

La fusión nuclear como fuente masiva de energía

José Manuel Perlado Martín



DESCRIPTORES

FUSIÓN NUCLEAR
 CONFINAMIENTO MAGNÉTICO
 CONFINAMIENTO INERCIAL
 PLASMAS
 TECNOLOGÍA NUCLEAR
 ITER
 NIF
 PLANTAS DE POTENCIA
 PERSPECTIVA TEMPORAL DEMOSTRACIÓN
 TECNOLOGÍA DE POTENCIA

Introducción

En estos momentos de la investigación y desarrollo de la fusión nuclear como fuente masiva de energía, el estado de su tecnología es, en buena medida, el de un área de conocimiento que precisa aún de elementos básicos para su implantación efectiva. Sin embargo, bien es cierto que *las líneas fundamentales en las que estará asentada esa tecnología están ya establecidas de manera firme*. Nos encontramos frente a dos opciones para la realización comercial de la fusión termonuclear: la *magnética* y la *inercial*, cada una de las cuales dicta su propia tecnología, aún reconociendo en su desarrollo diversos componentes comunes.

Si nos situamos en el *aquí y ahora*, aparecen los siguientes proyectos: ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), de *confinamiento magnético* (Fig. 1), y el Programa de Acompañamiento (*Broader Approach*, financiado en estos momentos solo por la Unión Europea y Japón) que lleve a los sistemas DEMO y comerciales; y NIF (*National Ignition Facility*), de EEUU, y su análogo francés LMJ (*Laser MegaJoule*), de *confinamiento inercial*, y las iniciativas como HiPER (*High Power laser Energy Research*) que plantean la marcha hacia un sistema de ingeniería que sirva para un DEMO inercial. Una diferencia separa ambas aproximaciones: en el caso del ITER, la tecnología componente de un posterior reactor que demuestre la ingeniería y la proyecte hacia un *aparato* comercial está integrada y contemplada en cierta medida en su plan de experimentación; sin embargo, en las instalaciones NIF y LMJ no se contempla nada más que la demostración científica de la ganancia energética y, en una pequeña fracción, la comprobación de parte de la física fundamental que justificaría la elección de algunos de los componentes tecnológicos previstos para una futura planta de potencia, cuya demostración vendría asociada a HiPER u otras iniciativas similares en fusión inercial. En cualquier caso, es

imprescindible que otros experimentos a menor escala demuestren los principios físicos de otros (los muchos) componentes tecnológicos que compondrán el dispositivo de generación de potencia, como también otras opciones de confinamiento *no tan en el mercado* como puede ser la línea de los grandes dispositivos *stellarator helicoidales* o los *tokamak esféricos* (en magnético); o el uso de láseres mucho más eficientes y por supuesto repetitivos; la combinación de láseres de alta potencia con los de alta intensidad (en lo que se ha dado en llamar *ignición rápida*); el uso de *iones pesados*; o el uso de dispositivos *Z-pinch* que generen intensos campos de radiación (en el caso de la inercial).

Ventajas y dificultades en la consecución de la fusión nuclear

Ventajas de la fusión nuclear para la generación de energía

La *primera ventaja* es la enorme *abundancia* que hay de nucleidos ligeros y, en particular, de deuterio. El deuterio se encuentra en el agua a razón de 34 gramos de deuterio por cada tonelada de agua; esto supone que el contenido energético de los océanos sea al menos un millón de veces el de todos los recursos de los combustibles fósiles. Admitiendo que se puede obtener por fusión una energía de cinco millones de electronvoltios de energía cinética por cada núcleo de deuterio (MeV/deuterón), el total de energía extraíble de un metro cúbico de agua por fusión sería de aproximadamente 8×10^{12} J, lo que equivale a algo menos de 200 toneladas de petróleo. Si el contenido total de agua de mar es de unos $1,5 \times 10^9$ km³, se dispondría de un potencial energético del deuterio total de $1,2 \times 10^{31}$ J. Una sencilla división de esta magnitud de recursos de combustible entre la demanda mundial en el año 2000 nos sitúa en un periodo de 30.000 millones de años de duración. El

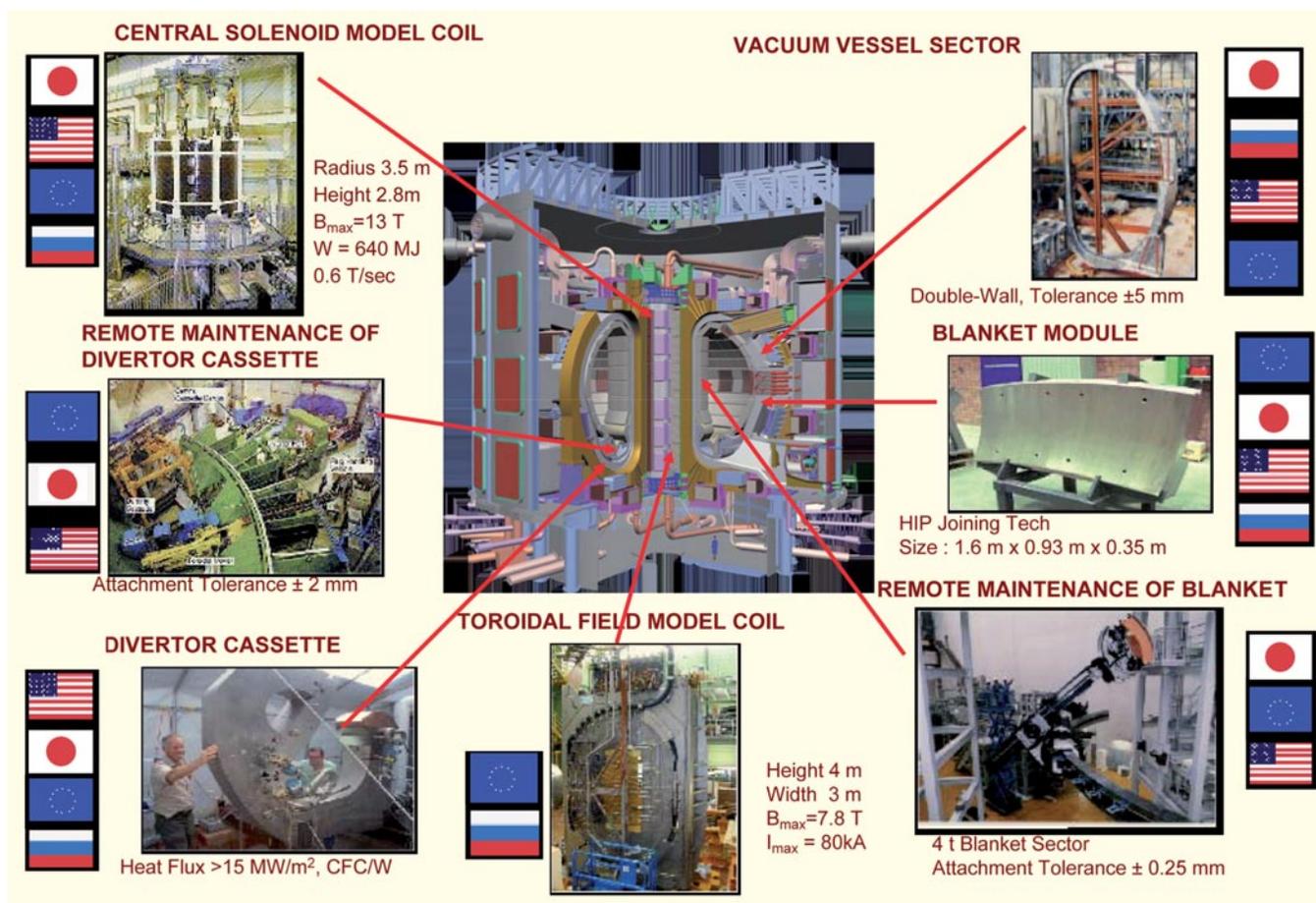


Fig. 1. Proyecto de fusión nuclear por confinamiento magnético ITER.

otro combustible empleado en la fusión nuclear es el tritio, que no se encuentra en la naturaleza, pero que puede obtenerse bombardeando el litio con neutrones que nacen en la propia reacción de fusión; el litio se encuentra en el agua a razón de 0,7 gramos por cada tonelada de agua, y esta proporción sube hasta 20 partes por millón en la corteza terrestre. Su potencialidad energética (producción de tritio) se puede estimar en $14,1 \times 10^3$ kWh/t, lo que, al ritmo de consumo del año 2000, supone varios millones de años de duración. Es decir, las reservas de deuterio, de litio y de otros elementos ligeros son tan considerables que pueden abastecer energéticamente a toda la humanidad mientras exista vida sobre la Tierra.

Una *segunda ventaja* consiste en que los combustibles empleados en la fusión nuclear están al *alcance de casi todos los países*, sin tener que someterse al monopolio de los países con combustibles fósiles. Además, el *coste* del deuterio es muy *reducido*, del 0,1 % al 1 % del coste de los combustibles fósiles, por unidad de energía producida.

La *tercera ventaja* de la fusión nuclear es su considerable *limpieza radiactiva*. Lo primero que hay que decir claramente es que la reacción de fusión nuclear no es intrínsecamente radiactiva (es decir, no produce productos radiactivos en la reacción). Los reactores de fusión nuclear de primera generación emplearán como combustible el deuterio, que es un isótopo estable, no radiactivo, y el tritio que es un emisor beta, y, por tanto, radiactivo, pero de corta vida media (solo 12,5 años). La radiactividad inducida en estos reactores provendrá

del mecanismo físico por el que los neutrones producidos en la fusión *activan* (término por el que se conoce la generación de isótopos radiactivos a partir de aquellos que originalmente no lo son) los materiales estructurales. Sin embargo, si comparamos un reactor de fusión nuclear con otro de fisión nuclear de igual potencia, se obtiene que la dosis radiactiva producida por un reactor de fisión nuclear es de 1.000 a 10.000 veces superior a la producida por uno de fusión nuclear por confinamiento magnético o inercial, respectivamente. Además, la investigación permitirá el desarrollo de materiales que minimicen dicha generación de isótopos radiactivos, siendo este uno de los programas más importantes en el desarrollo actual de la fusión. Existen investigaciones actuales sobre el empleo de aceros basados en aleaciones de hierro y cromo, materiales compuestos basados en el carburo de silicio y/o carbono, aleaciones de vanadio y otros materiales de baja activación que la harán mínima y despreciable tras un periodo de decenas de años. Además, se están investigando otros combustibles para la fusión nuclear no radiactivos y que no produzcan neutrones, como el protón-boro 11, que da lugar a tres núcleos de helio 4.

La *cuarta ventaja* es la *seguridad intrínseca* de los dispositivos de fusión nuclear, lo que significa que frente a los procesos de operación y accidente en el sistema no aparecen condiciones que permitan la liberación de residuos radiactivos a la atmósfera, que es la única condición accidental posible. No hay un accidente intrínseco del sistema, aunque efectivamente



te se deberá vigilar la posibilidad de liberación de cantidades de isótopos radiactivos como el tritio o los potenciales productos de activación generados y/o transportados en el sistema de refrigeración.

Puntos débiles/dificultades actuales de la fusión nuclear

Las dificultades actuales para el uso de la fusión nuclear como generador de energía pasan por la *complicación científica* en la obtención del proceso en sí mismo y los retos tecnológicos (y este es el principal problema) que aún quedan por resolver para conseguir la planta de potencia comercialmente competitiva.

Científicamente, el primer problema aparece cuando se quiere unir, es decir, fusionar, dos núcleos, que al estar cargados positivamente se repelen electrostáticamente. El procedimiento más fácil para superar esa repulsión —llamado *fusión en caliente* o *termonuclear*— consiste en calentarlos a una temperatura —llamada *de ignición*— tal que la energía cinética que adquieran compense la repulsión coulombiana, hasta que entren en contacto y actúe la fuerza nuclear. En el caso de los isótopos del hidrógeno —deuterio y tritio—, la temperatura de ignición es superior a los 50 millones de grados, y cuando solo se emplea deuterio la temperatura de ignición sube a los 400 millones de grados. En los casos de otros nucleidos ligeros distintos del hidrógeno, la temperatura es aún mayor: en el caso del protón-boro 11 es de unos 2.000 millones de grados; en el del oxígeno, de unos 3.000 millones; y en el del silicio, de unos 5.000 millones de grados. Por tanto, es lógico pensar que los primeros reactores de fusión nuclear emplearán como combustible el de menor temperatura de ignición, es decir, el deuterio y tritio. A estas temperaturas de decenas de millones de grados, el medio está formado por iones —o sea, por átomos a los que les faltan algunos o todos los electrones corticales— y por electrones libres, constituyendo lo que se llama un plasma, con las características (algo especiales) de un fluido.

El segundo problema se basa en el hecho de que cuando los núcleos de deuterio y tritio chocan entre sí, hay una probabilidad muy pequeña de que se fusionen. Aproximadamente, de cada millón de colisiones solo una produce fusión, es decir, energía; las restantes son choques elásticos, como si fuesen entre bolas de billar. Para dar opción a que puedan chocar varias veces entre sí y se produzca su fusión, es necesario que estén confinados. Es decir, es necesario disponer de un plasma a más de 50 millones de grados confinado en un medio, para que no puedan escapar de él sus núcleos componentes. El problema no solo radica en calentar el plasma a estas elevadas temperaturas; el verdadero problema consiste en mantenerlo confinado durante un tiempo —llamado *de confinamiento*— para que se produzcan suficientes fusiones y, por tanto, suficiente energía para compensar la energía empleada en el calentamiento y confinamiento, y en las diversas pérdidas del sistema.

Desde el punto de vista tecnológico es necesario aún comprobar una gran parte de sus tecnologías para una planta de potencia.

Fusión por confinamiento magnético:

- Funcionamiento estacionario continuo (alargamiento del ciclo: ¿otros aparatos?).
- Materiales resistentes a una fluencia térmica muy elevada (por efecto de la interacción con las partículas cargadas y de la radiación) y también resistentes a la irradiación neutrónica.
- Materiales que sean de activación neutrónica reducida o muy baja, de manera que se minimicen los residuos al final de vida de la planta y generen un muy pequeño volumen controlable en pocos años en superficie.
- Diseño final efectivo y demostrado de las envolturas responsables de la extracción segura de energía y de la reproducción de tritio en la planta.
- Diseño final efectivo del elemento *divertor*, capaz de aguantar las cargas térmicas a las que estará sometido durante una vida lo más larga posible.
- Comprobación de los sistemas en general y del mantenimiento remoto en particular (incluyendo diagnosis) bajo condiciones extremas de radiación.
- Demostración de los sistemas superconductores.

Fusión por confinamiento inercial:

- Elegir la opción óptima entre ignición central y rápida y las tecnologías involucradas.
- Demostrar las fuentes de iluminación láser de alta eficiencia (al menos > 10%) y de alta capacidad de repetición (1-5-10 pulsos por segundo), con energías de algunos megajulios en el caso de ignición central y de algunos cientos de kilojulios para la ignición rápida, combinado, en este caso, con un láser de algún kilojulio y con potencia de petavatios. La otra opción sería la demostración de una fuente de iluminación de esas características, pero basada en iones pesados.
- Demostrar la capacidad de fabricación de las cápsulas combustibles de una manera masiva y con alta capacidad de repetición, junto a sus sistemas de inyección y seguimiento para su posicionamiento correcto en el interior de la cámara de reacción.
- Demostrar las envolturas de los reactores (como en magnético), pero, en este caso, quedaría la posibilidad de alcanzar desarrollos tecnológicos capaces de proteger la primera pared estructural del reactor mediante dispositivos fluidos.

Proyectos construidos, en construcción o cuya construcción está decidida

Proyecto ITER

El Reactor Termonuclear Experimental Internacional (ITER) (Fig. 1), que se construirá con apoyo de Europa, Japón, Rusia, EEUU, China, Corea del Sur e India, hasta donde llega el acuerdo alcanzado originalmente a fecha de septiembre de 2003 y finalmente *firmado el 21 de noviembre de 2006 por todos esos socios*, deberá demostrar la viabilidad científica y tecnológica de obtener energía mediante la fusión por confinamiento magnético. Para lograrlo, ITER tendrá que probar la producción de potencia (500 MW) con una ganancia 10 sobre la invertida en los procesos de calentamiento y confinamiento, y

las tecnologías esenciales necesarias para ello, en un sistema integrado, y también deberá realizar la prueba de todos los elementos clave para utilizar la fusión como fuente práctica de energía. ITER será el primer dispositivo de fusión capaz de producir energía térmica al nivel de cualquier central eléctrica comercial, con el tamaño de esta, con un periodo de operación de 20 años y un coste mínimo estimado en 5.000 M€ (actualmente, con un seguro aumento de coste en magnitudes aún sin fijar definitivamente, pero que se van, al menos, a 3.000 M€ más) en su periodo de construcción y otros 5.000 M€ en sus 20 años de operación. La distribución de costes (su construcción se está realizando en Cadarache, Francia) es de 5/11 por parte de Europa y 1/11 para cada uno de los otros seis socios. Su esquema de construcción ha pasado por tener la licencia a finales de 2008, lo que se consiguió, y durante el año 2009 y hasta la actualidad se ha procedido a los procesos de excavación y comienzo de obra civil, elaborando en este tiempo último de 2009 y 2010 los procesos de licenciamiento como instalación nuclear. Está previsto acabar la edificación y comenzar la instalación/ensamblaje de la máquina (*tokamak*) propiamente dicha en los primeros meses de 2012, y generar quizás el primer plasma en los meses finales de 2019 (aún por definir finalmente en función de un nuevo estudio de riesgos que se debe realizar), con el primer plasma de ignición y potencia con DT en 2024 (siempre fechas aproximadas).

El ITER está diseñado como una enorme configuración toroidal (*tokamak*) en la que se crean y mantienen las condiciones para las reacciones controladas de fusión. El volumen del plasma en el ITER debe ser suficientemente grande como para asegurar que se alcancen altas condiciones de la multiplicación de energía. Los imanes superconductores confinan y controlan el plasma que reacciona, además de inducir en él la corriente eléctrica responsable de otra componente de confinamiento. La energía generada en las reacciones de fusión es absorbida por los componentes que envuelven la superficie interior de la vasija. En una planta de potencia, la cámara de reacción absorberá la energía transportada por los neutrones del plasma a través de un dispositivo de refrigeración y debe regenerar el tritio que ha sido consumido, de manera que se mantenga el balance positivo neto de dicho elemento combustible; pero, en el ITER, estos elementos no son necesarios. La extracción de calor es por pura disipación radiativa (transmisión de calor) a través de los elementos estructurales que se calentarán de la primera pared, y no existirá un sistema de generación de tritio intrínseco. Bien es cierto que estos dos elementos serán verificados en experiencias dedicadas en zonas limitadas del sistema como módulos experimentales, pero no como cobertura total de la pared. Es preciso disponer de un dispositivo crítico (*divertor*) que desvíe el flujo de las partículas cargadas producidas en las reacciones de fusión hacia paredes de sacrificio debidamente refrigeradas; este elemento se contempla como crítico en este momento. La vasija y las bobinas superconductoras están dentro de una coraza criogénica térmicamente protegida para mantener las temperaturas que son necesarias para la superconductividad. Existen puertos de acceso al plasma para calentarlo, diagnos-

ticarlo y realizar pruebas en la cámara del reactor, además de su mantenimiento remoto. Objetivo fundamental de ITER es demostrar la seguridad y el control completo de una planta de potencia de fusión. De su lectura se observa que los componentes principales son:

- Sistemas de confinamiento magnético tanto poloidales como toroidales, y el solenoide central, todos de naturaleza superconductora.
- Cámara o vasija de vacío estructural.
- Sistemas de envoltura para la refrigeración y reproducción de tritio.
- Divertores y limitadores.
- Dispositivos de calentamiento.
- Criostatos.

Proyectos NIF y LMJ

La respuesta a nivel de ignición de la fusión inercial la dan NIF (en el Laboratorio Nacional de Lawrence Livermore, EEUU) y LMJ (en el CEA/Cesta, Burdeos, Francia). Ambas tienen como propósito conseguir demostrar experimentalmente la ignición del combustible (DT) e incluso una pequeña ganancia energética en la instalación (10-30), entendida como la relación entre la energía generada por fusión en blancos de iluminación indirecta y directa, y la *energía depositada en dicho blanco*. No se menciona la energía total consumida en el parque eléctrico para hacer funcionar el láser. Esto es así porque los láseres construidos en ambas instalaciones, responden a un concepto muy evolucionado de los *clásicos* de neodimio cristal con excitación por lámparas de destello, para poder dar la energía tan elevada que se les solicita (≈ 2 MJ) en tiempos de nanosegundos. De suerte que su eficiencia es baja y su repetición nula. Pero es que el objetivo no es toda la tecnología de la planta, sino la demostración, en pulso de iluminación simple, de que es cierto que se puede obtener del blanco más energía que la que se deposita en él. En la investigación de fusión inercial se mantienen abiertas por otro lado el área de desarrollo de la iluminación eficiente y repetitiva, y la de la tecnología de la cámara. Los datos más fundamentales del NIF son la ganancia energética de 10-30 usando un número total de haces de 192 y la energía total liberada por el láser en el blanco de 1,8 MJ, y se investigarán ambas opciones de iluminación, directa e indirecta (ver cápsulas en Fig. 2). En el caso del LMJ francés, el número total de haces será de 240 y la energía total liberada aproximadamente la misma. En el caso del experimento francés, la aproximación al sistema final ha sido algo distinta puesto que el CEA ha decidido construir primero, en un espacio y una cámara aparte, un solo haz prototipo, conocido con el nombre de *Ligne d'Integration Laser* (LIL), con las mismas características que los del dispositivo final. LIL está ya operativo con una energía en el tercer armónico del neodimio cristal ($0,35 \mu\text{m}$) de 60 kJ. NIF se aproxima de una manera más integral dentro del mismo espacio físico que será la cámara del dispositivo, pero tendrá (tal y como están planteados en la actualidad ambos proyectos) la ventaja de disponer de una flexibilidad tal en la disposición de los 192 haces que le permi-



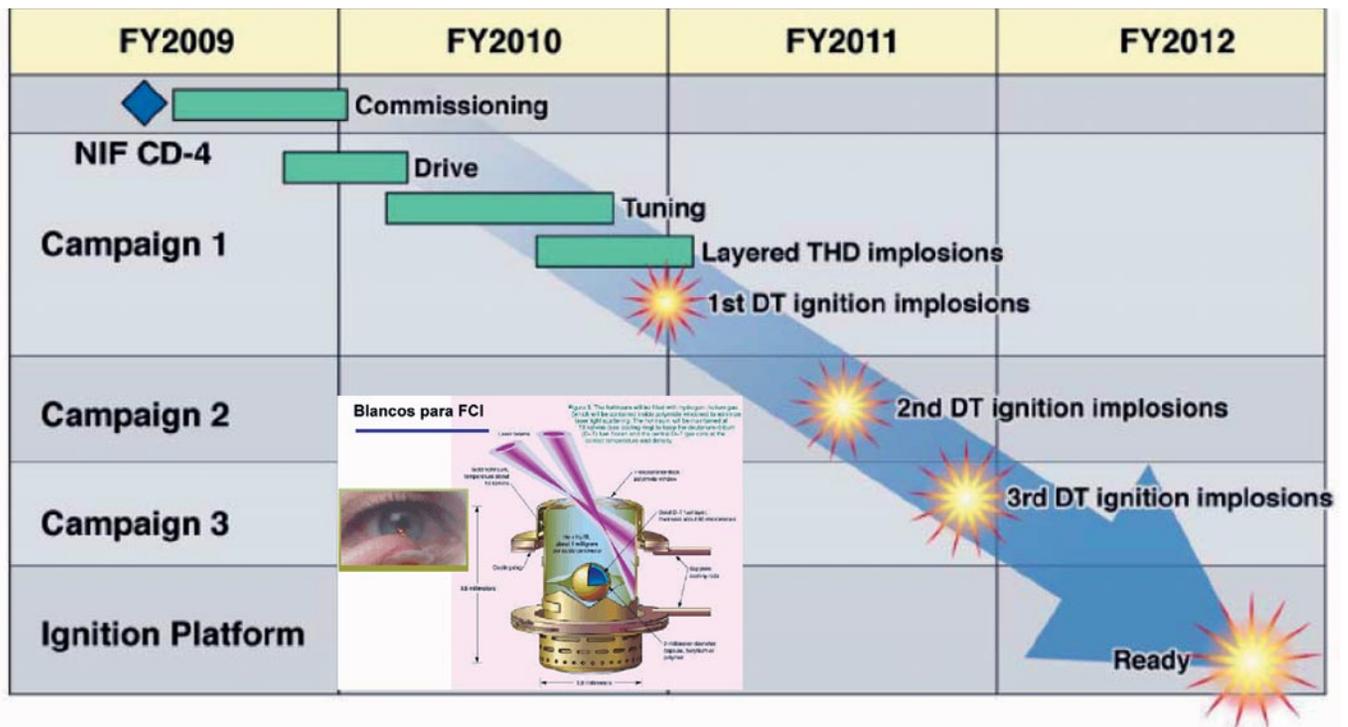


Fig. 2. La campaña experimental comenzada en junio de 2009 está cumpliendo las expectativas (por encima de ellas) y la ignición parece asegurada en el tiempo previsto. Además, figuras de las cápsulas de diferentes tipos milimétricas y de miligramos de DT usadas en la campaña de NIF.

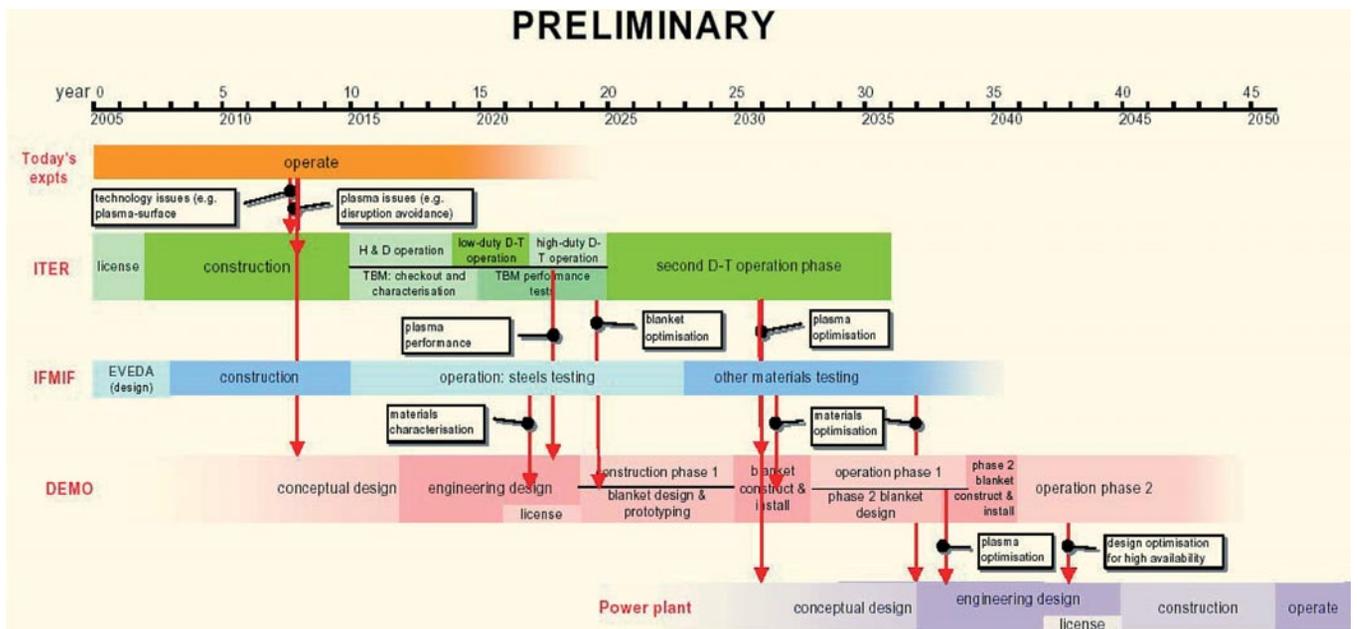


Fig. 3. Estrategia europea de desarrollo de la fusión magnética: hacia un DEMO.

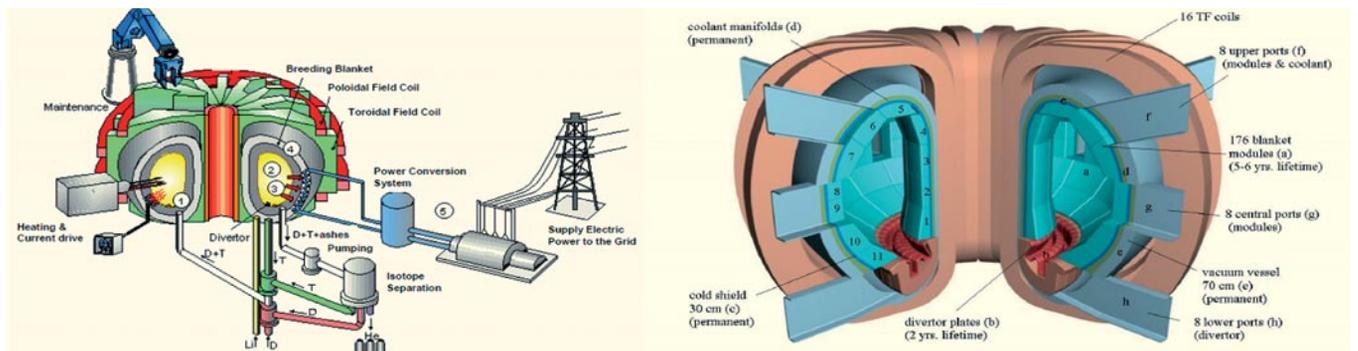


Fig. 4. Sistemas de planta comercial y diseño interno del sistema interno de la cámara de reacción y loops internos.

tirá la realización de experimentos muy uniformes (iluminación directa) o solo por dos conos opuestos (iluminación indirecta). Esta característica no está contemplada en este momento en LMJ. NIF ya funciona en su totalidad y su programación de funcionamiento se representa en la figura 2. Por los resultados que se están dando en estos momentos (desde finales de 2009, por encima de las expectativas) es perfectamente posible que alcance su objetivo de *ignición a finales de 2011 y ganancia entre 10 y 30*.

Actividades de investigación y desarrollo en tecnología de fusión.

Hacia la comercialización

Fusión por confinamiento magnético

Una planta de potencia de fusión por confinamiento magnético dispone de los elementos clave ya mencionados en el apartado dedicado al ITER y los componentes de envoltura extractora de energía y reproducción de tritio que se conecte con los sistemas de ciclo termodinámico, con sus circuitos primarios y secundarios, generador de vapor, turbina, parque transformador y sistema de tratamiento de tritio.

Toda una serie de componentes que se describen en las ventajas y desventajas, donde aparecen las tecnologías críticas por desarrollar, necesitan de importante investigación aún. Es por eso que es preciso indicar que ITER, siendo un paso mayúsculo, debe ser considerado como una etapa en el proceso para lograr una planta de potencia. En este sentido es preciso que las estrategias *con/post* ITER estén ya definidas en buena medida (Fig. 3). De los distintos componentes, buscando su diseño óptimo en eficiencia y comercialización, quizás sean las envolturas responsables de la extracción de la energía del sistema y de la reproducción de tritio las que deberán sufrir una mayor puesta a punto desde ITER a la comercialización (Fig. 4).

En los programas internacionales de desarrollo y, en particular en el de la Unión Europea, que agrupa gran parte de las tareas en el desarrollo de las envolturas de la planta, se contemplan dos conceptos: 1) *sistemas reproductores sólidos cerámicos* (p. ej., γ -LiAlO₂) en forma de bolas y refrigerados por gas (helio) (HCPB –*helium cooled pebble bed*–), y 2) *sistemas de refrigeración y reproducción de tritio* líquidos basados en eutécticos de PbLi fundamentalmente (DCLL –*dual coolant lithium lead*–) (Fig. 5). Un aspecto clave en la configuración de estas envolturas es la duración de los materiales sometidos a la irradiación neutrónica prevista en ellos. Por otra parte, el material sometido a esa irradiación pudiera, dependiendo de su composición química, convertirse (transmutarse) en radiactivo (fenómeno de activación), de manera que la elección de los componentes resulta ser crítica si se desea cumplir con la premisa/promesa imprescindible de la fusión nuclear de corresponder con una fuente de energía limpia. Así, hablamos de *materiales de baja activación* (LAM –*low activation materials*–) o de *activación reducida* (RAM –*reduced activation materials*–). El material europeo por el que se comenzará a experimentar es el acero Eurofer (9% cromo - 1% wolframio), con un control de impurezas muy estricto en su

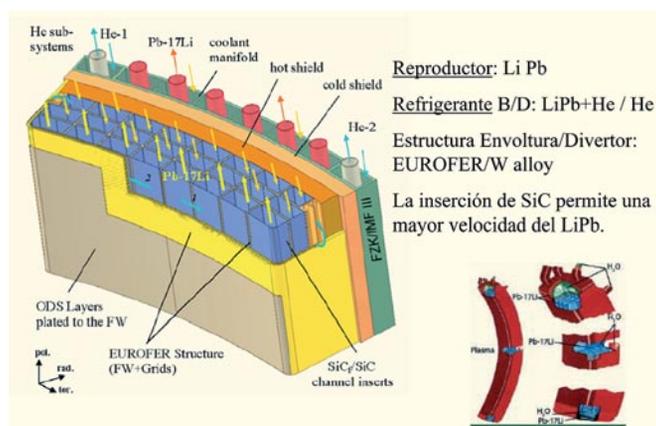


Fig. 5. Esquemas de envolturas para dispositivos DEMO. Además de estas existen sistemas de material reproductor sólido con refrigeración por gas. Así sería un sistema de recuperación de calor y reproducción de tritio.

manufactura. Si la temperatura de funcionamiento se deseara aumentar en 100-150 K (aumento de la eficiencia del ciclo termodinámico hasta un 37% estimado), la solución que se contempla en la actualidad pasa por una composición similar en el acero, pero con un proceso de fabricación conocido como *oxide dispersion steels* (ODS) que nos conduce a una estructura de granos nanocrystalinos. El uso del otro gran candidato como material de baja activación, materiales compuestos basados en el carburo de silicio (SiC), aumentaría el punto de funcionamiento en otros 150 K y la eficiencia se situaría en un 45%. El uso de las aleaciones de vanadio (p. ej., V₄Cr₄Ti, V₃TiAlSi, V₄Ti, V₄Ti₃Al, V₄TiSi), tanto como materiales estructurales cuanto como refractarios, adolece de un problema de compatibilidad con los metales líquidos y limita su uso. Desde el punto de vista de los materiales refractarios, para los que han sido ya descartados el molibdeno, el niobio y el tantalio, se sigue la línea de las aleaciones basadas en cromo como una primera aproximación, por la que se ha comenzado, mientras se gana en experiencia para llegar a las aleaciones de wolframio últimas.

Un elemento fundamental dentro de lo que se ha denominado *Broader Approach* es el desarrollo de una instalación de irradiación neutrónica de materiales al nivel en el que la irradiación se va a dar en los reactores de fusión. Esta instalación no existe en la actualidad, ni una aproximación a ella, y es imprescindible para el desarrollo y validación experimental de esos materiales nuevos. De entre diversas opciones iniciales (espalación, Z-pinch, tokamaks, esféricos...), en estos momentos la comunidad internacional apuesta por la idea de una fuente basada en reacciones nucleares de *stripping*, conocida como *International Fusion Materials Irradiation Facility* (IFMIF) (Fig. 6), usando D⁺ de 40 MeV (generados en dos aceleradores lineales de 125 mA cada uno) como proyectil sobre un blanco líquido de litio que fluye con una velocidad de 15 m/s, flujo de 130 l/s, siendo el área de impacto de 5 × 20 cm y debiendo extraerse una potencia de 10 MW con una temperatura de entrada de 250 °C. El sistema dispone, según diseño, de un volumen de irradiación (donde se colocarán muestras) de 0,5 l, con una tasa de 20-55 dpa/año a plena potencia; otro de 6 l, con una tasa de 1-20 dpa/año; y otro, muy



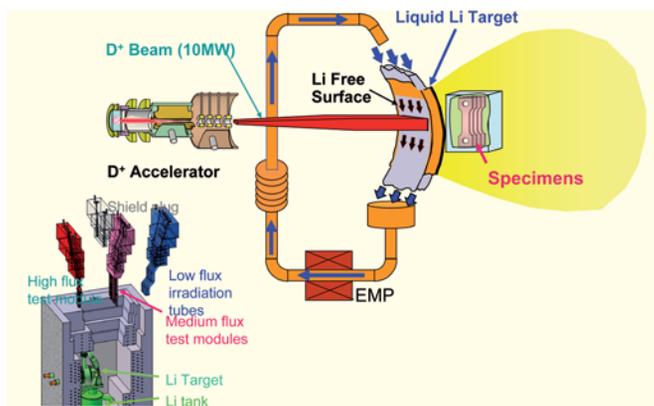


Fig. 6. Detalle del sistema acelerador y de irradiación de IFMIF

grande, de > 100 l, con una tasa de < 1 dpa/año. En todo caso, los sistemas de control permitirán controlar la temperatura en el rango correcto entre 250 - 1.000 °C.

Fusión por confinamiento inercial

La planta de generación de energía por este método se compone en esencia de cuatro partes bien diferenciadas:

- Haz de iluminación.
- Factoría para producir los blancos combustibles.
- Cámara de reacción, donde ocurren las reacciones de fusión y se extrae en un primer ciclo la energía.
- Conjunto (más convencional) de los sistemas de refrigeración / intercambio de calor / turbina y generación de electricidad.

Se deben conseguir densidades en un blanco de milímetros de 600 - 1.000 g/cm³ de manera paralela a las temperaturas de fusión, para lo que se necesita una energía depositada en el blanco de ≈ 5 - 10 MJ, si siguiéramos el esquema más antiguo de ignición central, y del orden de 200 - 300 kJ, en el más avanzado y nuevo de la ignición rápida. Se obtendrá una energía de ≈ 1.000 MJ. Si consiguiéramos repetir dicho proceso con una frecuencia de 5 - 10 Hz, se obtendría una planta de potencia de ≈ 1.000 MWe. La física ya estudiada de la implosión indica que se precisa una duración de pulso del haz de iluminación de ≈ 10 ns con una potencia en el haz emisor de ≈ 1.000 TW y una intensidad en el blanco de $\approx 10^{14}$ - 10^{15} W/cm².

Un esquema posible de escenario de desarrollo de la fusión inercial hasta su comercialización se representa en la figura 7. Para que la energía generada sea aún más "rentable", el haz de iluminación (láser o haz de iones) podría operar sobre diversas cámaras de reacción a la vez simplemente cambiando la dirección de su "puntería" cada vez hacia una de las cámaras. La eficiencia energética del sistema a escala comercial va a requerir de:

- Blancos de alta ganancia con energía generada por fusión del orden de 50 a 1.000 veces mayor que aquella que le da el haz de iluminación. En este aspecto, queda un reto formidable en la fabricación de dichos blancos, en el diseño, la tecnología de fabricación y el desarrollo de materiales que los hagan más eficaces.
- Sistema de iluminación eficiente con rendimientos del orden del 10 - 30% y tasas de repetición de 5 - 10 Hz. Este dispositivo (aún no existe para las energías necesarias) se está

investigando siguiendo la línea de los láseres de excimeros (KrF/ $0,25$ micras) en el Naval Research Laboratory con los sistemas Nike y Electra, y también en el Rutherford Appleton Laboratory con la construcción del sistema Gemini. Además, existe otra línea de investigación consistente en el bombeo del medio activo (neodimio) mediante láseres de diodos, con lo que se consigue una excitación selectiva de la población atómica del medio, que genera al final el efecto láser de manera más eficiente y con capacidad de repetición; un ejemplo de esto es el láser Mercury del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, aunque también el Institute Laser Engineering de la Universidad de Osaka está introducido en esta línea de investigación, así como un número muy interesante de iniciativas europeas que culminan en la aprobación de la construcción de la *Extreme Light Infrastructure* (ELI), que, sin ser su finalidad la energía mediante fusión por láser, va a dar la oportunidad de conocer y desarrollar más la tecnología de láseres repetitivos de potencia y ultraintensos (Figs. 7 y 8).

- Desarrollo de la idea de ignición rápida, que disminuye los requerimientos de la energía necesaria de los láseres (comentada anteriormente) para obtener la energía que justifique una planta de potencia, para la que existe una línea de progreso muy bien establecida de la tecnología de láseres y proyectos de demostración de todos los sistemas de planta en marcha HiPER (Figs. 7 y 8).
- Fabricación de blancos de bajo coste (se estimaba hasta hace poco un coste de 25 centavos de dólar por cada uno) y con una alta tasa de producción (100 millones por año).
- Cámara de reacción de larga vida operativa (del orden de las plantas actuales de 30 años) y, por supuesto, generadora de muy baja radiactividad.

La línea de la ignición rápida disminuye los requerimientos de los láseres al desacoplar la compresión y el calentamiento (Fig. 8). Todo un cúmulo de instalaciones están aflorando en estos momentos en diversos laboratorios del mundo. Japón está completando la instalación FIREX I y está proponiendo una segunda fase FIREX II. Francia ha aprobado un proyecto en la región de Aquitania de 45 M€ para construir el sistema PETAL, que consta de un sistema de 8 haces, cada uno de los cuales libera 17 kJ de energía para la compresión de la cápsula combustible en tiempos de nanosegundos $1,053$ μ m y 8 kJ a 351 nm y un sistema de calentamiento central de $3,5$ kJ de energía liberados en $0,5$ - 5 ps, lo que supone una potencia de 7 PW. Por otra parte, en 2007 se presentó al Programa de Grandes Infraestructuras Europeas (ESFRI) de la Unión Europea una iniciativa liderada por el Rutherford Appleton Laboratory (Reino Unido) junto a un significativo gran grupo de laboratorios y universidades europeos (también con participación internacional) para preparar un diseño en tres años cuya construcción se someterá a decisión al cabo de dicho tiempo. El proyecto se llama HiPER (Figs. 7 y 8) y consiste en un sistema de 44 haces que liberan 200 kJ a $0,35$ micras en 5 ns para la compresión y un sistema de calentamiento de petavatios de 70 kJ en 1 o 3 w en 10 ps, todo ello en una cámara del tamaño de la del NIF, donde se

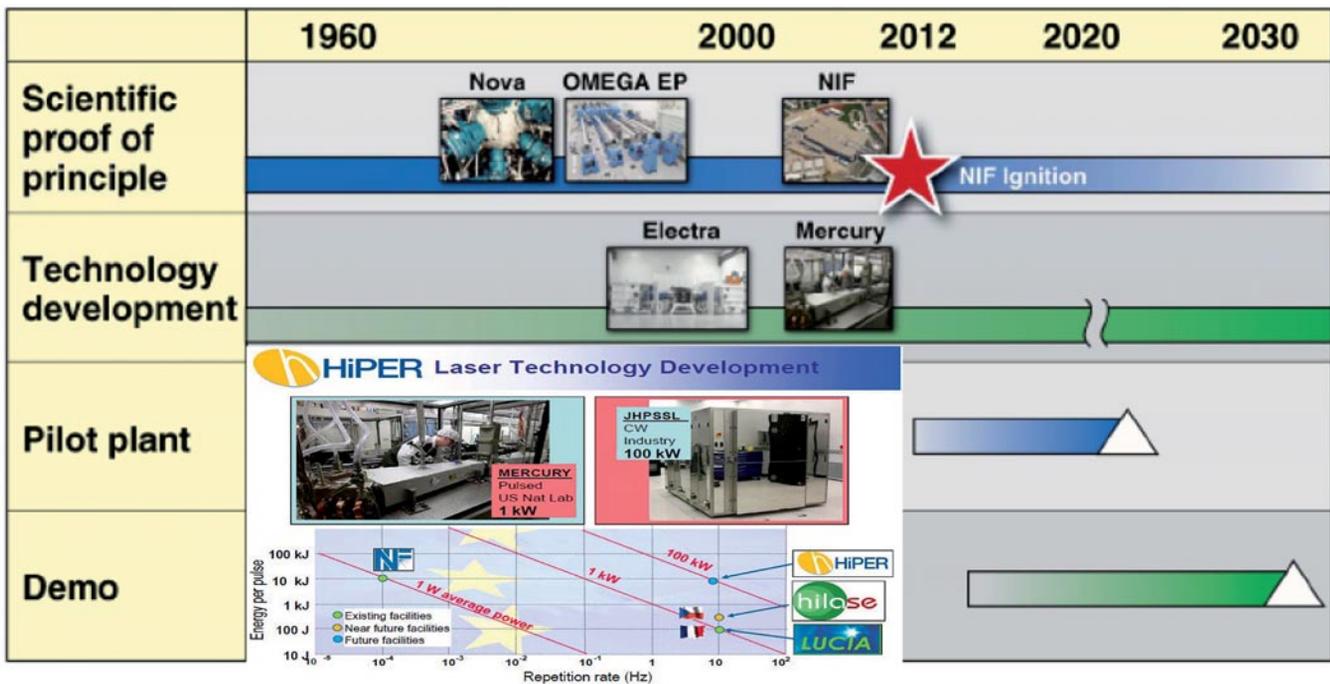


Fig. 7. Esquema de desarrollo de sistemas de fusión inercial en EEUU y Europa. La investigación en láseres repetitivos (DPSSL), sistemas de inyección y repetición, y la tecnología de cámara avanzan y ya existen proyectos complementarios.

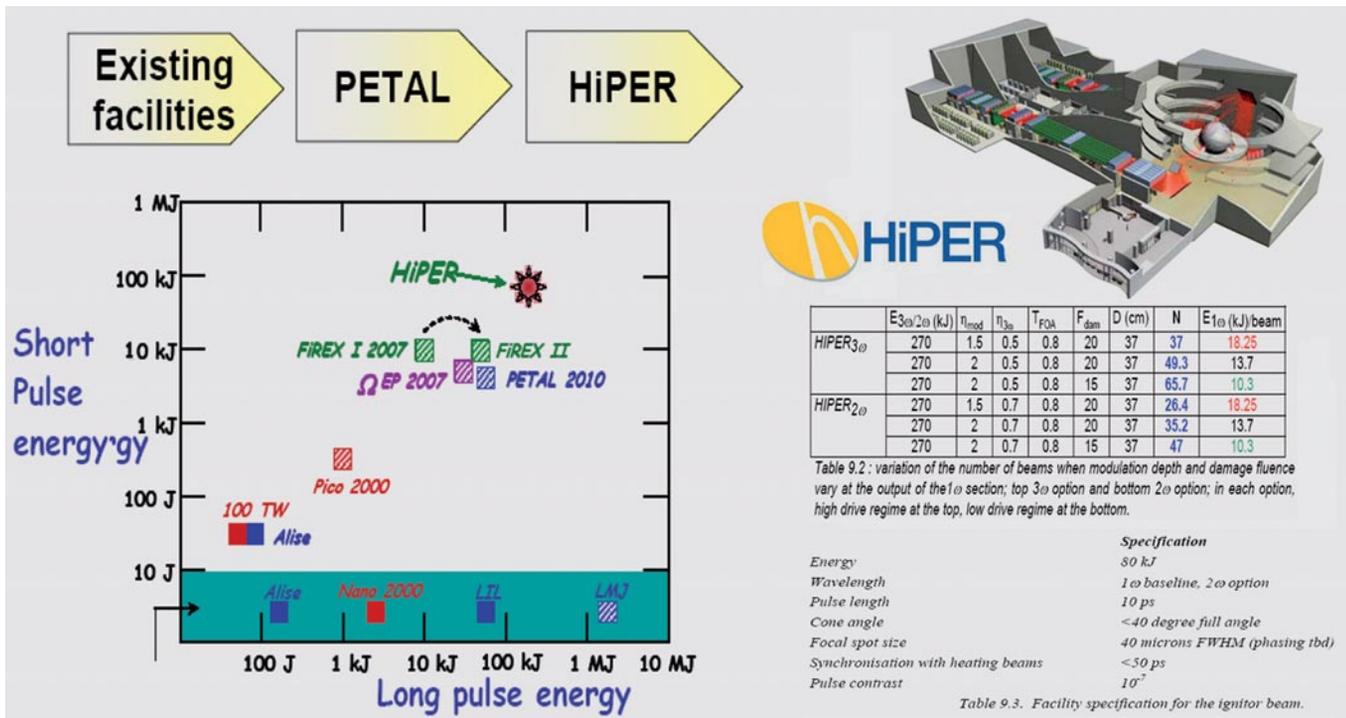


Fig. 8. Evolución de los láseres de largo (nanosegundos para compresión) y corto (picosegundos para calentamiento) pulso para la ignición rápida e HiPER.

pueda demostrar la factibilidad y ganancia del sistema. En EEUU también se están construyendo ya instalaciones en esta línea en el Laboratory Laser Energetics de la Universidad de Rochester (Omega-EP) y en el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore sobre la base del láser Titan (petavatios) ya operativo, que libera 150 J en 500 fs (femtosegundos) y combina dicho pulso con pulsos de alta energía y larga duración, justo lo necesario para realizar los experimentos de ignición rápida. Ideas similares aparecen para la combinación del Z-pinch de Sandia NL con estos sistemas de petavatios. Una úl-

tima idea en fusión inercial a la hora de conseguir energía: uso de rayos X generados por Z-pinch. La implosión de blancos de gran tamaño guiados indirectamente por rayos X es una idea generada en el Laboratorio Nacional de Sandia y que surge de su gran experiencia en potencia pulsada. Independientemente de la opción prototipo elegida, el objetivo es conseguir el calentamiento y compresión de un plasma mediante el efecto electromagnético de potencia pulsada Z-pinch, de manera que se genere un muy intenso campo de rayos X que ilumine la cápsula que se puede visualizar en el centro del dispositivo.



La característica fundamental de esta idea es que se podría conseguir pulsos de rayos X de ≈ 16 MJ para el caso de fusión inercial para energía que, con los rendimientos ya conseguidos, darían generaciones de energía de unos pocos gigajulios, lo que permitiría relajar las condiciones de repetición en el sistema de potencia, pasando a $\approx 0,1$ Hz.

Como prototipo en desarrollo de un sistema que pueda generar energía en un plazo más breve está el proyecto LIFE (*Laser Inertial Fusion Fission Energy*), originalmente desarrollado como un sistema de fusión y fisión (Fig. 9) propuesto por el Laboratorio Nacional de Lawrence Livermore en el año 2009. Este proyecto de energía de fusión por láser se reconvierte en un sistema puramente de fusión, sobre lo que se trabaja más en este momento de 2010. La idea de LIFE para visualización de su imagen potencial surge de la situación ventajosa en la que parece que se va a colocar NIF. Como se describe en el apartado dedicado a la fusión nuclear, NIF es un experimento basado en la fusión inercial por láser que se ha diseñado para obtener ignición (a finales de 2010) y ganancia energética en el Laboratorio Nacional de Lawrence Livermore. Los experimentos a lo largo de 2010 comienzan con energías de láser de 1 a 1,3 MJ, obteniendo rendimientos energéticos de 10 a 35 MJ. Si esto se cumple y en un periodo tan corto de tiempo, tiene sentido proponer lograrlo, pero con repetición (nuevo láser y otras tecnologías de inyección de blancos y de cámara) de 10 a 15 Hz (LIFE). Esto supone disponer de $\approx 10^{20}$ n/s y 350 a 500 MW de fusión,

que se acoplarían a una envoltura de fisión subcrítica compacta de manera que se pudiesen alcanzar algunos gigavatios térmicos, cumpliendo con la minimización de emisiones de dióxido de carbono, mitigando los problemas de proliferación nuclear y minimizando también los aspectos problemáticos asociados a la seguridad nuclear y a la disposición final de los residuos radiactivos del ciclo nuclear de fisión. De esta suerte, LIFE se contempla como una extensión lógica de NIF y los esperados resultados de dicho sistema a finales de 2010.

El concepto LIFE, en su concepción fusión-fisión, es de los denominados de *no reciclado (once-through)*, con un ciclo de combustible cerrado en sí mismo (en su operación) con las siguientes características: 1) eliminación de las necesidades de enriquecimiento de uranio; 2) uso de más del 90% de la energía contenida en el combustible nuclear cargado en el reactor; 3) supresión de la necesidad de las instalaciones de separación química del combustible gastado en los reactores actuales del ciclo de fisión; 4) mantenimiento de la envoltura de fisión subcrítica en un valor de $k_{eff} < 0,90$ durante toda la operación; 5) minimiza los requerimientos futuros de dispositivos geológicos subterráneos profundos de los residuos radiactivos, así como el contenido en actínidos en el residuo nuclear al final de vida en LIFE (por debajo del nivel requerido –nivel E, el más bajo– y más atractivo para el Departamento de Energía –DoE– americano); LIFE está considerando las opciones de quemado de uranio natural (U) o empobrecido de muy bajo enriquecimiento, torio (Th), combustible mixto U/Th,

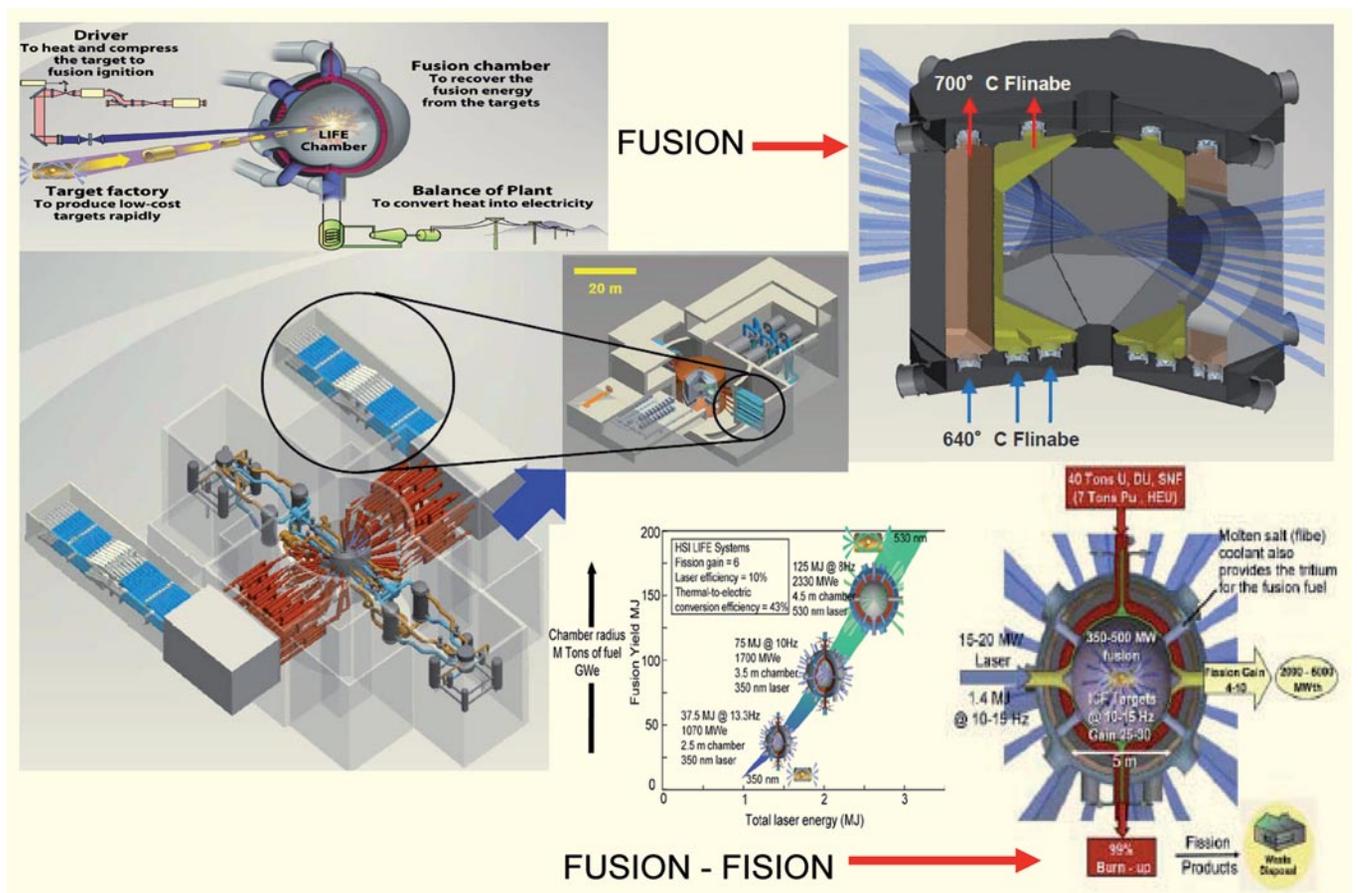


Fig. 9. Idea de LIFE como sistema a medio plazo de fusión pura por láser y propuesta de la misma instalación en fusión-fisión (híbrido) (Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, EEUU).

combustible nuclear gastado (SNF *–spent nuclear fuel–*) sin separación química previa de flujos de actínidos que pudieran ser atractivos para el desarrollo de armamento, plutonio militar ya existente en exceso o uranio altamente enriquecido (HEU *–highly enriched U–*). LIFE, como estos sistemas híbridos, se puede considerar, además, como mero generador de energía, pero también (alta temperatura) como máquina para la producción de hidrógeno. El flujo de potencia en el sistema se basa en un sistema que por fusión genere 500 MW y que esté cargado con 40-50 toneladas de combustible de fisión fértil en su forma de bolas cerámicas TRISO (*TRi-structural-ISO-tropic*), bolas sólidas huecas (SHC *–solid hollow core–*), o sales fundidas de uranio, torio, plutonio u otros actínidos, o solo 5-7 toneladas de material altamente fisible como plutonio de composición militar o uranio altamente enriquecido. Con esta composición sobre la ganancia en fusión (NIF) de 30 o 40 se tendría un factor multiplicador de 4 a 10, con lo que aparece un reactor de 2.000 a 5.000 MW térmicos. Con TRISO o SHC y sistemas fértil-fisil, se tendría ganancia de 4-6, mientras que con combustible puramente fisil (en cualquiera de sus formas sólidas) y en la forma líquida se movería dicha ganancia en 6-10. Un aspecto importante de LIFE, que se ha buscado como objetivo crítico, es que podría llegar a consumir mediante fisiones hasta un 99% de la masa inicial de átomos fisibles (FIMA *–fission of initial metal atoms–*). Naturalmente, alcanzar esos niveles de vida operativa del combustible requiere soluciones muy avanzadas de materiales sólidos combustibles o una operación continua de procesamiento de combustible si se opta por la solución de combustible líquido. El control del nivel estacionario y continuo de potencia en el reactor híbrido LIFE una vez que se ha llevado este al nivel original de diseño (en este caso, con uranio empobrecido *–DU–*) de 2.000 MWth se realizará con el cambio de la relación entre los isótopos de litio ${}^6\text{Li}/{}^7\text{Li}$ en el refrigerante, en este caso de sal fundida de fluoruros. Este mecanismo altera el balance de neutrones que se usan para generar tritio con relación a aquellos que son usados para producir y fisiónar el material fisible de la envoltura. Al progresar en el tiempo, el ${}^{238}\text{U}$ se convierte por captura neutrónica en ${}^{239}\text{Pu}$ y actínidos de mayor número atómico. Para los primeros 20 años existiría una producción de tritio en exceso, pero debido a su vida media, de 12,3 años, una fracción muy significativa habrá desaparecido por decaimiento en los últimos años del ciclo.

Ya se ha mencionado que una parte básica del sustento de la idea de LIFE es NIF y el progreso de la línea de sistemas repetitivos en la parte de fusión (láseres, etc.), lo que expresa dónde se visualiza el recorrido de progreso de NIF a LIFE.

En la figura 10 se representa el esquema de una planta de potencia con sus diversos subsistemas tal y como ya se ha comentado en la introducción. El sistema clave tecnológico es lo que se conoce como cámara de reacción, en la que, para una emisión, por reacciones de fusión nuclear, de energía cinética de partículas (neutrones, partículas cargadas y rayos X) de ≈ 1.000 MJ, se debe ser capaz de rescatar eficientemente dicha energía, reproducir tritio en cantidad suficiente y supe-

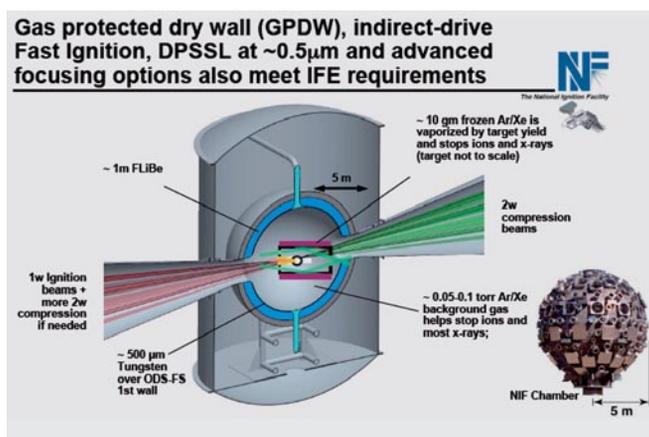


Fig. 10. Un diseño conceptual de planta de potencia desarrollado en el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, en EEUU, como ejemplo de futuro. Otras ideas como FALCON, en Japón, se están desarrollando paralelamente.

rior al usado en los blancos, y aguantar el impacto y el daño producido por la irradiación de manera eficiente. Varios han sido los diseños que se han concebido a lo largo de la investigación, que pasa aún por dilucidar muchos aspectos de física básica de los materiales y de otros componentes. No se va a entrar aquí en detalles, pero sí indicar que una ventaja sustancial en este aspecto entre las cámaras de reacción de los sistemas de confinamiento magnético e inercial es que en estos últimos es perfectamente factible diseñar un dispositivo a través del cual, además de conseguir la recuperación de energía en un ciclo termodinámico y reproducir tritio, se consigue proteger los materiales estructurales de la cámara. En el caso del diseño representado en la figura 10, esto se realiza mediante chorros de un refrigerante como LiPb o Flibe de unos 60 cm de espesor que caen a través de las paredes de la cámara, y en su caída extraen la energía depositada por las partículas emergentes de la fusión en el centro de la cámara y generan tritio a través de la interacción de los neutrones producidos en la fusión central con el litio componente de dichos metales líquidos. Un dispositivo que representa este concepto es el HYLIFE-II, que supone el uso de haces de iones pesados y donde el fluido extractor de energía que baña las paredes de la cámara moviéndose verticalmente de arriba abajo con un espesor de 50-60 cm es Flibe. Existen otros conceptos, como el denominado Sombrero, en el que se utiliza una cámara de pared seca e iluminación directa de blancos por medio de láser (p. ej., KrF); en este concepto, la cámara de reacción se compone de un material compuesto basado en C/C para las estructuras de la cámara, y un manto reproductor que consiste en un lecho fluido de partículas sólidas de Li_2O , estando compuesta la atmósfera de la cámara por gas xenón como protección de la primera pared. □

