaugurar la era de la fusión comercial y facilitar la transición hacia una energía limpia, segura e inagotable (*Irena Chatzis, s.f.*).

Iniciativas privadas, inversión y nuevas tecnologías

Aunque históricamente la investigación en fusión ha estado dominada por grandes consorcios públicos, en los últimos años ha surgido un fuerte impulso desde el sector privado. Desde 2020, más de **6 000 millones de dólares** de capital privado han sido invertidos en startups de fusión, muchas de ellas creadas en la última década, con planes

ambiciosos de alcanzar prototipos funcionales en los próximos años (*Energía de fusión / OIEA, s.f.; M. Mitchell Waldrop, s.f.*).

El desarrollo de **imanes superconductores de alta temperatura (HTS)** ha sido clave. Empresas como **Tokamak Energy** (Reino Unido) y **Commonwealth Fusion Systems (CFS)** (EE. UU.) han construido imanes compactos y potentes que permiten diseñar tokamaks de menor tamaño con igual capacidad de confinamiento que grandes reactores como ITER. CFS, surgida del MIT, ha recibido casi **\$2 000 millones** para desarrollar su reactor **SPARC**, que pretende demostrar ignición y ganancia energética hacia 2025–2026, sentando las bases del futuro reactor **ARC** (*Juan Carlos López, s.f.*).

Otra vía alternativa es la explorada por **TAE Technologies**, que emplea una configuración de **campo inverso (FRC)**. Esta startup californiana apuesta por una fusión aneutrónica, usando **protones y boro-11**, una reacción que no emite neutrones radiactivos, aunque requiere temperaturas superiores a los 10^9 K. Su nuevo dispositivo, *Copernicus*, busca alcanzar 100 millones de grados, y el reactor *DaVinci* aspira a usar $p\text{-B}^{11}$ a escala comercial en los años 30 (*M. Mitchell Waldrop, s.f.*).

En paralelo, **Helion Energy** ha ganado notoriedad por combinar FRCs en colisión pulsada. En 2023 firmó un acuerdo con Microsoft para suministrar energía de fusión en 2028, lo que refleja la creciente confianza en estas tecnologías emergentes (*Microsoft firma un PPA de energía de fusión de 50MW con Helion para 2028 - DCD, s.f.*). Por su parte, **General Fusion** (Canadá) explora la fusión por colapso de cavidades esféricas, y **First Light Fusion** (Reino Unido) propone un enfoque inercial con proyectiles hipersónicos en lugar de láseres.

El reto del **tritio** también ha impulsado innovaciones. **Marathon Fusion** desarrolla sistemas para reciclar y reprocesar rápidamente este isótopo, cuya escasez representa un cuello de botella para el ciclo D-T. Su tecnología podría mejorar drásticamente la eficiencia en el uso de tritio en reactores futuros (*Juan Carlos López, s.f.*).

Gobiernos de todo el mundo han empezado a respaldar este impulso privado. Estados Unidos ha anunciado más de **\$6 000 millones** en subvenciones para acelerar la construcción de una planta piloto. El Reino Unido impulsa el programa **STEP**, con el objetivo de

tener un reactor operativo hacia 2040. La Unión Europea, por su parte, explora fórmulas público-privadas para complementar el camino hacia DEMO ([Juan Carlos López, s.f.](#)).

En conjunto, este nuevo ecosistema híbrido de startups, grandes inversores y programas públicos ha inaugurado una auténtica **carrera internacional por la fusión**. Aunque muchas de estas apuestas tecnológicas son arriesgadas, la diversidad de enfoques y la convergencia de esfuerzos aumentan las posibilidades de éxito.

Como destacó en 2023 el director del OIEA, Rafael Mariano Grossi: “*Estamos en un momento crucial del desarrollo de este ámbito*”, señalando también la creación de un **Grupo Mundial sobre Energía de Fusión** para coordinar y acelerar estos avances ([Energía de fusión / OIEA, s.f.](#)).

Nunca antes la fusión nuclear había contado con tanto respaldo económico, técnico y político a nivel global.

8.3. Apéndice C - Detalle de tipos de reactores

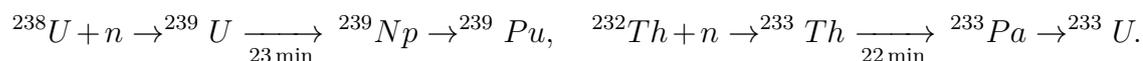
8.3.1. Reactores de fisión tradicionales (PWR, BWR, etc.)

Aunque el diseño de reactores nucleares es altamente complejo, todos comparten elementos esenciales: **combustible** fisionable, **moderador** (salvo en reactores rápidos), **reflector** de neutrones, **recipiente de contención**, **blindaje** biológico, **refrigerante**, **sistema de control** y **sistemas de emergencia**.

Clasificación de reactores

Los reactores se clasifican según su finalidad en tres categorías principales:

- **Reactores de potencia:** diseñados para convertir la energía de fisión en electricidad. Suelen ser de alta capacidad para reducir costes por megavatio y aprovechar recursos. Operan dentro de los límites impuestos por la Segunda Ley de la Termodinámica, lo que implica generar calor residual que debe disiparse.
- **Reactores de investigación:** generan intensos flujos de neutrones para estudios de física nuclear y de materiales. Aunque operan a potencias bajas (1–10 MW), ofrecen flujos del orden de $10^{13} n/cm^2/s$, útiles en experimentos de dispersión y producción de radioisótopos.
- **Reactores de conversión o reproductores:** transforman *isótopos fértiles* como ^{238}U y ^{232}Th en *fisibles* como ^{239}Pu y ^{233}U , a través de captura neutrónica y decaimientos beta:



Si el **factor** η (neutrones emitidos por cada uno absorbido) es mayor que 2, el reactor puede producir más combustible del que consume, especialmente en reactores

rápidos con ^{239}Pu , cuyo η puede alcanzar 3.

La clasificación también depende de la energía de los neutrones:

- **Reactores térmicos:** utilizan moderadores (agua, grafito) para frenar los neutrones, favoreciendo la fisión de ^{235}U .
- **Reactores intermedios:** operan en el rango de eV a keV, con menor volumen, utilizados en sistemas navales.
- **Reactores rápidos:** prescinden de moderador, trabajan con neutrones de energía MeV, y permiten una reproducción más eficiente de material fisible.

Cada tipo ofrece ventajas y retos específicos en términos de diseño, eficiencia, seguridad y coste, reflejando la diversidad de aplicaciones de la energía nuclear, desde la producción eléctrica hasta la investigación fundamental.

Tipo de combustible

Los combustibles más comunes son:

- **Uranio natural:** contiene solo un 0,72 % de ^{235}U .
- **Uranio enriquecido:** con mayor proporción de ^{235}U , se utiliza en la mayoría de reactores comerciales. Su obtención mediante *difusión gaseosa* de UF_6 aprovecha la diferencia de masas atómicas:

$$\text{Velocidad de difusión} \propto \frac{1}{\sqrt{M}},$$

lo que permite una separación gradual, aunque muy poco eficaz por ciclo ($\sim 0,4\%$), requiriendo miles de etapas.

- **Plutonio-239 y Uranio-233:** generados por transmutación en reactores reproductores, se emplean como combustibles fisibles avanzados.

El **uranio altamente enriquecido** ($>90\%$ ^{235}U) y el ^{239}Pu se reservan para usos militares, mientras que los reactores civiles operan con uranio enriquecido al 2–3%, no apto para armamento.

En conjunto, el tipo de combustible y el régimen neutrónico determinan en gran medida el diseño, uso y rendimiento de cada reactor.

Moderador

Un moderador eficaz debe tener baja masa atómica (idealmente cercana a la del protón), baja sección eficaz de captura de neutrones, alta densidad, estabilidad química y coste razonable. El **grafito** es eficaz, pero requiere gran volumen debido a su moderación menos eficiente por colisión. El **agua ligera** (H_2O) modera bien pero captura muchos neutrones ($n + p \rightarrow d + \gamma$), mientras que el **agua pesada** (D_2O) presenta una menor captura, aunque es costosa de producir y puede generar tritio radiactivo. Gracias a su baja absorción, los reactores moderados con agua pesada (como los CANDU canadienses) pueden usar **uranio natural**, mientras que los de agua ligera requieren **uranio enriquecido**, como en Cofrentes (España). Otros moderadores como el **berilio** y el **óxido de berilio** ofrecen buena moderación pero presentan riesgos tóxicos. Se investigan **hidruros metálicos** como alternativas avanzadas con mejor rendimiento térmico.

Ensamblaje

Según la disposición del moderador y el combustible, los reactores pueden ser **homogéneos** (mezcla uniforme) o **heterogéneos** (materiales separados). Los primeros son más fáciles de modelar, pero no alcanzan la **criticidad** con mezclas como uranio natural y grafito. En los diseños heterogéneos, el moderador rodea al combustible de forma optimizada, permitiendo mantener la reacción con uranio natural, como ocurre en los reactores moderados por grafito o agua pesada. Esto influye en parámetros como el **factor de utilización térmica** (f) y la **probabilidad de escape de resonancia** (p), esenciales para el cálculo de criticidad.

Refrigerante

El refrigerante extrae el calor del núcleo y evita el colapso térmico (*meltdown*). Puede ser gas, agua o metal líquido. En los **reactores de agua presurizada** (PWR), el agua se mantiene líquida a alta temperatura mediante presiones de ~ 100 atm, circulando en circuito cerrado. Los **reactores de agua en ebullición** (BWR), como el de Cofrentes, generan directamente el vapor que mueve las turbinas, pero exponen más el sistema al riesgo de contaminación radiactiva. En **reactores rápidos**, el **sodio líquido** se emplea por su alta capacidad calorífica y baja presión de ebullición, aunque plantea desafíos técnicos como corrosividad y activación radiactiva.

Tipos de sistemas de reactores

Los **PWR** y **BWR** usan agua ligera como moderador y refrigerante. En los BWR, el agua hierve en el núcleo y el vapor va directamente a la turbina. En los PWR, se separa el circuito primario (reactor) del secundario (turbina), reduciendo el riesgo de contaminación. Requieren **uranio enriquecido** (2–3%). Los **reactores CANDU**, con agua pesada, permiten usar **uranio natural**. Los **reactores moderados por grafito**, como los británicos, usan **CO₂** como refrigerante. Los **reactores rápidos**, sin moderador, como los *BN-600/800* (Rusia), *Monju* (Japón), o *FBTR* (India), emplean **sodio líquido** y son fundamentales para cerrar el ciclo del combustible mediante la reproducción de isótopos fisibles.

Productos de fisión radiactivos

Los fragmentos de fisión tienen exceso de neutrones, por lo que se desintegran por **emisión beta negativa**, liberando energía adicional (10–15% de la energía total), incluso tras apagar el reactor. Este *calor residual* requiere refrigeración continua. A medida que los productos se estabilizan, su energía desciende, pero aumentan sus vidas medias, generando **residuos radiactivos de larga duración**. Además, su acumulación puede capturar neutrones y afectar la eficiencia de la reacción. Muchos de estos productos, sin embargo,

tienen valor tecnológico o médico, y se extraen del combustible gastado para otros usos.

Energía liberada en los productos de fisión

La fisión de núcleos pesados produce fragmentos inestables que se desintegran por emisión β^- hasta alcanzar la estabilidad, liberando en total unos **19 MeV**. Inicialmente, esta energía puede superar los **6–7 MeV**, disminuyendo a aproximadamente **1 MeV** conforme los núcleos se estabilizan. Las transiciones con mayor transferencia energética predominan, favoreciendo los estados menos excitados. A esto se suma una emisión γ que aporta en promedio **7 MeV**, menos que la emisión β , aunque significativa.

Solo entre el **30 % y 40 %** de esta energía queda retenida como calor útil, ya que el resto es transportado por antineutrinos, de modo que entre **6 y 8 MeV** contribuyen efectivamente al balance térmico. El análisis detallado de esta energía requiere estudiar los isótopos de vida corta, sus transiciones y distribuciones de masa. Para tiempos entre 1 y 10^6 segundos tras la fisión, la potencia de emisión β y γ se aproxima por:

$$\beta(t) = 1,26 t^{-1,2} \text{ MeV/s}, \quad \gamma(t) = 1,40 t^{-1,2} \text{ MeV/s}$$

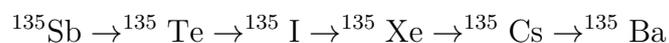
Si el reactor opera desde $t = 0$ hasta un tiempo T , la potencia residual tras el apagado es:

$$P(t) = 4,10 \times 10^{11} [t^{-0,2} - (t + T)^{-0,2}] \text{ MeV/s}$$

multiplicada por la potencia original del reactor en vatios. Por ejemplo, un reactor de **1000 MW** requiere multiplicar por 10^9 .

Este **calor residual** (*after-heat*) es generado por productos β y γ , persistiendo incluso tras el apagado del reactor. La radiactividad de los residuos de vida larga (hasta $\sim 10^6$ años) exige su confinamiento seguro. Paradójicamente, las plantas térmicas de carbón liberan más radiación ambiental que las nucleares operativas: una central de **1000 MW** puede emitir anualmente **23 kg de uranio** y **46 kg de torio** con sus productos de desintegración, incluyendo radón.

Entre los productos de fisión, el **xenón-135** (^{135}Xe) es particularmente relevante. Se produce directamente (0,2 %) o tras la desintegración del **yodo-135** (6,4 %), siguiendo la secuencia:



Con una sección eficaz de captura de neutrones de $2,7 \times 10^6$ barns, el xenón-135 absorbe neutrones térmicos de forma intensa, reduciendo la reactividad del reactor. Este **envenenamiento por productos de fisión** exige ajustes constantes en el control de los reactores para mantener su estabilidad.

Más allá del ámbito energético, los productos de fisión ofrecen múltiples aplicaciones. En espectroscopía nuclear, se usan emisiones γ para estudiar núcleos ricos en neutrones en la región de masas **130–160**, donde muchos adoptan formas deformadas con estados excitados más bajos. Estas investigaciones permiten comprender mejor la estructura nuclear y las fuerzas que actúan en su interior.

En medicina, isótopos como el **yodo-131** (^{131}I) se emplean para diagnóstico y tratamiento de enfermedades tiroideas. Con una vida media de **8 días**, se administra por vía oral y su captación se mide mediante detectores γ . El **yodo-132** (^{132}I), de vida media **2,3 horas**, se obtiene del **telurio-132** (^{132}Te , vida media **78 h**) y se usa en estudios de corta duración con menor exposición radiológica.

En conjunto, los productos de fisión no solo determinan aspectos operativos críticos en los reactores, como el calor residual o la absorción de neutrones, sino que también tienen una función destacada en la investigación básica y las aplicaciones biomédicas, consolidando su relevancia más allá de la producción energética.

Fisión de manera natural

La fisión nuclear no es exclusiva de los reactores artificiales; también ocurre de forma natural mediante la desintegración espontánea de núcleos pesados inestables. Algunos isótopos, como el **plutonio-244** (^{244}Pu), con una vida media de **81 millones de años**, existieron en el sistema solar primitivo pero ya se han desintegrado casi por completo.

Su presencia pasada se infiere a partir de los productos de fisión que dejaron en meteoritos primitivos, como el **xenón-136** (^{136}Xe), atrapado en inclusiones minerales desde la formación de estos cuerpos.

Debido a que el xenón es químicamente inerte, quedó preservado en los meteoritos, permitiendo mediante espectrometría de masas reconstruir la historia isotópica del sistema solar. En la Tierra, sin embargo, este gas fue liberado a la atmósfera en la etapa fundida del planeta.

El estudio del **uranio-235** (^{235}U) revela que su proporción actual respecto al uranio total es de **0,00720**, una cifra confirmada también en muestras lunares. No obstante, el ^{235}U posee una vida media más corta que el ^{238}U , por lo que en el pasado era más abundante. Su evolución en el tiempo se describe por:

$$r(t) = \frac{N_5(0) e^{-\lambda_5 t}}{N_5(0) e^{-\lambda_5 t} + N_8(0) e^{-\lambda_8 t}}$$

donde $r(t)$ es la fracción de ^{235}U al tiempo t , y λ_5 , λ_8 las constantes de desintegración del ^{235}U y ^{238}U .

Hace unos **2.000 millones de años**, la fracción de ^{235}U rondaba el **3%**, suficiente para permitir reacciones en cadena autosostenidas en condiciones naturales. Esta posibilidad se confirmó en 1972 con el hallazgo del **reactor natural de Oklo** en Gabón, donde la Comisión Francesa de Energía Atómica descubrió uranio empobrecido en ^{235}U , llegando a **0,00440** en algunas zonas.

En Oklo, el agua subterránea actuó como moderador natural, permitiendo que la fisión ocurriera de forma sostenida durante aproximadamente **un millón de años**, con una potencia media de solo **0,01 MW**. En total, se consumieron unas **5 toneladas** de ^{235}U , liberando alrededor de 2×10^{30} MeV, equivalentes a 10^8 MW · h.

El análisis isotópico de minerales en la zona reveló anomalías que confirmaban la fisión. Por ejemplo, la abundancia de **neodimio** coincidía con los patrones de fisión del ^{235}U , y se observó un exceso de ^{100}Ru debido a la siguiente secuencia de reacciones:



Dado que el **tecnecio-99** tiene una vida media de $\sim 2,1 \times 10^5$ años, su captura de neutrones durante la operación del reactor produjo este exceso de ^{100}Ru .

Lo más relevante del descubrimiento es que los productos de fisión permanecen en el lugar tras **2.000 millones de años**, lo que demuestra la posibilidad de un **confinamiento geológico natural** efectivo. Este caso sirve como precedente en los estudios de almacenamiento profundo de residuos radiactivos, ofreciendo evidencia empírica de su viabilidad a largo plazo.

8.3.2. Reactor de Cofrentes BWR

Un reactor nuclear de tipo BWR (Boiling Water Reactor), o de agua en ebullición, es una compleja instalación diseñada para generar energía eléctrica a partir de la fisión del uranio. Su estructura principal gira en torno a la **vasija del reactor**, un cilindro vertical de acero al carbono revestido internamente por acero austenítico para resistir la corrosión. Esta vasija puede soportar temperaturas de hasta 302°C y presiones de 88 kg/cm^2 , albergando en su interior tanto el combustible como los sistemas que controlan y conducen el flujo del refrigerante y del vapor.

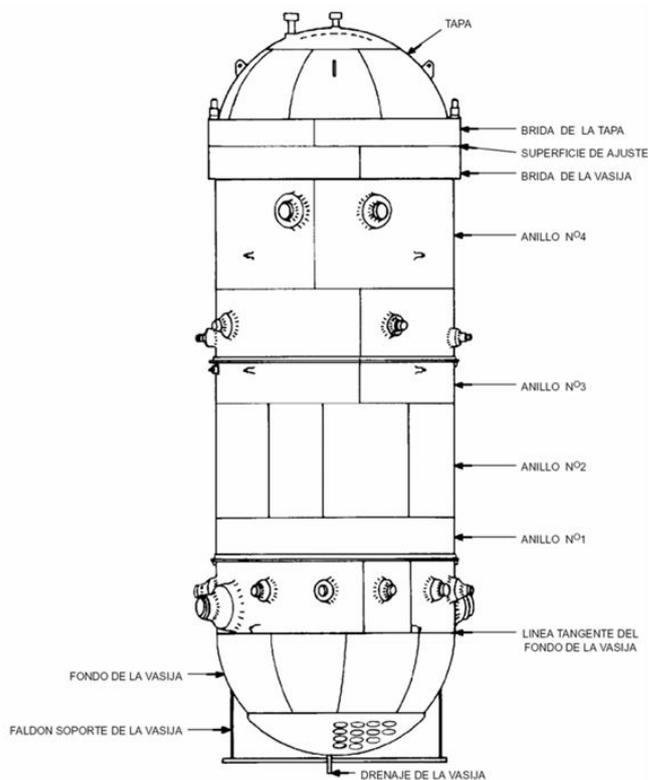


Figura 8.7: Construcción típica de vasija

En su interior, el corazón del reactor está formado por el **núcleo**, donde se alojan los elementos combustibles —barras de óxido de uranio (UO_2) enriquecido albergadas en tubos de Zircaloy— y las **barras de control**, encargadas de modular la reacción en cadena. Estas barras, cruciformes, se deslizan verticalmente para controlar el flujo de neutrones y la potencia generada.

El núcleo está rodeado por una **envoltura cilíndrica de acero inoxidable**, que

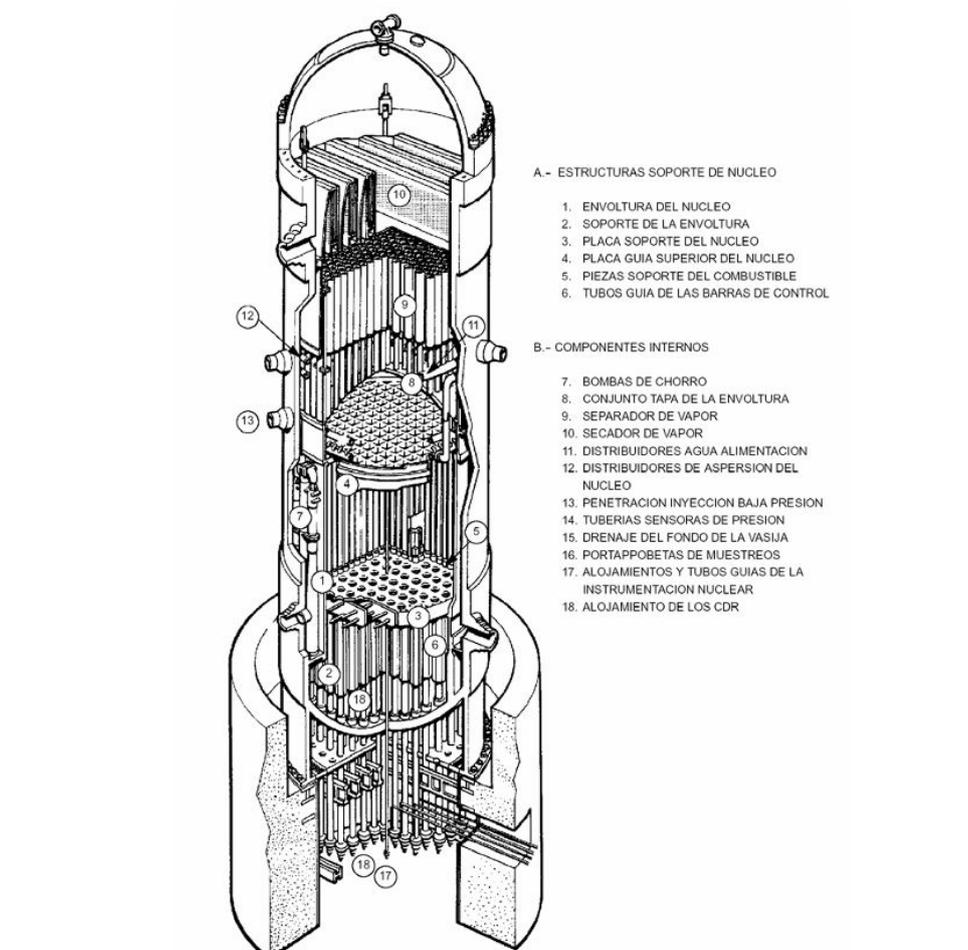


Figura 8.8: Componentes de un reactor BWR

cumple funciones clave como aislar los flujos de agua ascendente y descendente y transmitir cargas estructurales. En el espacio entre la vasija y esta envoltura se encuentran las **bombas de chorro**, dispositivos sin partes móviles que funcionan por efecto Venturi, creando una circulación forzada que mejora la refrigeración del núcleo. Este sistema permite incrementar la potencia del reactor sin complejidades mecánicas adicionales.

La vasija cuenta también con **tubos guías** para las barras de control, los cuales no solo sirven de guía sino que transmiten parte del peso del núcleo hacia la base de la estructura. Estos se conectan mediante alojamientos cilíndricos soldados al fondo de la vasija.

Cada conjunto de combustible se apoya sobre una **pieza soporte**, también de acero inoxidable, que canaliza el flujo del refrigerante hacia los elementos combustibles y permite el paso de las barras de control.

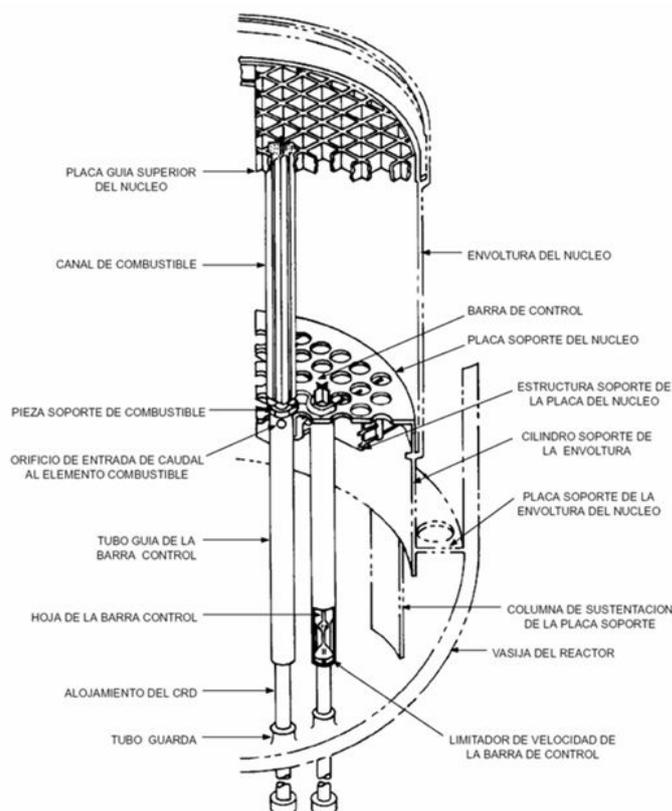


Figura 8.9: Núcleo y su estructura de soporte

Una vez que el calor generado en el núcleo convierte el agua en vapor, este pasa por un sistema de **separadores y secadores de vapor**. Los primeros, de tipo ciclónico, eliminan gran parte de la humedad girando el vapor para que las gotas de agua se proyecten hacia las paredes. Luego, los secadores, de tipo laberíntico, eliminan casi por completo la humedad restante, dejando el vapor listo para mover las turbinas.

El diseño del núcleo está cuidadosamente planificado para optimizar la **distribución del flujo de neutrones** y minimizar los picos de potencia. Se utilizan barras de combustible con diferentes niveles de enriquecimiento, varillas de agua para mejorar la moderación, y **venenos consumibles** como el óxido de gadolinio (Gd_2O_3) para controlar la reactividad al inicio del ciclo.

Los elementos combustibles se agrupan en canales con 64 varillas, mantenidas en posición mediante placas de sujeción y espaciadores. Cuatro de estos elementos, junto con una barra de control y su soporte, forman una **celda de combustible**.

Por último, existe un procedimiento llamado **precondicionado del combustible**,

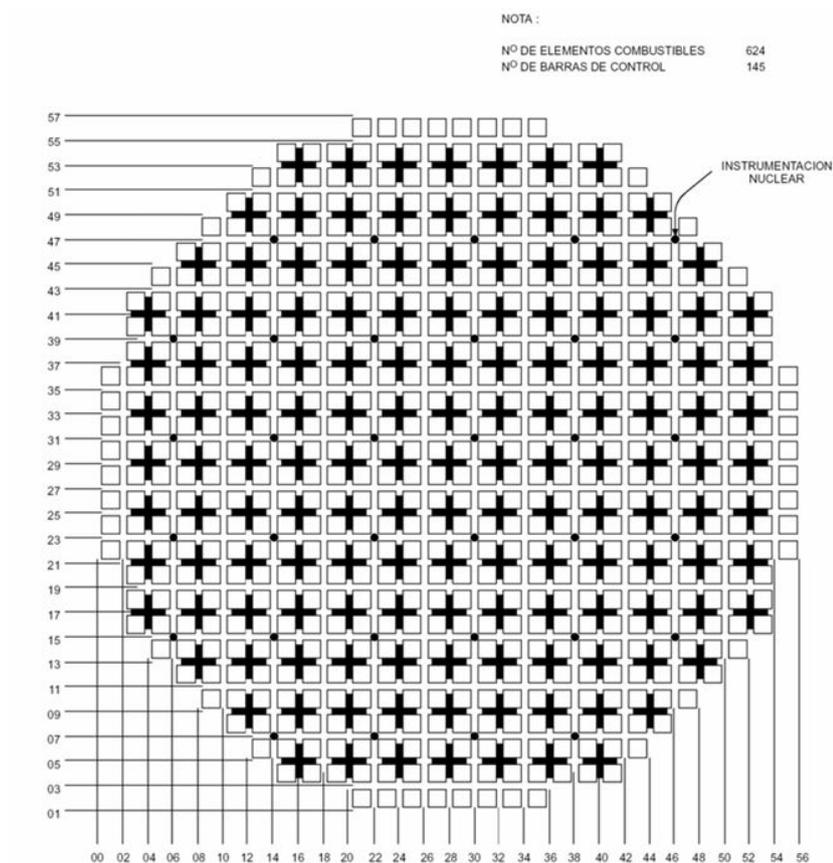


Figura 8.10: Configuración del núcleo

esencial para evitar grietas en las pastillas de UO_2 al inicio de su uso. Este consiste en realizar aumentos de potencia graduales para permitir que las pastillas se ajusten sin dañarse. No obstante, los nuevos diseños de **combustible de doble barrera**, con recubrimientos internos especiales y mejoras geométricas, permiten prescindir en gran medida de este procedimiento, mejorando así la seguridad y eficiencia de los reactores.

8.3.3. Reactores avanzados y modulares pequeños (SMR)

8.3.4. Reactores modulares pequeños (SMR)

Los **reactores modulares pequeños** (SMR, por sus siglas en inglés) son una propuesta tecnológica avanzada diseñada para superar las limitaciones de los grandes reactores convencionales. Con una capacidad inferior a **300 MW**, estos reactores destacan por su fabricación modular en serie, lo que reduce costos y tiempos de construcción (*Small modular reactors (SMR) | IAEA, s.f.*).

Entre sus ventajas clave se encuentra la **seguridad pasiva**, al incorporar sistemas que se detienen sin intervención humana ni energía externa (OIEA, 2022), y su **versatilidad**, ya que pueden emplearse para generar electricidad, calor industrial o agua desalada (IAEA, 2022). Además, optimizan el uso del combustible y generan menos residuos (*Advanced Nuclear Power Reactors - World Nuclear Association, s.f.*).

Actualmente, países como Canadá, EE. UU., Reino Unido y China lideran proyectos de SMR, explorando tecnologías como reactores rápidos o de sales fundidas. Grandes empresas tecnológicas y gobiernos los consideran pieza clave en la transición energética global (*Big Tech Is Paving the Way for a Nuclear Breakthrough - WSJ, s.f.*).

8.3.5. Reactores rápidos enfriados por sodio

Los **reactores rápidos enfriados por sodio** prescinden de moderador, lo que permite la utilización de neutrones rápidos para la fisión de actínidos como el ^{239}Pu . El **sodio líquido**, con alto punto de ebullición (**882 °C**), actúa como refrigerante eficiente sin necesidad de presiones elevadas, aunque presenta riesgos químicos relevantes (*Las tecnologías nucleares avanzadas y su papel en la transición energética | Foro Económico Mundial, s.f.*).

Estos reactores pueden funcionar como *reproductores*, generando más material fisible del que consumen (p. ej. ^{239}Pu a partir de ^{238}U) y transmutando actínidos menores como el americio, lo que reduce la radiactividad de los residuos (*Fast-neutron reactors, Fast nuclear reactors | IAEA, s.f.*).

Rusia (BN-600 y BN-800), India, China y Francia lideran el desarrollo de prototipos, clave en la sostenibilidad del ciclo del combustible y en la gestión eficiente de residuos nucleares (OIEA, 2022) (*Fast Neutron Reactors - World Nuclear Association, s.f.*).

8.3.6. Reactores de sales fundidas

Los **reactores de sales fundidas** (MSR) utilizan una mezcla líquida de fluoruros de litio, torio y uranio, ya sea como refrigerante o como medio que contiene el combustible. Operan a altas temperaturas (500–700 °C) sin presión extrema, mejorando la eficiencia térmica y la seguridad (*Molten Salt Reactors - World Nuclear Association, s.f.*).

Su diseño flexible permite configuraciones con combustible líquido o sólido. Muchos MSR incorporan el **ciclo de torio**, transformando ^{232}Th en ^{233}U , lo que reduce los residuos radiactivos de larga duración (*Molten salt reactors (MSR) | IAEA, s.f.*).

Una característica destacada es el **tapón de congelación**, que se funde ante sobrecalentamientos y drena el combustible a un contenedor seguro, enfriándose pasivamente (*Las tecnologías nucleares avanzadas y su papel en la transición energética | Foro Económico Mundial, s.f.*).

China y EE. UU. lideran los desarrollos actuales. Los MSR se exploran también para la descarbonización industrial y la producción de hidrógeno mediante electrólisis de alta temperatura.

8.3.7. Reactores de alta temperatura (HTR)

Los **reactores de alta temperatura** (HTR) operan a más de **750 °C**, usan **helio** como refrigerante (gas inerte, no radiactivo ni moderador), y permiten ciclos termodinámicos de alta eficiencia (ciclo Brayton), útiles en procesos industriales y producción de hidrógeno (IAEA, 2022).

Su combustible está compuesto por partículas recubiertas con carburo de silicio y grafito, lo que garantiza una contención robusta incluso en emergencias (*Las tecnologías nucleares avanzadas y su papel en la transición energética | Foro Económico Mundial, s.f.*).

Prototipos como el **HTR-PM** en China han sido ya conectados a la red. En Europa, se investiga su integración en sectores intensivos en carbono, como el acero y el amoníaco (*Nuclear Power Reactors - World Nuclear Association, s.f.*).

En conjunto, estos reactores avanzados ofrecen respuestas a los principales desafíos de la energía nuclear: sostenibilidad, eficiencia, seguridad y gestión de residuos. Con múltiples desarrollos en curso y un entorno internacional favorable, se consolidan como opciones estratégicas clave para un sistema energético del siglo XXI.

8.3.8. Prototipos de reactores de fusión

Para obtener energía útil mediante **fusión nuclear**, una mezcla de deuterio y tritio debe alcanzar temperaturas del orden de 10^8 K (unos 10 keV), suficiente para superar la repulsión electrostática entre núcleos. En tales condiciones, el material entra en estado de *plasma*, formado por iones y electrones libres. La **longitud de Debye** caracteriza su comportamiento colectivo, dada por:

$$L_D = \left(\frac{4\pi \varepsilon_0 kT}{e^2 4\pi n} \right)^{1/2},$$

donde n es la densidad del plasma. A $n = 10^{28} \text{ m}^{-3}$, $L_D \sim 10^{-8} \text{ m}$; si la densidad baja a 10^{22} m^{-3} , $L_D \sim 10^{-5} \text{ m}$. Es crucial que el tamaño del plasma sea mucho mayor que L_D y que existan muchas partículas en cada volumen de Debye para garantizar su confinamiento.

Durante la fusión, se generan pérdidas energéticas, entre ellas la **radiación de bremsstrahlung**, debida a la aceleración de electrones cerca de iones. Su potencia media por unidad de volumen se estima como:

$$P_{\text{br}} \approx 0,5 \times 10^{-36} Z^2 n n_e (kT)^{1/2} \text{ W/m}^3,$$

con kT en keV. Esta pérdida debe compensarse con la energía de fusión obtenida, siendo la reacción D-T la más eficiente:



liberando 17.6 MeV por reacción. Su energía por unidad de volumen es:

$$E_f = \frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v \rangle Q \tau,$$

y la energía térmica requerida:

$$E_{\text{th}} = 3 n k T.$$

Para que un reactor funcione de manera autosostenida, debe cumplir el **criterio de Lawson**, equilibrando el calor generado con las pérdidas.

Confinamiento magnético

El plasma, al ser conductor, puede confinarse mediante campos magnéticos que lo obligan a describir trayectorias helicoidales. Sin embargo, en geometrías cilíndricas puede escapar por los extremos, por lo que se emplean configuraciones toroidales como los **tokamaks**, donde se induce una corriente toroidal que genera un campo poloidal estabilizador.

Aunque parte del calentamiento se logra mediante resistencia ohmica, se requieren técnicas auxiliares como inyección de haces neutros o radiofrecuencia para alcanzar los 10–100 keV. Este método es actualmente el más desarrollado para lograr fusión controlada.

Confinamiento inercial

Aquí, una microesfera de D-T se comprime a densidades superiores a la de un sólido mediante pulsos láser o haces de partículas, alcanzando condiciones de ignición antes de desintegrarse. El proceso dura apenas nanosegundos, con potencias de hasta 10^{14} W. El método se basa en generar una onda de choque por ablación superficial, comprimiendo el núcleo.

A pesar de las enormes exigencias técnicas (eficiencia láser del 1–10 %, pérdidas por ablación, etc.), esta vía permite densidades extremas con tiempos de fusión mínimos.

Consideraciones finales

A temperaturas superiores a 4 keV en plasmas D-T, la energía de fusión puede superar las pérdidas por bremsstrahlung. Esto, sumado al confinamiento suficiente, permitiría alcanzar el **régimen de auto-mantenimiento**, donde las partículas alfa resultantes mantienen la temperatura sin aporte externo.

Aunque aún no se ha logrado un sistema industrialmente viable, los avances actuales han validado experimentalmente muchos de los requisitos físicos necesarios. El desarrollo continuo de técnicas de confinamiento y calentamiento mantiene abierta la promesa de una fuente de energía limpia, segura e inagotable (*Introductory-Nuclear-Physics-new-Krane_FissionAndFussion, s.f.*).

8.3.9. Avances en tecnologías de fusión controlada

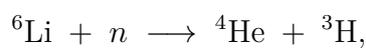
El desarrollo de tecnologías de fusión controlada avanza de forma continua tanto en el ámbito del **confinamiento magnético** como en el del **confinamiento inercial**. En este último, destaca el trabajo del *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL), donde el sistema láser *Nova* —basado en neodimio (Nd)— impulsó los primeros experimentos relevantes. A pesar de la capacidad de generar pulsos de alta intensidad con conversión a armónicos múltiples gracias al uso de materiales no lineales como el fosfato de dihidrógeno de potasio (KDP), su baja eficiencia (0,1 %) y los prolongados periodos de enfriamiento limitaron su aplicabilidad industrial.

Con el objetivo de mejorar la eficiencia energética, se han explorado otras alternativas como los **láseres de CO₂**, que alcanzan eficiencias del 10 % y mayor frecuencia de repetición, aunque enfrentan dificultades en la absorción eficaz del pulso sobre los *pellets* de combustible. En paralelo, se investigan **haces de protones o iones pesados** como herramienta de compresión, lo que podría permitir alcanzar las densidades y temperaturas necesarias para la ignición con mayor eficacia que los métodos ópticos convencionales.

Un hito clave se logró el **5 de diciembre de 2022**, cuando el LLNL, utilizando la *National Ignition Facility* (NIF), alcanzó una ganancia neta de energía por primera vez: se entregaron 2,05 MJ al combustible y se obtuvo una salida de 3,15 MJ, con una relación de ganancia de 1,5. Aunque el consumo total del sistema fue del orden de 400 MJ, este resultado confirmó la viabilidad física del proceso y revitalizó el interés global por la fusión como fuente energética limpia y sostenible.

No obstante, el **criterio de Lawson** continúa siendo el principal reto para lograr un balance energético neto positivo de forma sostenida. Las proyecciones actuales apuntan a que este objetivo podría alcanzarse en las próximas dos décadas si persisten los avances técnicos.

En los diseños conceptuales de reactores D-T, se optimiza la **extracción energética de los neutrones** generados en la fusión. Estos neutrones interactúan con litio líquido según:



proporcionando no solo calor útil para un ciclo térmico de vapor, sino también tritio regenerado para alimentar nuevamente el proceso. La escasez natural de tritio ha motivado la búsqueda de soluciones complementarias, como el uso de **helio-3** o el desarrollo de **reactores híbridos** que combinen fusión y fisión.

En resumen, pese a los desafíos tecnológicos y económicos, los avances recientes validan el potencial de la fusión como fuente energética. Si la tendencia en innovación continúa, es razonable esperar que la fusión juegue un papel protagónico en el sistema energético global en las próximas décadas.

8.4. Apéndice D - Cronología nuclear

8.4.1. El panorama nuclear en las últimas cinco décadas: desarrollo, innovación y políticas

8.4.2. Introducción

Durante las últimas cinco décadas, la energía nuclear ha atravesado un ciclo de expansión, estancamiento, transformación y renovación. La **fisión nuclear** se consolidó como una fuente energética en decenas de países tras la crisis del petróleo en los 70, mientras la **fusión nuclear** se mantuvo como objetivo de investigación estratégica a largo plazo. Actualmente, unos 30 países operan reactores nucleares que aportan cerca del 10 % de la electricidad mundial ([Gospodarczyk, s.f.](#)), aunque las trayectorias nacionales son diversas. Este capítulo analiza la evolución técnica y política de la energía nuclear, sus logros, retrocesos y el papel que desempeña en el contexto energético global.

8.4.3. Países que han apostado por la energía nuclear

Infraestructura de fisión exitosa y casos fallidos

Estados Unidos, Francia, Rusia, China, Japón, Canadá y Reino Unido fueron líderes históricos en la implantación de reactores de fisión. Francia destaca por generar más del 70 % de su electricidad mediante fisión, gracias a una decisión estratégica tras la crisis energética de los años 70 ([“Nuclear Energy Data – 2021”, s.f.](#)). EE.UU., aunque con 92 reactores operativos, redujo su expansión desde los años 80 debido a costes crecientes y al accidente de Three Mile Island (1979). Rusia mantuvo su desarrollo y ha integrado la exportación de tecnología nuclear como parte de su política exterior.

En Asia, China lidera actualmente la expansión nuclear con 24 de las 66 unidades en construcción en 2016 ([Mapped: The world’s nuclear power plants - Carbon Brief, s.f.](#)), mientras Japón redujo su dependencia tras el accidente de Fukushima (2011). India y Corea del Sur han desarrollado capacidades autónomas, incluyendo exportación de tecno-

logía en el caso surcoreano. Otros países como España, Suecia o Bélgica mantienen parte de su parque nuclear con políticas variables. En contraste, casos como Italia, Alemania o Austria abandonaron o clausuraron su infraestructura nuclear por presiones sociales, políticas o económicas.

Inversión en investigación de fusión

Los países con programas de fisión también lideraron la investigación en **fusión nuclear**. Desde el hito del tokamak soviético T-3 (1968), que sentó las bases para el desarrollo global del confinamiento magnético, la mejora en parámetros de plasma ha sido continua. En Europa, el proyecto JET logró en 2022 un récord de 59 MJ sostenidos en un pulso de 5 segundos ([Sample, s.f.](#)). El proyecto internacional ITER, actualmente en construcción, busca demostrar un rendimiento $Q = 10$ (500 MW de salida con 50 MW de entrada) en la próxima década ([What will ITER do?, s.f.](#)).

China (tokamak EAST), Corea del Sur (KSTAR), Japón (JT-60SA) y Alemania (Wendelstein 7-X) han construido instalaciones de vanguardia para explorar el confinamiento magnético. En paralelo, Estados Unidos ha liderado el confinamiento inercial con láseres. En 2022, el laboratorio NIF logró por primera vez una ganancia energética neta al generar 3.15 MJ con 2.05 MJ entregados al combustible ([Lavanya Ahire, s.f.](#)), abriendo una nueva etapa en la viabilidad de la fusión como fuente energética futura.

Comparación de estrategias y evolución

Las trayectorias nacionales reflejan diferentes prioridades. Francia y Japón apostaron por la seguridad de suministro; EE.UU. combinó desarrollo inicial con fuerte regulación posterior. En Europa Occidental, el factor clave ha sido la aceptación pública: países como Suecia o Bélgica reconsideraron políticas de abandono, mientras Alemania completó su cierre nuclear en 2023. Rusia y China han mantenido una apuesta constante, combinando fisión comercial, tecnologías avanzadas y liderazgo internacional. La India busca diversificar su mix con reactores de agua pesada y de torio.

En general, las decisiones sobre energía nuclear han respondido a eventos críticos

(crisis energéticas, accidentes nucleares), condiciones económicas (coste del capital, competitividad de alternativas) y voluntad política para sostener proyectos de largo plazo. Así, el mapa nuclear global presenta escenarios muy distintos: desde países con ciclos completos de combustible y decenas de reactores, hasta otros que abandonaron o nunca iniciaron el uso de energía nuclear.

Conclusión

En las últimas cinco décadas, la energía nuclear ha evolucionado desde una promesa de modernidad hasta consolidarse como una herramienta más del sistema energético. La fisión ha ofrecido estabilidad energética en múltiples países, con mejoras continuas en seguridad y eficiencia. La fusión, por su parte, ha superado hitos que legitiman su desarrollo como una opción viable para la segunda mitad del siglo XXI.

El futuro podría contemplar un modelo energético donde **fisión y fusión se complementen**, contribuyendo a un sistema limpio, abundante y seguro, adaptado a las necesidades y prioridades de cada región.

8.4.4. Países que han abandonado o rechazado la energía nuclear

Varios países decidieron cerrar sus centrales nucleares o prohibir su desarrollo, impulsados por preocupaciones de seguridad, residuos radiactivos, presión social o costes económicos.

- **Alemania** completó en 2023 su *Ausstieg* nuclear, acelerado tras Fukushima, pese a advertencias de la AIE y la IEA sobre el posible aumento de emisiones y dependencia energética (*Nuclear Power in Germany - World Nuclear Association, s.f.*). La transición supuso una inversión adicional de €240 mil millones en renovables, redes y respaldo fósil, elevando temporalmente la generación con carbón y gas (*Wehrmann, s.f.*).
- **Italia** cerró sus cuatro reactores tras el referéndum de 1987. Desde entonces, prohíbe

constitucionalmente la nuclear y depende de importaciones eléctricas, especialmente de Francia, además de renovables.

- **Austria** nunca llegó a activar su única planta nuclear (Zwentendorf), bloqueada por referéndum en 1978. Desde entonces, mantiene una postura antinuclear activa a nivel europeo.
- **Lituania** cerró la central de Ignalina (tipo RBMK) por exigencia de la UE, perdiendo autosuficiencia eléctrica. Aunque propuso construir una nueva planta (Vilinis), el proyecto no se concretó.
- Otros países como **Dinamarca, Australia, Irlanda** o **Noruega** prohíben explícitamente la energía nuclear, y casos como **Filipinas, Kazajistán** o **Suiza** abandonaron o congelaron sus programas. En **Suecia** y **Bélgica** se han revisado políticas de cierre, permitiendo mantener o extender reactores en función del contexto energético.

En general, estas decisiones implicaron un giro hacia renovables y eficiencia, aunque también mayores importaciones, desmantelamientos costosos o emisiones adicionales en el corto plazo.

En contraste, la **fusión nuclear** no ha enfrentado rechazo político o social explícito: países contrarios a la fisión (como Alemania o Austria) participan activamente en investigación de fusión, como en el W7-X o en proyectos del programa ITER. Esto se debe a su perfil más seguro y limpio, y a que aún no es una tecnología comercial expuesta a riesgo social o ambiental directo.

8.4.5. Investigación técnica en fisión y fusión

Fisión nuclear

En fisión, los reactores de **Generación III+** (como el EPR o AP1000) incorporan mejoras de seguridad pasiva y eficiencia, ya operativas en países como China, Finlandia o EE.UU. Simultáneamente, el **Generation IV International Forum (GIF)** investiga

diseños más disruptivos: reactores rápidos de sodio y plomo, de sales fundidas, de gas de alta temperatura o con agua supercrítica (*Nuclear Energy Agency (NEA) - New GIF Framework Agreement to ensure international co-operation on Generation IV systems, s.f.*).

Algunos prototipos ya están en marcha: el **HTR-PM** chino, el **BN-800** ruso o el CAREM25 argentino. Los **reactores modulares pequeños (SMR)** son otra línea prometedora, con múltiples diseños en licenciamiento (NuScale, BWRX-300, etc.), apuntando a reducir costes y aumentar flexibilidad. Según la AIEA, los SMR podrían representar hasta un 24 % de la nueva capacidad nuclear hacia 2050 (*Hunt, s.f.*).

En **gestión de residuos**, destacan los repositorios geológicos como **Onkalo** (Finlandia) o el aprobado en Suecia (2022), así como el reciclaje de combustible dominado por Francia y Rusia. Además, la fiabilidad operativa de los reactores actuales ha mejorado: los factores de carga superan el 85 %, gracias a modernizaciones y extensión de vida útil a 60-80 años (*Nuclear Power in the World Today - World Nuclear Association, s.f.*; *Marta M. Gospodarczyk, s.f.*).

Fusión nuclear

La fusión ha dado pasos claves, como la **ignición lograda en 2022 en el NIF**, que produjo más energía de fusión (3.15 MJ) que la entregada al combustible (2.05 MJ) (*Lavanya Ahire, s.f.*). En confinamiento magnético, JET logró 59 MJ sostenidos durante 5 s en 2021, y el tokamak EAST alcanzó 120 millones °C durante 17 minutos (*Chinese Academy of Sciences, s.f.*). Stellarators como W7-X han demostrado plasmas estables de larga duración.

El desarrollo de **superconductores de alta temperatura** (como el imán de 20 T del MIT) promete reducir el tamaño de futuros reactores, base del proyecto SPARC. Además, proliferan iniciativas privadas (Commonwealth, Helion, TAE, etc.) con enfoques alternativos.

ITER, el mayor proyecto internacional en marcha, apunta a alcanzar $Q = 10$ (500 MW de salida) con primeros plasmas hacia la próxima década (*What will ITER do?, s.f.*).

También avanza IFMIF para ensayos de materiales, y EUROFUSION coordina esfuerzos europeos hacia un prototipo eléctrico en 2040 (DEMO).

Desafíos técnicos

- *Fisión*: La gestión a largo plazo de residuos radiactivos, la reducción de riesgos de proliferación y la mejora económica (costes y tiempos de construcción) siguen siendo los retos clave. Se busca mayor flexibilidad operativa para integrarse con energías renovables, así como nuevos modelos modulares que permitan desplegar reactores más rápido y con menor inversión inicial.
- *Fusión*: El principal reto es sostener un **balance energético positivo** de forma estable e industrial. Se requiere dominar el **comportamiento del plasma** durante largos pulsos, desarrollar materiales resistentes a la radiación de neutrones rápidos, y resolver la producción autosuficiente de **tritio** en el interior del reactor (blanket). Además, se debe optimizar la ingeniería de sistemas complejos (imanes, criogenia, control de calor) y demostrar que es competitiva en coste.

A pesar de estos desafíos, el progreso acumulado en ambas tecnologías muestra que la energía nuclear –en sus dos formas– sigue avanzando como una alternativa seria, segura y con enorme potencial para abastecer de forma sostenible la demanda energética del futuro.

8.4.6. Factores económicos y políticos en la energía nuclear

Impacto de crisis energéticas en la adopción o rechazo

La evolución de la energía nuclear ha estado estrechamente influida por las crisis energéticas y los eventos nucleares a lo largo del tiempo. La **crisis del petróleo de 1973** impulsó una expansión nuclear sin precedentes: países como Francia y Japón implementaron políticas para reducir su dependencia del crudo importado mediante el desarrollo de un parque nuclear sólido y autónomo (*Nuclear fusion heat record a 'huge step' in quest*

for new energy source / Nuclear power / The Guardian, s.f.). En el caso francés, el plan nuclear surgió como respuesta directa al “primer shock petrolero”, logrando independencia eléctrica mediante reactores construidos en serie.

Sin embargo, este auge se vio parcialmente frenado por crisis internas al sector. El accidente de **Three Mile Island** (1979) en EE.UU. y el desastre de **Chernóbil** (1986) deterioraron la percepción pública y endurecieron las regulaciones, lo que encareció y ralentizó la construcción de nuevas plantas, especialmente en democracias occidentales.

En los años 2000, el protagonismo climático revitalizó el interés nuclear: informes del IPCC (2007, 2014) destacaron la necesidad de tecnologías bajas en carbono para mitigar el calentamiento global (*Response from World Nuclear Association to the release of the IPCC Working Group III report, Climate Change 2022: Mitigation of climate change - World Nuclear Association, s.f.*). Esto promovió una “renacimiento nuclear”, especialmente en países como Reino Unido, que revertieron su retirada.

Más recientemente, la **crisis energética de 2021–2022**, agudizada por la guerra en Ucrania, puso en evidencia la fragilidad de las cadenas de suministro de combustibles fósiles. Países como Francia, Países Bajos y Bélgica renovaron sus apuestas nucleares, mientras que Alemania mantuvo su postura de cierre, pese al encarecimiento de la energía y mayor uso de carbón a corto plazo.

Modelos de financiación y regulación

La energía nuclear requiere **altos costos de capital**, largos períodos de construcción y riesgos financieros elevados. Según el contexto político y económico, los países han adoptado distintos modelos para financiar sus proyectos:

- **Modelo estatal directo:** China y Rusia financian proyectos mediante empresas estatales y bancos públicos.
- **Apoyo estatal en mercados liberalizados:** Reino Unido garantiza precios mediante contratos por diferencia (£92,5/MWh durante 35 años para Hinkley Point C) (*“Nuclear Energy Data – 2021”, s.f.*).

- **Consortios público-privados:** Ejemplo de Barakah (Emiratos Árabes), financiado con ayuda coreana y capital mixto.
- **Modelo llave en mano:** Rusia (Rosatom) ofrece financiamiento y operación directa, como en Akkuyu (Turquía).

En paralelo, la **regulación internacional** se ha vuelto más estricta tras los accidentes, aumentando tiempos y costes. Para nuevos diseños (especialmente SMRs), organismos como la AIEA promueven una **armonización de licencias** para facilitar su despliegue global (*Nuclear Power in Germany - World Nuclear Association, s.f.*).

La estructura de costos nuclear es particular: **fijos muy altos, variables bajos**. Esto implica que, una vez construida, la planta puede generar electricidad barata, pero requiere operar a máxima capacidad durante décadas para recuperar la inversión. En mercados liberalizados, sin apoyo estatal, esto ha provocado el cierre prematuro de reactores que seguían siendo técnicamente viables.

Por ello, algunos gobiernos han implementado mecanismos correctivos: **créditos fiscales** (EE.UU.), **pagos por capacidad** o tarifas reguladas que reconozcan el valor sistémico de la nuclear más allá del precio *spot*.

Postura de organismos internacionales

Los organismos globales con competencias técnicas y climáticas han defendido un papel relevante para la energía nuclear en la transición energética:

- La **IAEA** subraya que la energía nuclear es una fuente **baja en carbono**, segura y continua, que complementa a las renovables. En su informe *Climate Change and Nuclear Power 2022*, proyecta que la capacidad nuclear global podría crecer de 372 GW en 2023 a **950 GW para 2050** en escenarios climáticos ambiciosos (*Hunt, s.f.*).
- El **IPCC**, en su 6º Informe de Mitigación (2022), reconoce que para cumplir el objetivo de 1.5 °C es necesaria una combinación de renovables, eficiencia y fuentes

firmer como **la nuclear y la bioenergía con captura de carbono** (*Response from World Nuclear Association to the release of the IPCC Working Group III report, Climate Change 2022: Mitigation of climate change - World Nuclear Association, s.f.*). Sus escenarios prevén aumentos de hasta 500 % en capacidad nuclear para 2050 respecto a 2010.

- La **IEA** advierte que el declive nuclear dificultaría la estabilidad de sistemas eléctricos con alta penetración renovable, y aboga por mantener y ampliar esta fuente allí donde sea socialmente aceptada (“*Nuclear Energy Data – 2021*”, s.f.).
- La **OECD-NEA** y la **WNA** destacan que una combinación de nuclear y renovables reduce el coste total del sistema energético descarbonizado, al minimizar la necesidad de almacenamiento y respaldo.

En la COP28 (2023), más de **20 países firmaron una declaración para triplicar la capacidad nuclear** al 2050 como parte del esfuerzo climático global (*At COP28, Countries Launch Declaration to Triple Nuclear Energy Capacity by 2050, Recognizing the Key Role of Nuclear Energy in Reaching Net Zero | Department of Energy, s.f.*), reflejando un creciente consenso técnico-político sobre su papel.

No obstante, algunos sectores ecologistas tradicionales como Greenpeace siguen mostrando fuerte oposición por riesgos y residuos, mientras que otros movimientos ambientales más recientes reconsideran su rol en función de la urgencia climática. La fusión, por su parte, no enfrenta el mismo nivel de oposición social ni política, ya que no presenta riesgos de reacción en cadena ni residuos de alta actividad.

Conclusión

La historia de la energía nuclear ha oscilado entre entusiasmo y rechazo, impulsada por crisis energéticas, accidentes, costos y avances técnicos. La **fisión nuclear** es hoy una tecnología madura, con mejoras significativas en seguridad, eficiencia y gestión de residuos. La **fusión**, aún en desarrollo, avanza a ritmo constante hacia su viabilidad técnica y económica.

Desde un punto de vista económico, la nuclear requiere condiciones favorables de inversión, modelos de financiación estables y aceptación social. Desde lo político, las decisiones sobre su adopción o rechazo han respondido tanto a los riesgos percibidos como al contexto geopolítico y ambiental de cada país.

Como destacan la IAEA, el IPCC y otros organismos, alcanzar los objetivos de descarbonización exigirá aprovechar todas las fuentes limpias disponibles. Si la nuclear—tanto en su forma de fisión como de fusión—supera sus retos, puede desempeñar un **papel complementario crucial** en el suministro energético del siglo XXI.