

Sostenibilidad energética a largo plazo. El papel de la fusión nuclear

G. Jiménez Varas y J. M. Perlado

En este artículo se realiza una disertación sobre la sostenibilidad energética y la contribución de las diferentes energías a ella, analizando con especial énfasis el papel que desempeña la fusión nuclear en el desarrollo sostenible.

In this article, a dissertation is done about energy sustainability and the role of the different types of energy on that. It has been analyzed more deeply the role of nuclear fusion in the sustainable energy development.

EL CONCEPTO DE SOSTENIBILIDAD

Según la RAE, se define como *sostenible* aquel proceso “que puede mantenerse por sí mismo”. Como veremos en este artículo, a esta definición tan estricta de *sostenibilidad* sólo podrían adherirse en términos de generación eléctrica las energías renovables, la fisión nuclear basada en reactores rápidos reproductores o la fusión nuclear, únicas energías que generan su propio combustible o disponen de recursos durante miles de años.

Por otro lado, desde el punto de vista técnico, algunos autores, [1], definen la sostenibilidad bajo dos diferentes criterios: ecológico y económico. Teniendo en cuenta ambos, se puede definir la sostenibilidad como el no decrecimiento a largo plazo de la calidad medioambiental ni de la calidad de vida individual.

Sin embargo, la definición más conocida de sostenibilidad procede del Informe Brundtland de 1987, [2]: “Un

desarrollo sostenible es aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones de satisfacer sus necesidades”

Las actividades humanas que se relacionan con la sostenibilidad se ven afectadas por tres tipos de limitaciones: medio-ambientales, económicas y sociales, [3] y [4], figura 1. Las limitaciones referentes al medio ambiente comienzan por el hecho de que los recursos ecológicos y minerales son finitos. Las limitaciones económicas están muy relacionadas con la disponibilidad de las diferentes tecnologías y su viabilidad. Por último, el factor social es clave en cuanto que representa las expectativas de la humanidad al aspirar a dotar de una mejor calidad de vida a todos los habitantes de la tierra, ahora y en el futuro.

Podríamos decir por tanto que el desarrollo sostenible es aquel que maximiza la mejora de la calidad de vida de la humanidad con las tecnologías disponibles en cada momento

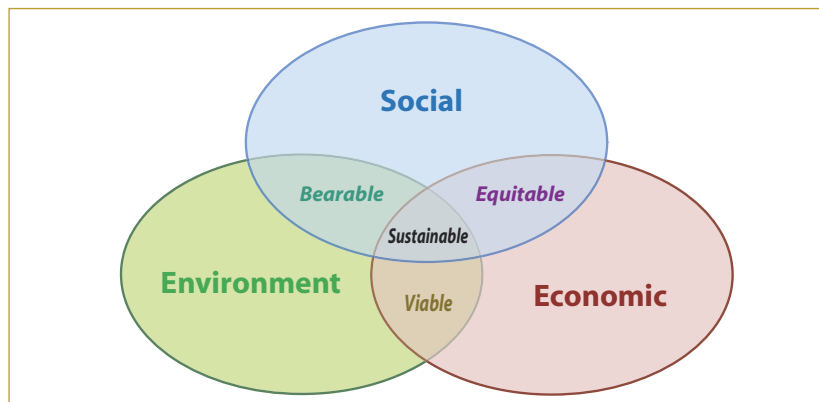


Figura 1. Concepto de Sostenibilidad, [3]



GONZALO JIMÉNEZ VARAS

es licenciado en Física Fundamental (Universidad Complutense de Madrid), Máster en Generación Eléctrica (Universidad de Zaragoza), Máster en Ciencia y Tecnología Nuclear (Universidad Politécnica de Madrid) y actualmente doctorando de la UPM. Desde 2005 ha trabajado en seguridad nuclear y protección radiológica en Socoin y en la ETSI Minas (UPM), incorporándose a Westinghouse Electric Spain en 2008 dentro del European Trainee Program, donde ha participado en varios proyectos de APS y Termohidráulica en las oficinas de España y Bélgica. En 2011 se incorpora como profesor ayudante en el Departamento de Ingeniería Nuclear de la ETSI Industriales (UPM), donde adicionalmente a la docencia de Ingeniería Nuclear, imparte docencia de Cambio Climático y Sostenibilidad Energética. Es vocal de la Junta Directiva de Jóvenes Nucleares desde 2010.



J. MANUEL PERLADO

es catedrático de universidad (Física Nuclear) en la ETSI Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Director y co-fundador del Instituto de Fusión Nuclear (DENIM) de la UPM.

Representante del Gobierno español en el Comité Consultor de Euratom para Fusión (CCE-FU) en el 7º Programa Marco de la Unión Europea. Consejero de programa EU/Euratom ICF. Investigador principal y coordinador de uno de los grupos de trabajo del Proyecto HiPER. Investigador principal de dos proyectos de Euratom sobre irradiación de materiales. Representante de la Comunidad de Madrid en el Comité de ESFRI. Participante en el diseño de IFMIF y materiales avanzados en el Fusion Broader Approach. Responsable de la UPM en Technofusion y en Consolider Tecno_Fus para el diseño del Blanket de DEMO.

y respetando los recursos ecológicos de tal manera que las generaciones futuras puedan continuar con dicho desarrollo.

Es importante saber que históricamente ante un exceso de energía disponible no se llega a un desarrollo más sostenible, como parece lógico pensar, pues en ese contexto las sociedades humanas han demostrado volverse más complejas y agotar la energía sobrante rápidamente por un aumento del consumo, [5]. Un ejemplo es el de los coches en EEUU, cuando se hicieron más eficientes la gente respondió conduciendo más kilómetros, figura 2. Esta tendencia, llamada "efecto de rebote" sólo se ha dejado de cumplir en dos ocasiones históricas, debido a que el exceso de energía era suficientemente grande para mejorar la calidad de vida y además aumentar la población mundial: el descubrimiento de la agricultura y la Revolución Industrial.

Teniendo estos conceptos presentes, en este artículo la sostenibilidad que nos ocupa es la que concierne a la producción de energía eléctrica, que es donde se ubica la energía nuclear.

¿Bajo qué criterios una energía es sostenible? Varios autores han hecho el esfuerzo de clasificar las energías según parámetros de sostenibilidad, [6]. Simplificando, se puede agrupar dichos parámetros en tres: consumo de recursos, impacto medioambiental y viabilidad técnica y económica. En el caso además de la energía nuclear, tenemos que tener en cuenta otros aspectos como la no proliferación o la importancia de la seguridad nuclear.

Para cada uno de esos aspectos se realizará una discusión sobre los diferentes tipos de energía, haciendo énfasis en la fisión y la fusión nuclear. En el caso de las energías renovables, se han seleccionado la energía eólica, la solar y la hidráulica por ser las más representativas.

CONSUMO DE RECURSOS

En lo referente al consumo de recursos, las energías renovables han sido encumbradas como las más sostenibles. La duración del recurso principal para la energía eólica y la solar, en este caso, el Sol, parece asegurada al menos durante billones de años y además el potencial recurso anual para la energía solar (170 000 TWh) y para la energía eólica (40 000 TWh) es inmenso [6], aunque por desgracia sólo un muy bajo porcentaje es explotable. Por tanto, la sostenibilidad de estas energías referente a los recursos asociados viene dada no por el "com-

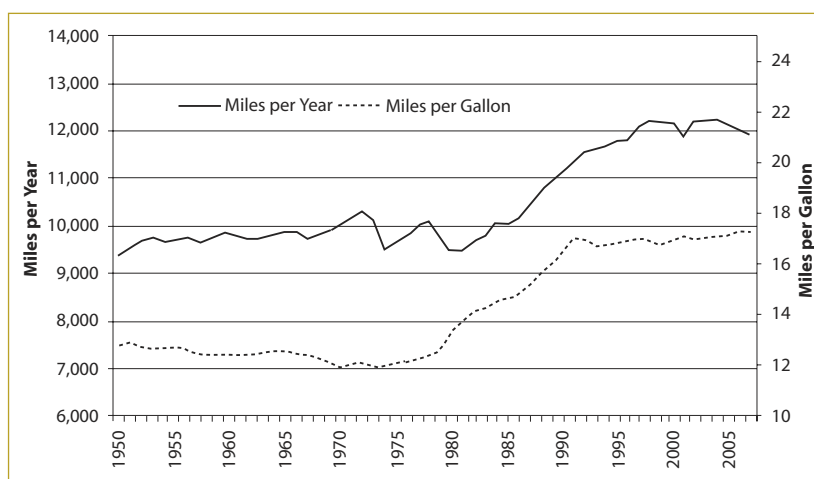


Figura 2. Eficiencia de los motores y consumo en los EEUU durante 1950-2007. Fuente: DOE y Ref. [5].

bustible" sino por la disponibilidad de los componentes que permiten la fabricación de los equipos de generación, [7] y [8], como las tierras raras, por ejemplo, el teluro o el indio de las placas solares [9], o el neodimio de las turbinas eólicas, dado que, por ejemplo, este último podría limitar el desarrollo de la energía eólica a pocos cientos de años con el crecimiento y la tecnología actual, [7]. Por tanto, son necesarios esfuerzos en I+D para conseguir evitar en lo máximo de lo posible el uso de dichos materiales. En el caso de la energía hidráulica, pese a la cantidad del recurso potencial (13 000 TWh), sólo un porcentaje reducido puede ser explotado (2600 TWh) [6].

El resto de las tecnologías de generación eléctrica hacen uso de recursos que se encuentran en la naturaleza desde hace miles de años, cuya transformación mediante diferentes procesos físico-químicos o nucleares, como la combustión o la fisión, liberan energía que se emplea para producir electricidad. La desventaja del petróleo con respecto al resto de combustibles usados para la generación eléctrica es que es un recurso energético empleado en el sector del transporte y además es muy valioso para la producción de bienes consumibles como, por ejemplo, plásticos, convirtiendo en un lujo innecesario su utilización para generación eléctrica.

La limitación temporal de estos recursos fósiles y minerales es clara con las tecnologías actuales y al ritmo de crecimiento del consumo actual [6]: gas (120 años), carbón (185-260 años), uranio (de 100 a 300 años, dependiendo del tipo de ciclo de combustible y los recursos explotados) [10], petróleo (100 años).

Con respecto a la fisión nuclear, el uso de los actuales reactores (Gene-

ración I, II, III y III+) tiene inconvenientes a la hora de asegurar la disponibilidad del recurso a largo plazo. Esto se debe a que la estimación de la energía primaria que se convierte en calor en el proceso de la fisión es sólo del 0.5 %, el 85 % de la energía queda en el uranio empobrecido y el otro 14.5 % en el combustible gastado [11]. En términos de masa un ciclo abierto de un LWR, de cada 1000 kg de uranio natural (99.3 % U-238 y 0.7 % de U-235), apenas se aprovechan 3 kg de U-235. En el caso de un ciclo de combustible cerrado actual con reprocesamiento se llegaría hasta el 1 % de aprovechamiento energético. Por tanto, es un proceso mejorable en términos de eficiencia energética: el propio combustible una vez usado y el uranio empobrecido son en sí mismos recursos energéticos por explotar.

Los reactores rápidos reproductores, sin embargo, producen más combustible del que consumen, al convertir núcleos fértiles (como el U-238) en fisionables (como el Pu-239) durante el ciclo de operación normal del reactor. El uso de dichos reactores aseguraría la disponibilidad del recurso mineral por mucho más de 300 años, al llegar a una utilización energética del combustible notablemente mayor, [26].

Es muy importante destacar el caso del torio (Th-232) como combustible de los reactores de fisión nuclear rápidos (ya que, como el U-238, no es utilizable como parte fisionable del combustible de reactores térmicos). El torio es un inmenso recurso energético por explotar, cuya abundancia total se estima en 4.4 millones de toneladas de recursos conocidos, [10]. Este recurso puede jugar un papel en el futuro de la sostenibilidad de la energía nuclear si, por ejemplo, en un reactor rápido es convertido

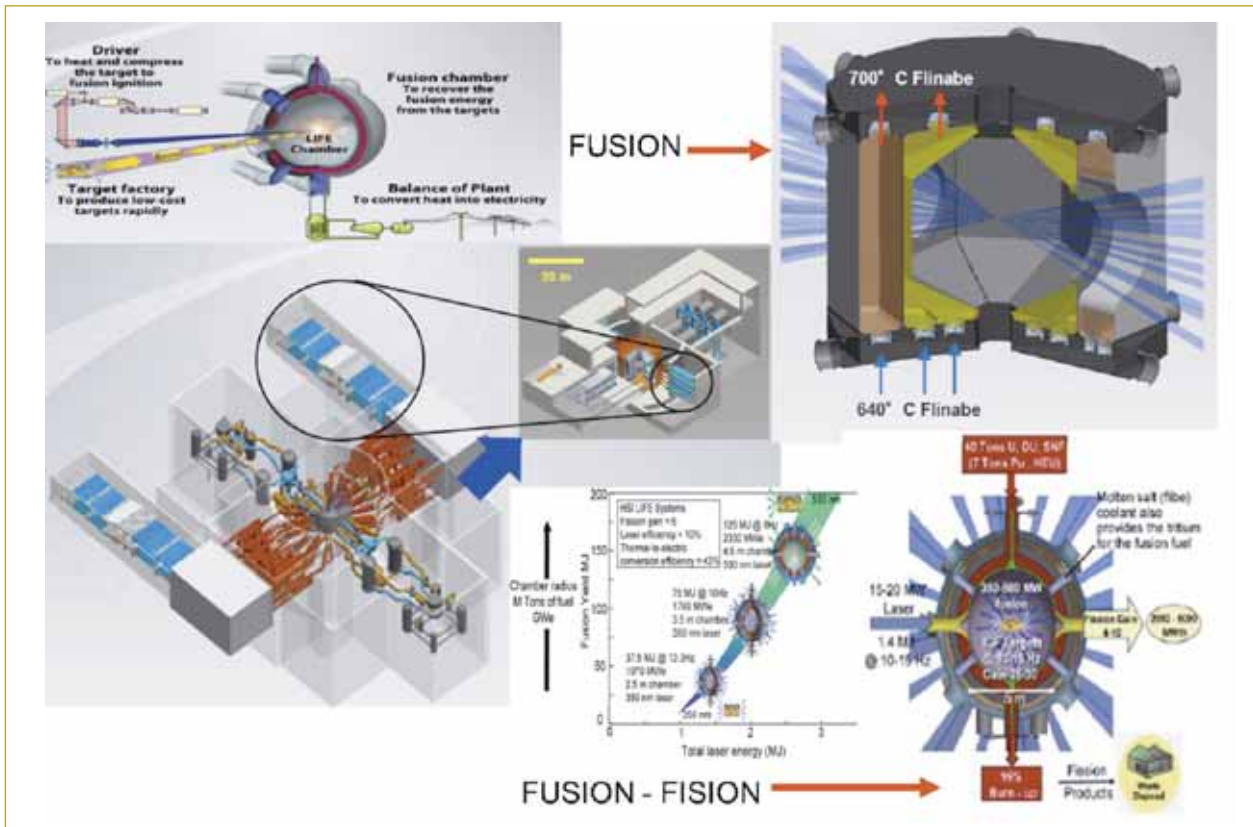


Figura 3. Idea de LIFE como sistema a medio plazo de fusión pura por láser y propuesta de la misma instalación en fusión-fisión (híbrido) (LLNL, EEUU).

por captura neutrónica en U-233, válido como combustible de los actuales reactores térmicos.

El problema de los residuos radiactivos abordado desde la transmutación mediante sistemas híbridos, [11], (un reactor de fisión para transmutación subcrítico alimentado por un acelerador o por un reactor de fusión) se convierte en una solución complementaria de la generación de energía, que es intrínseca a ellos. Como prototipo en desarrollo de este tipo de sistemas está el Proyecto LIFE (*Laser Inertial Fusion Fission Energy*), figura 3, originalmente desarrollado como un sistema de fusión-fisión propuesto por el Laboratorio Nacional de Lawrence Livermore, en EEUU, en el año 2009, [12].

En el caso de la fusión nuclear, la primera ventaja con respecto a la sostenibilidad de los recursos 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 por fusión obtener una energía de 5 millones de electronvoltios de energía

cinética por cada núcleo de deuterio (MeV/deuterón), el total de energía extraíble de 1 metro cúbico (m^3) de agua por fusión sería de $\approx 8 \times 10^{12}$ J, lo que equivale a algo menos de 200 toneladas de petróleo. Si el contenido total de agua de mar es de unos $1,5 \times 10^9$ m^3 , se dispondría de un potencial energético del deuterio total de $1,2 \times 10^{31}$ julios (J). Una sencilla división de esta magnitud de recursos de combustible con la demanda mundial en el año 2000 nos sitúa en periodos de los 30,000 millones de años de duración. Además, el coste del deuterio es muy reducido, del 0,1 al 1 % del coste de los combustibles fósiles, por unidad de energía producida

El 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/tonelada, lo que supone al ritmo de consumo del año 2000 de varios millones de años. 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.

Algunos científicos temen la posible competencia por el litio que provocaría la implantación a escala mundial del coche eléctrico, pues la fabricación de las baterías consumiría buena parte de las reservas de litio conocidas [13]. No obstante, si conservadoramente sólo se emplease el Li-6 para fusión, que representa el 7 % del Li disponible, sería suficiente para miles de años, [14]. Los únicos materiales utilizados para la fusión cuya disponibilidad a largo plazo es más limitada son los que se usan para los diseños de multiplicadores neutrónicos. En un tipo de diseño se utiliza el berilio, cuyas reservas se estiman en cientos de años, [13]. Sin embargo, en otro tipo de diseño se utiliza plomo y este caso las reservas son suficientes para miles de años, [13].

IMPACTO AMBIENTAL

En el caso de las energías renovables, en términos de impacto ambiental la energía hidráulica es la que más consecuencias medioambientales tiene, dada la modificación radical de la ecología en la que se instala.

En el caso de la energía eólica, también se produce una variación notoria del Medio Ambiente, sobre todo con respecto a las poblaciones locales de aves, además del impacto visual y sonoro. La energía solar es la que menos impacto ambiental produce durante su operación, aunque la que más (por unidad de energía instalada) durante el proceso de fabricación y reciclado de los componentes (las placas solares).

En términos de impacto ambiental, el uso de combustibles fósiles que producen gases de efecto invernadero de forma natural, producto de la combustión, no es justificable desde el punto de vista de la sostenibilidad a largo plazo, por los potenciales daños irreversibles que un incremento forzado del efecto invernadero conlleva. Dichos combustibles han representado históricamente un antes y un después en el desarrollo de la humanidad, pero es indiscutible su necesidad y progresiva sustitución por energías con menores emisiones de CO₂, siendo esa la mayor razón para el fin de su uso, y no la falta de recursos. Como dijo Richard Sears, científico del MIT y ex ejecutivo de una empresa petrolera, "La Edad de Piedra no se terminó por la falta de piedras". No obstante, no se estima una gran reducción en el uso de dichas tecnologías hasta más allá de 2050, [15] a [20], siendo necesaria en un futuro cercano la implantación de procesos de captura, transporte y almacenamiento de CO₂, [21].

La fisión nuclear produce (teniendo en cuenta todos los procesos de ciclo de combustible) muy bajas emisiones de CO₂ (65 g CO₂/kWh), [22], comparado con las plantas térmicas convencionales (600-1200 g CO₂/kWh) o las plantas solares (90 g CO₂/kWh), aunque es algo mayor que en el caso de la eólica e hidráulica (30-65 g CO₂/kWh). En el caso de la fusión nuclear se estiman aún menores (11 g CO₂/kWh) [23].

En cuanto a los residuos radiactivos, en el marco actual es necesario pensar en un almacenamiento temporal (centralizado o individualizado) y más tarde en un almacenamiento geológico profundo. Si no hay una estrategia de reprocesamiento de combustible, dicho almacenamiento es, en cierto modo, un almacenamiento casi íntegro de recursos energéticos por explotar. En el caso de un parque parcialmente basado en reactores rápidos como el SFR (IV Generación), [24], las cantidades de residuos a almacenar se ven disminuidas, al transmutar durante el ciclo de operación de dichos

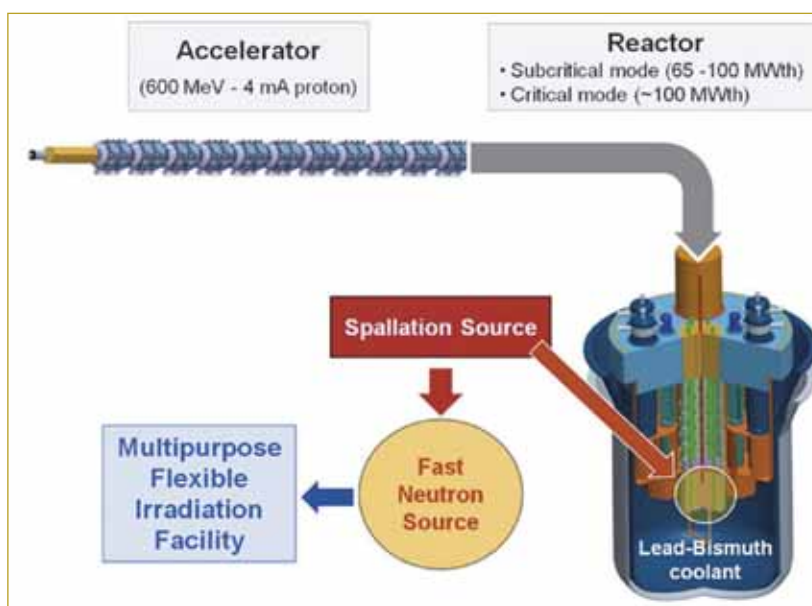


Figura 4. Proyecto MHYRRA en el SCK-CEN.

reactores los actínidos minoritarios que se encuentran en el combustible, dando un paso de gigante hacia la sostenibilidad de dicha energía. Otra estrategia sostenible estaría basada en el uso generalizado de combustible reprocesado MOX para los reactores actuales y el uso de una instalación dedicada a la transmutación de los productos de fisión más radiactivos, como una instalación de un reactor subcrítico alimentado por un acelerador (ADS), como el proyecto europeo MHYRRA en el SCK-CEN de Bélgica, figura 4, o un sistema híbrido fusión-fisión como LIFE en el LLNL de EEUU, figura 3, [12].

Una ventaja en este aspecto 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 dicha 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 (sólo 12,5 años). La radiactividad inducida en estos reactores provendría 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 1000 a 10 000 veces superior a la producida por uno de fusión nuclear por confinamiento magnético o inercial, respectivamente. Pero 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, [25]. 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.

VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA

La discusión sobre la viabilidad técnica y económica de las energías renovables excede en mucho el objetivo de este artículo, por lo que sólo se va a hacer una pequeña disertación. En el caso de la energía hidráulica no hay discusión posible, dada la experiencia en la construcción de este tipo de plantas a nivel mundial. En el caso de la energía eólica, la instalación de molinos *onshore* (en tierra) mejora año tras año la eficiencia y disminuye el coste, acercándose a precios competitivos de generación eléctrica progresivamente. Sin embargo, la idea de una instalación masiva de energía eólica *offshore* (en el mar) es

hoy en día de difícil realización con las tecnologías actuales y los elevados gastos de mantenimiento asociados. Con respecto a la energía solar, es la menos viable económicamente de casi todo el conjunto de energías, los rendimientos de las placas están aún muy lejos de hacer que el coste de generación sea competitivo. Por tanto, son necesarios aún muchos esfuerzos en investigación para asegurar la sostenibilidad económica de la energía solar a largo plazo.

En el caso de las energías fósiles actuales su viabilidad técnica está más que probada, pero su viabilidad económica es decreciente con la mengua de los recursos naturales. En escenarios futuros previsibles donde el precio del barril del petróleo y del gas natural sean extremadamente altos, dada la inestabilidad de la mayoría de países productores, la producción de energía eléctrica con este recurso fósil será un lujo que difícilmente una economía desarrollada se podrá permitir [26].

En el caso de uranio, el precio del kWh no se ve tan afectado por el precio del combustible como en el caso anterior y, además, los países productores son mucho más estables, pero siendo un recurso finito en un escenario de mucha demanda y oferta limitada por la capacidad de extracción, la producción de energía estará ligada al precio del recurso de una forma más significativa.

La viabilidad técnica de las actuales centrales de fisión está más que demostrada, y en los reactores de Generación IV ya hay una amplia experiencia en algunos de ellos, como el reactor de sodio o el de alta temperatura, aunque son necesarias soluciones técnicas antes de su implementación a escala industrial.

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 estos son los principales problemas) que aún quedan por resolver para conseguir la Planta de Potencia comercialmente competitiva.

El primer problema científico aparece cuando se quiere unir, es decir, fusionar dos núcleos, que al estar cargados positivamente se repelen. El procedimiento más fácil para superar esa repulsión, llamado fusión en caliente ó termonuclear, consiste en "calentarlos" a una temperatura, llamada de ignición, tal que la energía cinética que adquieren compense la repulsión coulombiana, hasta que entren en contacto y actúe la fuerza nuclear. En el caso de los isótopos del hidróge-

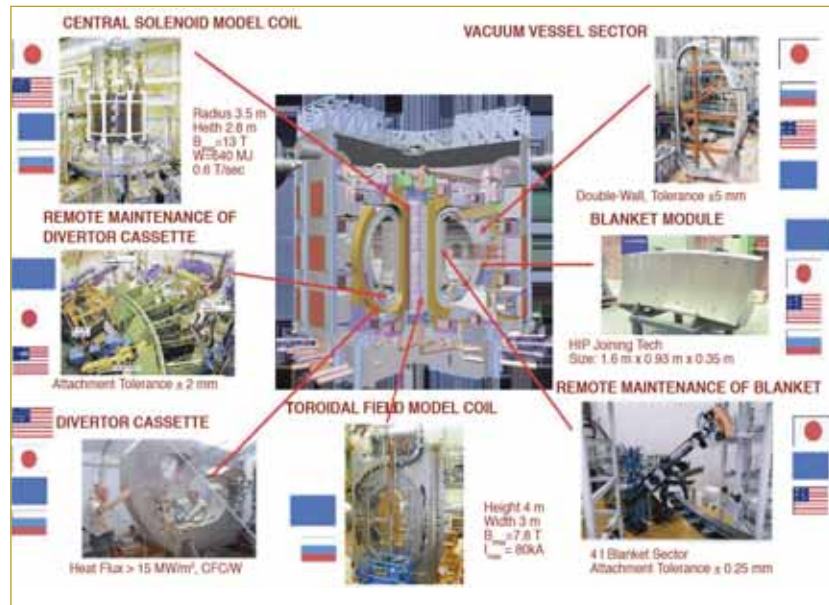


Figura 5. Ejemplo de Confinamiento Magnético: Proyecto ITER.

no: deuterio y tritio, la temperatura de ignición es superior a los 50 millones de grados, y cuando sólo 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 2000 millones de grados, en el del oxígeno de unos 3000 millones y en el del silicio de unos 5000 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 científico 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 sólo 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 sólo 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, que compense 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.

En la Fusión por Confinamiento Magnético, se ha de asegurar en primer lugar un funcionamiento estacionario en continuo. Adicionalmente, se está investigando para conseguir materiales que por una parte sean resistentes a una fluencia térmica muy elevada (por efecto de la interacción con las partículas cargadas y radiación), así como resistentes a la irradiación neutrónica y por otra parte tengan una activación neutrónica reducida o muy baja, de manera que se minimicen los residuos al final de vida de la planta generando un muy pequeño volumen controlable en pocos años en superficie. El diseño final de las envolturas responsables de la extracción segura de energía y de la reproducción de tritio en la planta ha de ser demostrado. El diseño final del elemento divertor ha de ser capaz de aguantar las cargas térmicas a las que estará sometido durante una vida lo más larga posible. Tiene que haber una comprobación de los sistemas en general y del mantenimiento remoto en particular (incluyendo diagnosis) bajo condiciones extremas de radiación. Por último se ha de demostrar la



Figura 6. Ejemplo de confinamiento inercial: Proyecto HiPER.

viabilidad de los sistemas superconductores.

El proyecto en curso más representativo es el Reactor Termonuclear Experimental Internacional, ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) (Figura 5) que se construirá con apoyo de Europa, Japón, Rusia, EEUU, China, Corea del Sur, 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 megavatios/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, así como realizar la prueba de todos los elementos claves 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 la misma, con un periodo de operación de 20 años. Este proyecto servirá de experiencia para DEMO, el siguiente paso en la estrategia europea en confinamiento magnético. Otro proyecto en curso de mucha relevancia es IFMIF (*International Fusion Materials Irradiation Facility*).

Con respecto a la Fusión por Confinamiento Inercial, en primer lugar se ha de elegir la opción óptima entre ignición central y rápida y las tecno-

logías involucradas. Se ha de 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. También habrá que 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. Por último habrá que 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.

Los proyectos en curso más representativos son la *National Ignition Facility* (NIF, en LLNL, EEUU), [27] y LIFE, HiPER (Figura 6), [28] y [29], FIREX I/II (Japón), [30] y LIFT (Instituto de la Ingeniería del Láser de Osaka, Japón). En el caso del NIF, se prevé conseguir la Ignición del Combustible (DT) a finales de 2011 o principios de 2012, donde se pronostica 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.

ASPECTOS ESPECÍFICAMENTE NUCLEARES

Por último, una energía nuclear sostenible tiene que tener en cuenta aspectos como la no proliferación o la especial importancia de la seguridad nuclear, [31] y [32].

En el caso de la no proliferación, los procesos de separación para el procesamiento del combustible usado ya hay diversas estrategias en lo referente a la composición del combustible que dificultan la extracción de Pu-239, para evitar riesgos de robos de material para usos no civiles.

Una gran ventaja del uso del combustible MOX por una parte y de los reactores rápidos por otra, es la posibilidad de reciclar el armamento militar de los países con proliferación nuclear, que en términos de sostenibilidad es cambiar un riesgo potencial por energía eléctrica prácticamente limpia de emisión de gases de efecto invernadero.

Con los reactores de fusión ese problema no existe en ningún caso, [33].

Con respecto a la seguridad nuclear, el parque mundial de centrales nucleares ha demostrado durante más de 50 años ser robusto y capaz de operar con fiabilidad. Desgraciadamente, se ha producido tres accidentes graves en la historia de esta tecnología: uno de diseño soviético (Chernóbil, Ucrania, antigua Unión Soviética, 1986), de graves consecuencias radiológicas y los otros dos en reactores occidentales (La Isla de las Tres Millas, EEUU, 1979) y recientemente Fukushima (Japón, 2011). De estos accidentes se siguen extrayendo numerosas lecciones aprendidas, que han ayudado y ayudarán a mejorar aún más la seguridad de esta tecnología, ante eventos externos e internos, naturales o no.

En el caso de los reactores de Generación IV, son varias las dificultades que es necesario abordar debido a la especial naturaleza de dichos diseños, como el hecho de ser refrigerados algunos de ellos con metales líquidos. Estas diferencias en diseño con respecto a las generaciones anteriores plantean nuevos retos relativos a la seguridad nuclear que deben ser solventados para la construcción de un parque de producción eléctrica de dichas plantas en el futuro. No obstante, se cuenta con una gran experiencia en la operación de ese tipo de reactores, algunos de ellos, como los refrigerados por sodio, desde los años 50, como el EBR-I (1951, *Idaho National Laboratory*) que fue el primer reactor

nuclear que generó electricidad (aunque nunca operó de forma comercial), por lo que parte del camino ya está recorrido.

Con respecto a la fusión nuclear, la ventaja reside en la seguridad intrínseca de los dispositivos, lo que significa que en caso de accidente no se produce una liberación masiva de residuos radiactivos a la atmósfera, [34]. Aunque no hay un accidente intrínseco del sistema, sí se deberá de 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.

CONCLUSIONES

En el ámbito de la sostenibilidad energética aparecen diferentes retos tecnológicos que la humanidad debe afrontar hasta conseguir en un futuro, todavía no definido con claridad, un desarrollo energético sostenible, toda vez que el producido en los últimos cien de años está muy lejos de serlo.

La emisión de gases de efecto invernadero es un problema con solución tecnológica siempre que se acompañe de una voluntad política real, ya que hay tecnologías disponibles que facilitan la transición hacia una generación libre de CO₂. La lucha contra el cambio climático, y el uso de energías de muy bajas emisiones, entre ellas la nuclear, constituye uno de los retos más graves de la humanidad en la actualidad.

En ese marco, el papel de los actuales reactores de fisión y de los que están en construcción es vital para el futuro a medio plazo (los próximos 50 años), plazo durante el cual las barreras tecnológicas y los retos científicos de los sistemas de Generación IV y de fusión han de ser superados para asegurar un desarrollo lo más sostenible posible para las futuras generaciones que habiten el planeta.

REFERENCIAS

1. Fiore, K. Nuclear energy and sustainability: Understanding ITER. *Energy Policy* 34 (2006) 3334–3341
2. Our common future: report of the World Commission on Environment and Development. Oxford, Oxford University Press, 1987. <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>
3. Clift, R. Climate change and energy policy: The importance of sustainability arguments. *Energy* 32 (2007) 262–268
4. Hernandez, F. et al. Energy sustainability and global warming in Spain. *Energy Policy* 32 (2004) 383–394

5. Tainter, J.A. Energy, complexity, and sustainability: A historical perspective. *Environ. Innovation Soc. Transitions* (2011), doi:10.1016/j.eist.2010.12.001
6. N. Onat et al. The sustainability indicators of power production systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 3108–3115
7. Jacobson, M.Z. et al. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. *Energy Policy* 39 (2011) 1154–1169
8. Delucchi, M.A. et al. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part II: Reliability, system and transmission costs, and policies. M.A. Delucchi, M.Z. Jacobson / *Energy Policy* 39 (2011) 1170–1190
9. Fthenakis, V. Sustainability of photovoltaics: The case for thin-film solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 2746–2750
10. NEA. Uranium 2007: Resources, Production and Demand. OECD Publications, Paris. 2008.
11. Martínez-Val, J.M. y Piera, M. Nuclear fission sustainability with hybrid nuclear cycles. *Energy Conversion and Management* 48 (2007) 1480–1490
12. LIFE webpage: https://lasers.llnl.gov/about/missions/energy_for_the_future/life/
13. Bradshaw, A.M. et al. Is nuclear fusion a sustainable energy form? *Fusion Eng. Des.* (2011), doi:10.1016/j.fusengdes.2010.11.040
14. Ward, D.J. The contribution of fusion to sustainable development. *Fusion Engineering and Design* 82 (2007) 528–533
15. D’haeseleer, W.D. The importance of fusion development towards a future energy source. *Fusion Engineering and Design* 66–68 (2003) 3–15
16. Lechon. Y. A global energy model with fusion. *Fusion Engineering and Design* 75–79 (2005) 1141–1144
17. Hamacher, T. et al. A comprehensive evaluation of the environmental external costs of a fusion power plant. *Fusion Engineering and Design* 56–57 (2001) 95–103
18. Bechmann, G. International power supply policy and the globalisation of research: the example of fusion research. *Fusion Engineering and Design* 58–59 (2001) 1091–1095
19. Han, W.E. Revised assessments of the economics of fusion power. *Fusion Engineering and Design* 84 (2009) 895–898
20. Ingelstam, L. Socio-economic aspects of fusion: research in the European context. *Fusion Engineering and Design* 46 (1999) 423–431
21. Vaillancourt, K. et al. The role of nuclear energy in long-term climate scenarios: An analysis with the World-TIMES model. *Energy Policy* 36 (2008) 2296–2307
22. Lenzen, M. Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review. *Energy Conversion and Management* 49 (2008) 2178–2199
23. Uemura, S. et al. Environmental and economical assessment of various fusion reactors by the calculation of CO₂ emission amount. *Proceedings of ITC18, 2008*. P1-40
24. Goethem, V. Nuclear Fission, Today and Tomorrow: From Renaissance to Technological Breakthrough (Generation IV)- Part I (and II), *ATW* 55 (2010), 7 Juli (and 8/9, August/ September)
25. Perlado J.M. La Fusión como Fuente Masiva en Energía. *Ingeniería y Territorio N.90 (ENERGÍA III)* (2010) pgs. 72-81
26. Hamacher, T. et al. Can fusion help to mitigate greenhouse gas emissions? *Fusion Engineering and Design* 58–59 (2001) 1087–1090
27. NIF webpage: <https://lasers.llnl.gov/>
28. Perlado J.M., Gizzi L., Rus B., Neely D., Strangio C., Dunne M. Chamber responses and Safety and Fusion Technology in HiPER facility. *Proc. Nuclear Fusion, IAEA Editions* (2010) IFE 1-5.
29. HiPER webpage: <http://www.hiper-laser.org/>
30. Azechi, H. The FIREX Program on the Way to Inertial Fusion Energy. *IFSA 2007, Conference Series* 112 (2008)
31. Kessler, G. Requirements for nuclear energy in the 21st century: nuclear energy as a sustainable energy source. *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 40, No. 3-4. pp. 309-325, 2002
32. Piera, M. Sustainability issues in the development of Nuclear Fission energy. *Energy Conversion and Management* 51 (2010) 938–946
33. Perkins, L.J. The role of inertial fusion energy in the energy marketplace of the 21st century and beyond. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 415 (1998) 44-60
34. Perlado J.M. La Generación de Energía por Fusión Nuclear y su alternativa de Fusión por Láser. Conferencia en Caja Burgos en las Sesiones de la Ciencia (2010). DIVULGA Ediciones S.A. ■