

Energías para el futuro: un breve recorrido hasta el laboratorio ITER

Pere Valls Puyalto
pvalls@terra.com

INTRODUCCIÓN: ENERGÍAS PARA EL FUTURO

El siglo XX ha supuesto el fin de la *geoinocencia*, me atrevo a calificar así a aquel convencimiento humano ancestral que suponía cándidamente que la Tierra era inagotable, en extensión y recursos. Hace un poco más de 500 años ya empezamos a poner límites geográficos, conforme descubríamos nuevas tierras; a la vez que se nos mostraban recursos aparentemente ilimitados, íbamos empero dibujando con mayor concreción el mapamundi de un planeta, inmenso pero finito y de límites conocidos. La época colonial y la expansión de la civilización europea en América, África y Asia explotó sin reparos los recursos naturales; a nadie le cabía en la cabeza que pudieran agotarse, o que determinados usos excesivos pudieran en el futuro tener consecuencias nefastas. Todo ello ha debido ser revisado, seguramente por primera vez en la historia de la Humanidad, durante el recién acabado siglo XX.

Iniciamos un siglo XXI con una civilización extremadamente dependiente de la energía y a la vez muy sensibilizada con respecto a nuestra responsabilidad hacia el planeta. Hacia los años 1970 empezaron a aparecer estudios y opiniones contrastadas que ponían en cuestión la

viabilidad de un desarrollo sin límites (1). Consecuencia de ello es la aparición de un nuevo concepto: la sostenibilidad (2). Entendemos por sostenibilidad en cualquier ámbito de la actividad humana, la planificación racional de las actividades de manera que *puedan ser satisfechas nuestras necesidades actuales, sin poner en peligro las de generaciones futuras*. Así deberíamos asegurar que nuestros descendientes puedan recibir un planeta en unas condiciones nunca peores que el que recibimos nosotros.

La **sostenibilidad energética** supone poder asegurar que la generación futura dispondrá de unos recursos al menos iguales a los que disponemos hoy. Pero las principales fuentes energéticas de que disponemos hoy son energías fósiles; no sólo no van a conservarse, bien al contrario se agotarán más pronto o más tarde, sino que además continuar con su consumo a gran escala compromete otras exigencias de la sostenibilidad, en concreto poder legar a las generaciones futuras un medio ambiente no más deteriorado del que recibimos nosotros (3).

Previsión de la distribución del consumo energético de Europa para el 2030, suponiendo que no se aplicase ninguna medida correctora a la situación actual (Fuente: **Green Paper U.E.**)

39% petróleo
29% gas natural
19% carbón

8% renovables (entre las que se cuenta la incineración de biomasa y biogás)
6% nuclear (fisión)

de estas fuentes de energía, más del 75% deben importarse.

Es evidente que, de continuar así, no solo no aseguraríamos lo más mínimo la sostenibilidad energética, además pondríamos a Europa en una situación de clara desventaja frente a Estados Unidos; puesto que nuestros recursos energéticos propios son mucho más limitados. La reacción ante esta situación no debe hacerse esperar. Las actuaciones son diversas, no hay una solución única:

- Eficiencia energética (4), que significa poder desarrollar las mismas tareas consumiendo menos energía. Ello es posible mejorando el rendimiento de los sistemas y reaprovechando las pérdidas de energía para otras aplicaciones paralelas. Se define la **Intensidad energética** de un país o comunidad como:

Intensidad energética = (Energía total consumida) / (PIB)

Un informe de la IEA (Asociación Internacional de la Energía) expone que la intensidad energética global de los países asociados a ella, ha descendido un 45% desde el año 1973.

- Sustituir las energías convencionales por las renovables es otra línea de trabajo.

Porcentaje actual y propuesto para el 2010 de energías renovables frente al total.

	EUROPA		ESPAÑA	
	Actual	2010	Actual	2010
	3'2 %	13'9 %	3'6 %	20 %
	12'5 %	22'1 %	17'5 %	29'2 %
	(a)	(b)	(a)	(b)

(a) No se computa la energía de origen hidroeléctrico (grandes embalses)

(b) Se tiene en cuenta la energía hidroeléctrica

Fuentes: UE y Plan Energético Nacional español

Sin embargo las energías renovables, como se ve, no suponen una alternativa a las tradicionales de origen fósil. Además algunas energías renovables, hasta ahora conceptuadas como “buenas”, empiezan a plantear problemas de aceptación social. Así ocurre con los parques eólicos y con incineradoras de biomasa (que aportan CO₂ al aire).

Además los beneficios ambientales de las energías renovables, unidos a su aceptación social, han llevado a muchas administraciones a financiar su aplicación. En consecuencia se puede correr el peligro de disponer de una mejor energía, pero menos competitiva.

- Transparencia económica del coste de la energía, lo que significa que el coste de la energía debe tender a ser el real. ¿Qué implica esto? Por una parte pone en cuestión la subvención de energías por considerarlas “mejores”. Por otra impone la necesidad de que el coste de la energía **internalice** todos sus efectos derivados. Ello significa que si el consumo de una energía implica la producción de residuos o daños al medio, el coste de su reparación o de los medios para evitarlos debe cargarse directamente al coste inicial de la energía. De la misma manera como los ciudadanos pagamos en la factura del agua urbana su posterior depuración, esto sólo se aplica de forma rigurosa en España con la energía eléctrica de origen nuclear; en la factura eléctrica se pagan los costes de la financiación del tratamiento y almacenaje de residuos, así como los del desmantelamiento de la Central Nuclear de Vandellós I (5).

- Finalmente cabe plantearse alternativas energéticas a gran escala. En este sentido se abren dos caminos: en primer lugar replantearse la moratoria a la energía eléctrica de origen nuclear por fisión; en este sentido se tiene el ejemplo de Finlandia, país que ha decidido apostar por la construcción de una nueva planta de fisión nuclear, rectificando así la prohibición que había aprobado años antes. Ello es debido en gran medida a la aplicación de nuevas tecnologías que hacen esta fuente de energía todavía más segura. Otra es invertir en la investigación de la energía originada en la fusión nuclear, en ello consiste el proyecto ITER, el laboratorio de fusión nuclear; proyecto por cuya ubicación compitió Vandellós. No se trata en este caso de esperar un resultado inmediato, se habla de un periodo de 10 años de construcción y 20 de investigación, por lo que, en el mejor de los casos, cabría esperar resultados tecnológicamente rentables para dentro de 30 años.

En lo que sigue de este artículo analizaremos el futuro de la energía nuclear. Empezaremos por intentar resumir qué es la energía de fisión y por qué ha despertado tanto rechazo en tan amplios sectores de la sociedad, así como intentaremos exponer qué aspectos nuevos han descubierto en ella los ciudadanos de países como Finlandia, para volver a implantarla.

EL TURBIO NACIMIENTO DE UNA NUEVA ENERGÍA

El descubrimiento de la fisión nuclear

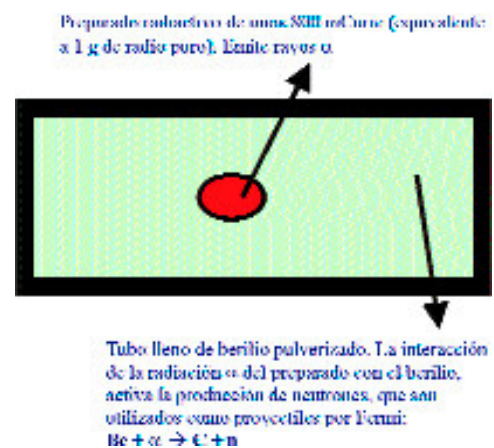
La generación de energía eléctrica a partir de la fisión nuclear, las “centrales nucleares”, es una poderoso

sa herramienta energética; pero el rechazo social que ha generado a lo largo del siglo XX ha sido enorme. Ciertamente es que entraña un peligro en su explotación y también que genera una herencia complicada en cuanto a los residuos; pero precisamente por estos motivos está sometida a un riguroso control, cosa que no siempre se puede decir de otras actividades. Seguramente el origen de este rechazo se remonta al origen de su descubrimiento y a la relación que guarda con las armas nucleares. Al recuerdo de las bombas nucleares hay que sumar la presión mediática e ideológica que, en torno al poder nuclear, constituyó el argumento central de la guerra fría y el status quo mundial durante más de medio siglo XX.

Para describir la gestación de la física nuclear, podríamos remontarnos muy atrás en el tiempo; pero sólo lo haremos hasta 1934, cuando **Enrico Fermi** (1901-1954), después de dar explicación a la desintegración β , pronosticó que sería capaz de generar artificialmente el elemento número 93 de la tabla periódica. Este elemento es el neptunio (Np), un transuránico, es decir un elemento posterior al uranio, que no existe de forma natural en nuestro planeta.

En aquellos años ya se habían hecho experiencias con reacciones nucleares, bombardeando un núcleo con partículas α y protones. Sin embargo al poseer estas partículas carga eléctrica positiva, sufrían interacciones con los núcleos atómicos pesados y eran repelidas. Fermi buscaba un tipo de proyectil que no presentara estos problemas. El descubrimiento por parte de **Chadwick** del neutrón en 1932 le dio la solución. Fermi desarrolló una técnica de bombardeo de berilio por medio de rayos β (a su vez estos emitidos por una fuente de radón), con producción de neutrones; mediante estos neutrones bombardeaba núcleos, con la esperanza de que se produjera la absorción del neutrón. Fermi inició sus trabajos en Italia y, partiendo de unos recursos más bien escasos, supo rodearse de un equipo científico muy hábil; obtuvo resultados convincentes y rápidos, que le llevaron a situarse en poco tiempo a la cabeza de la investigación nuclear mundial. Poco más tarde su equipo se deshizo, una parte viajó con el propio Fermi hacia los EUA, mientras que alguno de sus colaboradores, como Pontecorvo, marchó a la URSS. Otros científicos también trabajaban con el bombardeo neutrónico, pero la idea de Fermi era probarlo con átomos como el uranio, de manera que después de la absorción del neutrón resultara un núcleo inestable; ello daría lugar a radiactividad artificial, algo que todavía no se había conseguido nunca.

Los trabajos de Fermi se desarrollaron con gran premura y muchas veces sin tomar demasiadas precauciones, ni conocer los riesgos: murió de leucemia. Consiguió una muestra de material radiactivo, gracias a un amigo que trabajaba en un hospital (equivalente casi a un gramo de radio puro) y otros colegas químicos le prepararon un extenso surtido de muestras puras de prácticamente todos los elementos químicos, desde el hidrógeno hasta el uranio. En 1934 inició una serie de experimentos, bombardeando los núcleos de las diferentes muestras.



“Fuente de neutrones” de Fermi

Los resultados alcanzados fueron espectaculares, de 68 átomos irradiados, 47 se volvieron radiactivos. El Flúor (F, elemento 9) fue el más ligero que consiguió activar; el Uranio (U, 92) fue el núcleo más pesado. El uranio natural es ya de hecho un material radiactivo, pero muy lento, su vida media es de miles de millones de años; sin embargo al ser activados artificialmente el tiempo de semidesintegración es de menos de 15 minutos. Una observación particularmente curiosa que realiza Fermi es que, cuando se interpone entre la fuente de neutrones y el material a bombardear agua (también otras sustancias como parafina o el grafito), la activación del material es mucho mayor. Es decir que la presencia de agua aumenta la probabilidad de que los neutrones hagan blanco. El mismo no tarda en dar la explicación. El agua, así como otros materiales interpuestos, contiene hidrógeno; el núcleo de hidrógeno (un protón) tiene una masa igual a la del neutrón, la interacción entre neutrón y protón provoca la pérdida de energía cinética del neutrón (el neutrón obtenido de la fuente de berilio tenía una gran velocidad cercana a la de la luz, era un neutrón rápido; después de muchos choques con los núcleos de hidrógeno se convierte en un neutrón lento, con una velocidad de unos 2 Km/s),

a esta velocidad la efectividad como proyectiles de los neutrones es mucho mayor. Pero la mayor novedad descubierta por Fermi en este experimento es que los elementos producidos a partir del bombardeo del uranio 92, tienen números atómicos posteriores: por primera vez el ser humano ha fabricado elementos artificiales nuevos, que no existían antes en la Tierra (6). Para poder identificar los nuevos elementos generados, Fermi utiliza las técnicas descubiertas hacía poco por el químico-físico **Otto Hahn**.

En el año 1934 la situación en Europa era muy complicada, hacía dos años que en Alemania gobernaba el nacionalsocialismo de Hitler. En 1933 se celebró la IX reunión de física alemana en Wurzburg y progresivamente se inicia un control político sobre la comunidad científica. La profesora **Lise Meitner**, colaboradora de Hahn deberá huir a Suecia, por ser judía; el propio **Max Planck**, científico de gran renombre, sufre ataques y un hijo suyo, que participaba en la resistencia anti-hitleriana, es ahorcado por el Tercer Reich. Fermi abandonará por un tiempo la experimentación y volverá a los estudios teóricos, es en esta época cuando desarrolla los fundamentos de la estadística de Fermi (hoy conocida como de Fermi-Dirac), aplicable a las poblaciones de partículas indistinguibles sometidas a un principio de exclusión (como los electrones); más tarde, ante las imposiciones del régimen de Mussolini, marchará a los Estados Unidos, como profesor en la Universidad de Columbia en Nueva York. Durante estos años Hahn toma el relevo experimental desde su laboratorio en Alemania y, pese a las dificultades políticas y sociales, consigue un gran avance. Hahn prosigue los trabajos en torno al bombardeo de uranio con neutrones lentos, como productos de estos bombardeos consigue identificar los nuevos elementos del 93 al 97, ello está de acuerdo con el camino iniciado por Fermi, pero algo nuevo se presenta. **Irene Curie** en Francia ya había advertido que realizando experimentos similares había encontrado un elemento distinto, ahora Hahn logra confirmarlo y lo identifica como radio y también trazas de actinio, sin embargo experimentos más precisos posteriores parecen mostrar que no se trata exactamente de radio, sino de bario.

¿Qué significa este hallazgo? Los trabajos de Fermi habían permitido descubrir la absorción de un neutrón por el núcleo de uranio y la obtención de un núcleo más pesado. Pero el descubrimiento de bario hecho por Hahn iba en sentido contrario: a partir del bombardeo del uranio, elemento 92, se obtenía un núcleo mucho más ligero, el bario es el elemento número 56.

Es evidente que ahí no se había absorbido un neutrón, sino que el neutrón había roto el núcleo de uranio en otros más pequeños. Hahn acababa de descubrir la **fisión nuclear**. Hahn estaba realmente sorprendido (7). El interés de este hallazgo es de tipo energético, en la escisión del uranio en dos átomos menores se produce un defecto de masa (es decir la suma de las masas de los dos núcleos pequeños es menor que la del uranio). Este defecto de masa se emite en forma de energía térmica, que puede evaluarse según la ecuación de Einstein:

$$E = m \cdot c^2$$

Esta energía desprendida resulta ser enorme: de la escisión de 1 Kg de uranio pueden obtenerse 25 millones de KW·h, una energía equivalente a la que proporcionaría la combustión de unos 3 millones de Kg de carbón.

Aprovechamiento de la mayor fuente de energía nunca vista

Las perspectivas de poder usar tal fuente de energía son muchas: centrales eléctricas o barcos que pueden funcionar durante largos periodos de tiempo, con unas pequeñas cargas de material de uranio. Pero en medio de tiempos tan violentos, toma fuerza rápidamente la posibilidad de usar esa gran fuente de energía con finalidades destructivas. Corría el año 1939 cuando las revistas científicas empezaron a hacerse eco de la posibilidad de generar reacciones de fisión en cadena, capaces de engendrar cantidades enormes de energía, a partir de una pequeña masa de material; en el mismo año las tropas del III Reich invadían Polonia, en un avance militar imparable, nunca visto hasta entonces. En esos mismos días los más eminentes físicos alemanes, **Hahn, Geiger, Heisenberg** y otros, se encuentran reunidos en el Instituto de Física del Emperador Guillermo, en Berlín. Su objetivo: el aprovechamiento de la energía nuclear. El Ministerio de la Guerra alemán se interesa por los trabajos y se sabe que intentó aunar los esfuerzos de los científicos en torno a algún tipo de proyecto, la certeza la tenemos por la negativa del premio nobel **Meter Debye**, director del instituto de física Berlin-Dahlen, a dirigir este grupo. Los servicios de inteligencia de los demás países no tardarán en transmitir una información clave: ¿está preparando Alemania la bomba atómica?

En estos momentos Fermi se encuentra ya en América y su intervención va a ser decisiva para involucrar

a ese país en la carrera hacia la bomba atómica. En marzo de 1939 se dirige a la US Navy para advertir del peligro de que Alemania esté avanzando en el camino hacia el arma nuclear, en un principio parece que no arrancó grandes seguidores entre los militares. Consigue convencer a Albert **Einstein**, quien en julio de 1939 envía la famosa carta al presidente Roosevelt. La fuerza conjunta del fugitivo de la Alemania nazi y el de la Italia fascista será decisiva: "Alemania, donde se ha descubierto la escisión del uranio, no descansará hasta conseguir el resultado práctico de su descubrimiento. Los nazis construirán la bomba atómica". La primera partida económica que destina el gobierno americano es de 6.000 \$, en febrero de 1940; en noviembre del mismo año se pone a disposición de la Universidad de Columbia, donde trabaja ahora Fermi, la cantidad de 40.000 \$. En 1945 se habrán llegado a invertir 2.000 millones de dólares en los proyectos para construir la bomba atómica. Nunca sabremos con certeza hasta qué punto Fermi estaba convencido realmente de la posibilidad de que los nazis desarrollaran la bomba y si en realidad no sufrió una alucinación cuando vio la posibilidad de pasar de su pobreza experimental en Roma, a los inmensos recursos que para su investigación podía conseguir en América. Pero la realidad es que los americanos, al principio reticentes, no dudarían luego en usar aquella arma y que, paralelamente, la supremacía científica alemana se iría disipando conforme avanzara la guerra: falta de recursos económicos, desertión de científicos brillantes e incompetencia de la burocracia del partido nazi fueron las principales causas.

En el encuentro de físicos nucleares de Washington, **Rutherford** (un científico ya mayor, pero muy respetado, no en vano a él se debía el desarrollo del modelo atómico) advirtió de que en realidad en el uranio usado en los experimentos, podían existir varios isótopos y que sólo uno de ellos fuese el que iniciara la fisión espontánea. Ernest **Lawrence** es un físico que trabaja en la universidad de Berkeley en California, su mayor obra ha sido construir un potentísimo ciclotrón, que alcanza energías de hasta 32 MeV; en 1941 va a plantearse cómo aprovechar los potentísimos electroimanes de su aparato, para separar por campo magnético el U238 del U235. Para ello decide desmontar el ciclotrón y construir un nuevo aparato, que denominaría *calutrón* (California University Cyclotron). A finales de año conseguiría un ritmo efectivo de separación de $1\mu\text{g} / \text{s}$ de U235. El U235 podrá usarse como elemento inicial de la reacción de fisión en cadena, en un horno controlado o en una bomba incontrolada. En paralelo

hoy sabemos que los alemanes trabajaban también en la obtención de U235, pero usando técnicas diferentes, pues carecían del ciclotrón; la técnica de separación gaseosa que ellos intentaron, fracasó.

El 7 de diciembre de 1941 se produce el bombardeo de Pearl Harbour, este hecho impondrá un cambio drástico en la política americana en pos del arma atómica. Hasta aquella fecha las investigaciones se llevaban a cabo por grupos independientes, en diferentes universidades, todos ellos supervisados por el Comité de Investigaciones sobre Defensa Nacional. A partir de este momento el presidente del Comité, Vannevar Bush, decide centralizar todos los esfuerzos en un proyecto único. El proyecto recibirá el nombre en clave de **Manhattan District**, y su control será encomendado directamente a un general de brigada: L.R. Groves (8). En un principio el grupo de Nueva York, liderado por Fermi y el de Princeton, se concentrarán en la Universidad de Chicago, bajo la dirección científica de **A.H. Compton**; su objetivo será construir un reactor u horno nuclear, usando uranio natural, puesto que todavía no se es capaz de producir U235 en cantidades suficientes. A lo largo de 1941 se inicia la carga del reactor de Chicago, con unas 6 toneladas de uranio y unos ladrillos separadores de grafito, que actúa como moderador. Se espera que funcione en 1942.



El reactor nuclear CP1 de Chicago estaba constituido por un apilamiento en capas de ladrillos de grafito y bolas de uranio 235 al 98% de pureza.

Para controlar la reacción se sabía que debía actuarse sobre la proliferación de neutrones, para ello se utilizaron unas barras de cadmio, material con una enorme capacidad de absorber estas partículas. Estas barras se introducían y se extraían, en aquel primitivo reactor, de forma manual (9). El 2 de diciembre de 1942 al retirar lentamente las barras de cadmio, que durante la carga del reactor se encontraban introducidas en canales en el interior de la masa de uranio y grafito, la población de neutrones aumenta y el reactor entra por primera vez en estado crítico. En este estado el número de neutrones producidos por fisión es igual al de absorbidos en los choques, con lo cual la reacción nuclear se auto sostiene. En un principio los físicos fueron muy cautos y limitaron la producción de calor del horno a 0'5 W, a los diez días ya eran capaces de extraer 200 W manteniendo el control sobre la reacción; dos años después el primer reactor nuclear indus-

trial, en Hanford, proporciona con máxima seguridad 1 GW de potencia (un millón de KW).

Ahora se sabe que la reacción en cadena es posible. Si se substituye el uranio natural por U235, con una pureza que alcanza el 98%, obtenido en California por **Urey**, discípulo de Lawrence, o por plutonio 239, que se obtiene como residuo de la fisión del uranio natural, ya estamos a un paso de la bomba atómica. En esos mismos meses Alemania empieza a enfrentarse a la derrota: el fracaso del frente ruso en Stalingrado y la derrota de Rommel en El Alamein. Para alcanzar la bomba empero todavía quedan 2 años de trabajo y una inversión de unos 2.000 millones de dólares. La política decidida de los Estados Unidos va a avanzar simultáneamente en tres vías. Primera: impulsar el desarrollo para la obtención de U235 en cantidades importantes, para ello van a construirse las factorías Clinton en Oak Ridge (Tennessee), donde se trabajará a la vez con el método del calutrón y por un nuevo método de difusión de hexafluoruro de uranio gaseoso (este es en realidad el método usado hoy en día para enriquecer el uranio natural destinado a nuestras centrales). Segunda: a la vez se construyen hornos nucleares (de 1 MW en Oak Ridge y en Hanford), con la misma técnica que el de Chicago, para obtener plutonio en cantidades importantes. Tercera: La finalidad de este U235 y plutonio son las instalaciones secretas que se construyen en una región inhóspita en el estado de Nuevo Méjico, a unos 50 Km de la ciudad de Santa Fe, allí se va a crear el laboratorio de Los Álamos, que se pondrá bajo la dirección científica de **Robert Oppenheimer** y que tendrá la misión especial de desarrollar la bomba atómica.

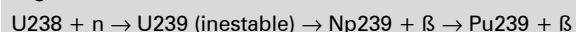
LA REACCIÓN NUCLEAR DEL URANIO. El uranio natural está compuesto en masa en un 99'3% de U238 y en un 0'7% de U235. El U238 es estable, pero el U235 no. De forma espontánea el núcleo de U235 se fisiona según unas reacciones del tipo:



A y B son dos núcleos menores, generalmente Xe140 y Sr93. En la fisión se desprenden en promedio 2'5 neutrones, con una enorme velocidad. Además se desprende una cantidad de energía de unos 200 MeV, aproximadamente la mitad de ella en forma de calor, unos 100 MeV, y la otra mitad es energía cinética de los neutrones.

Para fisionar el isótopo estable U238 debemos bombardearlo con un neutrón (fisión provocada). Pero no podemos usar directamente los neutrones obtenidos de la fisión del U235, puesto que tienen una velocidad demasiado elevada. Debemos frenarlos. Para ello usamos un medio **moderador**, se trata de un material que haga perder velocidad a los neutrones cuando lo atraviesan. Sirve el grafito y también el agua líquida. Cuando un neutrón ha sido moderado, se convierte en un proyectil adecuado

para provocar la fisión del isótopo estable del uranio, según la reacción:



Cuando se agota el U235 cesa la reacción, puesto que como se ve el U238 no produce neutrones en su fisión. Mientras haya U235 la reacción se mantiene; para detenerla o controlarla debe usarse un material con capacidad de absorber los neutrones. Si todos los neutrones proyectiles son absorbidos, la reacción cesa. Un material de este tipo es el cadmio, material del cual se construyen las **barras de control** en las centrales nucleares; también es un buen absorbente el vapor de agua.

En 1945 la guerra con Alemania estaba prácticamente ganada y era evidente que, por más de haberlo intentado, los alemanes habían quedado muy lejos de poder construir la bomba atómica. El espionaje británico se había encargado de localizar las plantas de obtención de agua pesada, en Noruega, y mediante comandos las habían destruido. Sin embargo quedaba la guerra del Pacífico contra Japón. Pero sobre todo se había puesto en marcha en los Estados Unidos una potentísima máquina económico-militar-científica, que ahora era imposible de detener. En el laboratorio de Los Álamos se trabaja sin descanso, el problema central es obtener U235 o Pu239 en cantidades suficientes para desencadenar la reacción en cadena. Mientras tanto un físico teórico alemán, huido a los Estados Unidos al inicio de la guerra, al ser perseguido por judío, **Edward Teller**, tiene una idea. Mediante cálculos demuestra que si una mezcla de deuterio y tritio se calienta a 50 millones de grados, se produce una reacción exotérmica que desprende grandes cantidades de calor. Sin embargo hay varios problemas: el deuterio y el tritio son dos isótopos de hidrógeno prácticamente inexistentes en la atmósfera, sobre todo el tritio. ¿Cómo obtenerlos? Y si dispusiéramos de ellos, ¿cómo alcanzar una temperatura de 50 millones de grados para "encender" la reacción? La solución la tienen servida en Los Álamos. El deuterio y el tritio pueden obtenerse artificialmente por medio de reacciones nucleares y para alcanzar la temperatura de ignición puede usarse una bomba atómica. De este modo nace el concepto de la bomba de hidrógeno (la bomba H). Un ingenio todavía más destructor que la bomba atómica, que de hecho utiliza una bomba atómica como detonante.

En junio de 1945 llegan a Los Álamos las últimas remesas de U235 y de Pu239. Con ellas se preparan dos bombas atómicas. El 16 de julio de 1945 se hace la prueba final. En una zona despoblada del desierto de Alamogordo se ha montado una torre de unos 30 m de altura, en el punto más alto se encuentra la primera

bomba atómica de la historia. Hace explosión a las 5 y media de la madrugada. Los científicos, que han pasado la noche en vilo, temiendo que una tormenta violenta impidiera realizar la prueba, observan la explosión desde búnkeres situados a más de 10 Km de distancia.

Tres semanas más tarde dos bombas atómicas, una de U235 y otra de Pu239, caen respectivamente sobre las ciudades de Hiroshima y Nagasaki. A partir de ese momento cambiarán todos los textos de estrategia militar: ha empezado una nueva era. Años después un científico del equipo de Oppenheimer en Chicago, **Klaus Fuchs**, se pasará al bando soviético y será el iniciador de la carrera nuclear en aquel país.

A pesar de que la energía nuclear ha sido usada a partir de aquellos días para obtener energía, para usos médicos y muchas otras aplicaciones pacíficas; no ha podido liberarse de aquel estigma inicial y del recuerdo constante del mismo que mantuvo el equilibrio mundial durante tantos años después.

FISIÓN Y FUSIÓN PARA OBTENER ENERGÍA

Cuando se plantea la fisión nuclear como herramienta para obtener energía eléctrica en grandes cantidades, surgen dos tipos de inconvenientes básicos:

- La seguridad:
 - ¿es controlable la central en todo momento, para evitar que se convierta en una bomba?
 - ¿es segura la central ante emanaciones radiactivas producidas en averías o incluso durante su funcionamiento regular?
- Los residuos:
 - ¿qué podemos hacer con el material gastado en el reactor, que continuará altamente radiactivo durante miles de años?
 - ¿qué podemos hacer con cantidad de equipos, útiles y ropas, así como con los residuos del desmantelamiento de viejas centrales, que van a quedar activados durante algunos cientos de años?

La poca simpatía popular que despierta la energía nuclear, unido al efecto de estas graves preguntas, llevaron a gran número de países de todo el mundo, entre ellos España, a anular sus proyectos de nuevas plantas.

Ello se conoce como moratoria nuclear. Empero se han continuado explotando las centrales existentes, e incluso se han autorizado modificaciones para aumentar su potencia y engrandecer el espacio reservado a almacenamiento de material combustible ya usado en el reactor.

¿Hasta qué punto todas estas decisiones son correctas? Cuando se observa que en la actualidad sólo algunos países que optan por un desarrollo a toda costa, como China, y que pueden permitirse pocas “delicadezas” ecológicas, siguen construyendo nuevas centrales de fisión, aparentemente parece reafirmarse la corrección de tales decisiones. El rechazo y la desconfianza parecen fundados. Sin embargo hay un punto de inflexión, que debe hacernos como mínimo reflexionar. El 24 de mayo de 2002 el Parlamento finlandés ratificó, por 107 votos a favor y 92 en contra, la construcción de una nueva central nuclear; el proceso se había iniciado en noviembre del 2000, cuando la empresa finlandesa TVO solicitó al Gobierno de aquel país la instalación. En enero del 2002 el Gobierno dio la autorización y se inició un periodo de tramitación parlamentaria y debate público. El resultado ha sido la revisión del criterio de no nuevas plantas nucleares y el caso de Finlandia es interesante en Europa, puesto que es un país con un sistema de representación parlamentaria que acerca muchísimo al ciudadano a las decisiones de estado. Los criterios a favor han sido básicamente cuatro: pese al temor que infunden las centrales nucleares, la experiencia acumulada en torno a ellas no indica que sean instalaciones industriales con alto número de incidencias; las centrales nucleares de última generación incorporan requisitos de seguridad que las hacen todavía más seguras (de hecho estos nuevos sistemas se incorporan también a las centrales de generaciones anteriores, durante las paradas técnicas); en tercer lugar porque se consideró más relevante la disminución de emisiones de CO a la atmósfera que se obtiene generando electricidad a partir de la fisión, frente a los problemas de almacenamiento y tratamiento futuro de los residuos radiactivos y en cuarto lugar el precio del KW·h producido de energía eléctrica, que es más económico usando la fisión que cualquier otro medio (incluso integrando en el precio los costes de reciclado de los residuos). ¿Significará esto el inicio de un cambio de posición en la opinión pública frente a la generación de electricidad a partir de la fisión?

En la actualidad Finlandia dispone de 4 plantas nucleares en funcionamiento:

Loviisa 1 (1977)	488 MW	Olkiluoto 1 (1978)	840 MW
Loviisa 2 (1981)	488 MW	Olkiluoto 2 (1981)	840 MW
(10)			

Lo cierto es que en torno a la seguridad de las plantas nucleares existe un cierto grado de confusión, principalmente originado en el desconocimiento de las diferentes tecnologías de centrales nucleares que existen. El caso más evidente lo tenemos en la obligada comparación con Chernobil, cuando se trata de hablar de cualquier central nuclear. Pues centrales como las de Chernobil sólo las hay en Rusia y en alguna exrepública soviética, puesto que aquella tecnología no fue nunca usada en otros países. Curiosamente las centrales soviéticas no disponían de recinto de contención, como todas las del resto del mundo. En España por ejemplo en la actualidad existen dos tipos de centrales nucleares, las de tipo PWR (agua a presión) y las de tipo BWR (agua en ebullición), en el pasado existió una central de otra tecnología, grafito-gas CO₂, hoy en día totalmente desmantelada (se trata de Vandellós I, que ha sido totalmente desmantelada por Enresa (11)).

Algunos países desarrollados están empezando a reconsiderar el uso de la fisión para obtener energía. Se habla de una IV generación de centrales nucleares, que aprovechen todo lo que hasta la fecha se ha desarrollado en seguridad y gestión; también se piensa en usar el combustible gastado de las actuales centrales nucleares, como combustible de algunos de estos nuevos modelos (este es el caso de la tecnología ADS). Algunos países han apostado por el almacenamiento geológico profundo de los residuos de alta actividad; pero otros, entre los cuales se encuentra España, se inclinan por el almacenamiento en piscinas, en los propios recintos de las actuales centrales, o por la vitrificación (un proceso caro y que no se realiza en España, aunque los contenedores con los residuos vitrificados volverán de nuevo a nuestro país después de su procesado). Los países que hemos escogido esta segunda vía, si prospera el desarrollo de centrales que usen combustible gastado, podremos fácilmente usar nuestros residuos en ellas, o venderlos a otros países como combustible útil.

ESQUEMA BÁSICO DE UNA CENTRAL PWR

En una central nuclear distinguimos dos espacios básicos: el recinto hermético de contención, donde se aloja el reactor nuclear y sus equipos periféricos y la central térmica convencional, donde se encuentran los generadores eléctricos (alternadores) y todos los sistemas análogos a los de una central térmica cualquiera, que obtuviera el calor necesario para vaporizar el agua mediante la incineración de algún tipo de combustible.

Las centrales PWR, como las de Ascó y Vandellós II existentes en Cataluña, son probablemente las más seguras, puesto que usan un criterio de seguridad positiva: si en

un caso límite la central quedase fuera de control, se auto genera una reacción que extingue la reacción nuclear. Como contrapartida el rendimiento de estas centrales es un poco menor al de sus hermanas BWR.

El reactor aloja el combustible nuclear, uranio enriquecido. La fisión del U235 produce los neutrones rápidos. Unos canales ascendentes permiten la circulación de agua líquida, esta agua tiene dos funciones: extraer el calor generado en el interior del reactor y actuar como moderador de los neutrones rápidos. Estos neutrones una vez moderados, actúan como proyectiles con los núcleos de U238, que se fisionan. El control sobre la población de neutrones-proyectil se realiza mediante unas barras de cadmio, que se introducen verticalmente en el cuerpo del reactor. Estas barras se sostienen mediante unos potentes electroimanes y bajan por gravedad; en caso de fallo, entrarían espontáneamente dentro del reactor.

Pero la máxima seguridad la aporta el agua del circuito primario de refrigeración del reactor. En un caso límite en que la población de neutrones se descontrolase, el calor generado en el reactor haría que esta agua iniciase su vaporización. Se tiene que el vapor de agua es un excelente absorbente de neutrones. Ahí se encuentra la seguridad: la formación de vapor absorbe los neutrones y la reacción se auto extingue.

Finamente cabe citar la función del presionador. Tiene la función de impedir que el agua que circula por el reactor, que se encuentra a unas temperaturas en torno a los 300 C, se mantenga líquida sin vaporizarse. Para ello el circuito debe estar a unas 150 atm de presión. El presionador es un gran cilindro, que en su parte superior contiene aire y unas potentes resistencias eléctricas. Calentando el aire, éste se dilata y comprime mediante un émbolo el circuito de agua. En caso de fallo, las resistencias no calentarían el aire y el agua no podría mantenerse a presión, entonces se formaría vapor, que extinguiría la reacción nuclear.

Pero existe otra posibilidad, que no es excluyente con nada, sino complementaria. La fusión hace tiempo que se investiga y en concreto en España existe desde hace años en el CIEMAT de Madrid un grupo muy activo y competente, aunque sus posibilidades sean más humildes que las de centros de otros países. Un conjunto de hechos, entre los cuales se encuentra el trabajo de los científicos del CIEMAT, la experiencia del desmantelamiento de Vandellós I y, también hay que decirlo, la buena gestión de las centrales nucleares españolas, sirvió de trampolín para lanzar Vandellós como candidata a sede del ITER. ¿Qué beneficios se obtendrían en caso de haberlo conseguido? ¿Es éste un proyecto que deberíamos apoyar los españoles? Ya avanzo que mi opinión es que sí, pero lo que nos proponemos en esta última parte del artículo es dar una idea muy general y rápida de que podría ser el ITER y a partir de ello y de otras informaciones, cada cual formará su propia opinión.

EL PROYECTO ITER

En los párrafos precedentes hemos comentado como el inicio de la física nuclear sucedió en Europa, pero también como, fundamentalmente a causa de la Segunda Guerra Mundial, su investigación y desarrollo se trasladó a los Estados Unidos. Durante muchos años los EUA han dominado el mercado de las centrales nucleares de fisión, fundamentalmente a través de dos grandes empresas: General Electric y Westinhouse. El proyecto ITER (Internacional Termonuclear Experimental Reactor) tiene como meta desarrollar un reactor nuclear de fusión, del cual se pueda obtener energía eléctrica de forma rentable; aunque los EUA participaron en un principio en este proyecto (ITER nació en una reunión entre Reagan y Gorbachov), más tarde se retiraron, porque consideraron tal vez que suponía una inversión demasiado costosa en una tecnología que, de ser exitosa, sería competidora de la fisión, que ellos dominaban. Así quedaron como patronos del proyecto Europa, Japón, la Federación Rusa y Canadá. ITER se definió como un proyecto tecnológico a medio plazo, ello implica que se esperan de él unos beneficios económicos; "iter" en latín significa "camino" y de hecho este proyecto se ha planteado como un camino hacia la obtención de una nueva forma de energía en grandes cantidades y el máximo de respetuosa con el medio. Información sobre todos los países que participan en ITER, así como las webs de las candidaturas para acoger el laboratorio, pueden encontrarse en (16).

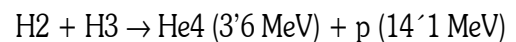
El presupuesto de este proyecto es de 4.000 millones de euros. El país que acoja el laboratorio, caso que podría haber sido España si Vandellós hubiese sido escogida, deberá aportar 800 millones de euros; de hecho en caso de ser España o Francia las sedes, la UE aportaría 400 millones y otros 400 el país. Los estudios realizados muestran como esta inversión es recuperada con creces por el país que acoja la instalación (13), de ahí que todos los países miembros del proyecto hayan presentado candidaturas para acoger el laboratorio. Sin embargo el beneficio fundamental es el desarrollo tecnológico y científico que una instalación de este tipo promueve a su alrededor.

Vandellós tenía competidores. El único competidor europeo era Cadaranche en Francia, se trata del centro neurálgico de la investigación nuclear francesa, donde trabajan centenares de investigadores de aquel país en multitud de proyectos. Cadaranche ofrece unas fantásticas instalaciones, tradición y servicios de acogida

para la comunidad científica. Canadá ofrece unas importantes instalaciones y es el productor de algunas materias primas necesarias para el reactor ITER que, se instale donde se instale, seguramente serán aprovisionadas desde allí. Japón también ofrece experiencia e instalaciones. España ofrecía un emplazamiento idóneo, con todos los servicios requeridos, la experiencia en gestión y control del consejo de Seguridad Nuclear y la experiencia muy reconocida, aunque mucho más modesta que la de nuestros competidores, del grupo de investigación del CIEMAT en Madrid, que opera desde hace años con un prototipo de reactor de fusión, el TJ2 Stellarator. Nuestro posicionamiento era consistente y una buena parte de la comunidad científica era favorable a la candidatura de Vandellós, la cercanía con Barcelona y concretamente con la sección de ingeniería nuclear de la Universidad Politécnica de Catalunya (14) y con la Universidad Autónoma de Barcelona, en cuyo campus se instalará el mayor ciclotrón de Europa y en cualquier caso cabe destacar que la distancia entre Vandellós-Barcelona y Cadaranche-Aix en Provence es relativamente corta, estando unidos ambos emplazamientos por autopista directa y líneas de ferrocarril de velocidad alta.

¿Cómo será el reactor ITER?

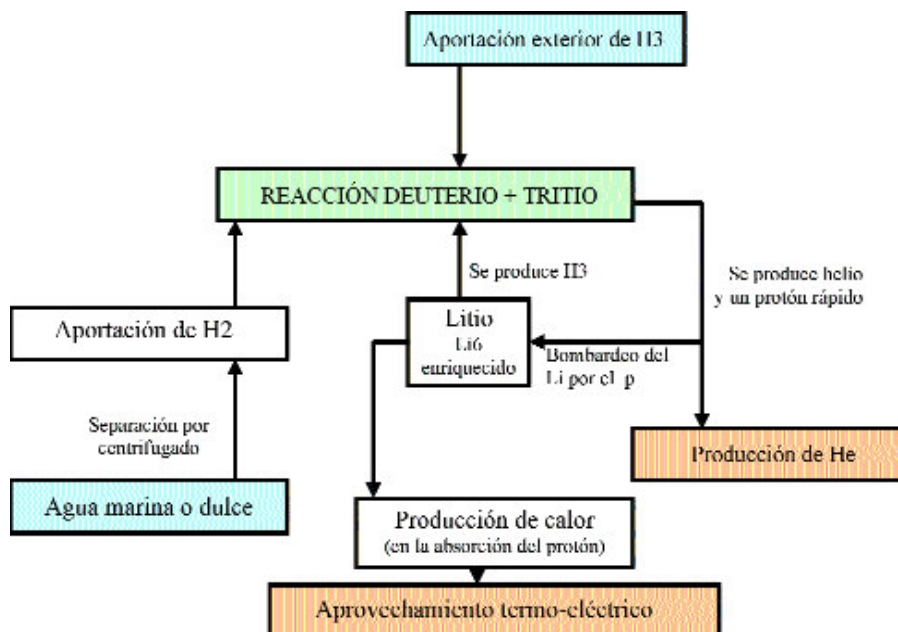
El núcleo del complejo ITER será el reactor de fusión, en el interior del cual se reproducirá una reacción nuclear de fusión, similar a la que tiene lugar en el Sol y las demás estrellas. Como consecuencia de esta reacción se desprende una gran cantidad de calor, que debemos evacuar y aprovechar para producir vapor de agua a presión, con el que impulsar las turbinas, que moverán los alternadores. En concreto en el ITER está previsto provocar la reacción de fusión deuterio tritio:



El deuterio, H₂, es un isótopo del hidrógeno, que se encuentra con una abundancia del 0'015% en volumen con respecto al hidrógeno H₁; pudiéndose separar ambos isótopos de forma relativamente sencilla mediante centrifugación a partir de agua dulce o salada. El tritio H₃ es otro isótopo del hidrógeno, pero éste no se encuentra en la naturaleza; el principal productor de tritio mundial es Canadá, desde donde se abastecerá el reactor ITER. El tritio no es estable, es radiactivo, por lo que su manipulación debe realizarse con la debida precaución. Tiene una vida media de 12 años. Para iniciar el funcionamiento del reactor de fusión se debe aportar una carga externa de H₃, pero en funciona-

miento regular el propio reactor genera el tritio, en todo momento debe cuidarse que todo el tritio que se genera, sea consumido. El siguiente diagrama intenta expli-

car de forma simplificada el funcionamiento de la reacción sostenida:



FUSIÓN NUCLEAR. La fusión nuclear se produce de forma natural en el núcleo de las estrellas, donde las temperaturas de más de 1 millón de grados Kelvin otorgan a dos núcleos de hidrógeno velocidades suficientes como para vencer la repulsión electrostática de sus protones y chocar fusionándose ambos. Holey explica en su teoría como a partir del hidrógeno y mediante reacciones nucleares de fusión sucesivas, se van formando todos los núcleos pesados en el interior de las estrellas. Algunas de las reacciones de esta cadena son las siguientes:

$H1 + H1 \rightarrow H2 + e + \nu$, formación del deuterio y emisión de un electrón y un neutrino (sucede en el Sol)

$H2 + H2 \rightarrow H3 + p$, producción de tritio (proceso que se realiza en Canadá)

$H2 + H3 \rightarrow He4 + n$, reacción que se realizará en el ITER

Una vez otorgada una energía cinética suficiente a los núcleos de H como para que al chocar se produzca la fusión (proceso de calentado del reactor hasta alcanzar el estado de plasma), el choque no es tan probable como pudiera esperarse. El recorrido libre medio de un nucleón dentro del plasma hasta que encuentre otro nucleón y se produzca el choque es de unos 10.000 Km (!!). Así que habrá que mantener una corriente permanente de plasma en estado giratorio, para favorecer que se recorran estas distancias y vayan produciéndose los choques.

Al mismo tiempo es imposible asegurar que dentro de esa frenética corriente de plasma generada en el reactor, va a producirse un único tipo de reacción. Es imposible controlar un proceso que es fundamentalmente aleatorio. Así que con el tiempo el plasma se irá "contaminando" con diferentes núcleos formados en reacciones secundarias. El DIVERTOR es un sistema muy sofisticado de que dispone el reactor, que actúa como un riñón para la

corriente de plasma, eliminando de éste los núcleos "extraños" que eventualmente se van formando.

El calor que fundamentalmente aprovechamos para producir vapor en el reactor, se debe a la absorción de los neutrones producidos en la reacción nuclear.

A partir del deuterio extraído de 1 litro de agua marina, se puede generar la misma energía que con la incineración de 300 litros de petróleo. Por otra parte el helio producido, que es un gas no radiactivo, ni tóxico, ni contaminante, tiene un elevado valor industrial.

Sin embargo producir y sostener la reacción no es en absoluto sencillo. Intentaremos resumir los problemas y soluciones principales, aunque ello desborda la pretensión de este artículo y pueden encontrarse referencias más exhaustivas en otras fuentes (15).

El primer problema es conocido con el nombre de confinamiento del plasma. Se trata de resolver cómo "guardar" el plasma a más de 100 millones de grados Kelvin, estado en que se encuentra el deuterio y tritio durante la reacción. Para ello no sirven paredes convencionales de ningún material existente. Se han dado dos soluciones: el confinamiento inercial y el magnético. ITER usará el segundo procedimiento. El reactor Stellarator del Ciemat en Madrid también usa confinamiento magnético, pero con una tecnología diferente;

el reactor ITER será de tipo Tokamak, tecnología desarrollada inicialmente en la antigua URSS. El sostenimiento del plasma se realiza por suspensión en el interior de un campo magnético muy intenso, entre 5 y 6 Tesla. Este campo magnético se crea mediante una bobina eléctrica (un electroimán toroidal) que rodea la zona donde se encuentra el plasma. La distancia entre el plasma y la bobina no llega a los 5 m. Esta bobina es recorrida por una corriente eléctrica y en ella se usan técnicas de superconductividad, para disminuir la sección necesaria del conductor del bobinado; para que el bobinado presente propiedades superconductoras su temperatura debe mantenerse por debajo de los 4 K. ¡En menos de 5 m tendremos un gradiente de temperatura de millones de grados! El peso total de las bobinas supera las 8.000 toneladas. El sistema de refrigeración de las bobinas superconductoras se realiza mediante He. La extracción del calor producido en la reacción se realiza mediante un circuito de agua a presión (agua a 120 C°, a una presión entre 3 y 4'5 MPa)

Pero en un principio el deuterio y el tritio no se encuentran en estado de plasma, el reactor está frío. Para iniciar la reacción debe calentarse. Para ello existen diferentes técnicas: por absorción de microondas, por efecto Joule mediante resistencias, por compresión adiabática (así es como fundamentalmente ocurre en la Naturaleza, cuando se forma una estrella) o por inyección de átomos neutros. En cualquier caso iniciar el reactor precisa de una fuente muy importante de energía (algunos GW), en el caso de Vandellós se usaría la producción de la vecina central nuclear de Vandellós II para proveer esta energía durante el arranque.

El revestimiento interior de los electroimanes se prevé realizarlo con placas de grafito. Debido al envejecimiento térmico, estas placas de grafito deberán reponerse a lo largo de la vida útil del reactor. Este grafito está catalogado como material radiactivo (activado por bombardeo) y constituye el único residuo de la central. En cualquier caso es un residuo de nivel medio y no alto como el combustible quemado de las nucleares de fisión. La otra prevención radiológica que se opone a estos reactores es la manipulación y generación de tritio (H3) que es radiactivo y en caso de accidente podría escapar.

El diseño del reactor ITER lo hace intrínsecamente seguro, ello significa que en caso de perder el control sobre la reacción, ésta se autoextingue; desapareciendo el calor residual en unos 10 segundos. Cuando se deba hacer frente al desmantelamiento de un reactor de fusión, los residuos que hayan quedado activados,

como las paredes de grafito, tienen tiempos de desactivación por debajo de los 100 años. El combustible usado (hidrógeno) es muy abundante y barato, la energía que generamos en un reactor de fisión con toneladas de uranio, se genera en uno de fusión con algunos kilogramos de hidrógeno. Finalmente las extensiones que ocupa una planta de este tipo son muy reducidas. Y todo ello sin emisión de gases a la atmósfera, como el CO, que producen efecto invernadero.

La innumerable cantidad de aspectos tecnológicos que hay que desarrollar para poner a punto este proyecto, es un motor importantísimo para la investigación y la industria de todos los países que participan en el mismo y muy particularmente del que acoja el laboratorio. Es en este sentido que muchas personas opinamos que se trataba de una gran oportunidad para España. En cualquier caso las referencias que se dan a continuación y un breve paseo por Internet, darán al lector interesado elementos de juicio para formar su propia opinión. Un proyecto así es garantía de felicidad: ¡siempre habrá quien opinará que hemos tenido suerte!

Referencias bibliográficas y generales

1. Informe **Los límites del crecimiento** de Dennis Meadows, pone en cuestión la continuidad del desarrollo por causa del agotamiento de los recursos naturales.
2. Informe de la Comisión de Medio Ambiente y Desarrollo de la ONU de 1978, titulado **Nuestro futuro común**. La comisión fue presidida por Gro H. Brundland y en este trabajo se definió por vez primera el concepto de sostenibilidad.
3. El **Protocolo de Kioto** (1997) planteó la reducción de las emisiones de CO₂ para el 2015, cosa que con toda seguridad se incumplirá ampliamente. La **Cumbre de la Tierra de Johannesburgo** (2002) incidió también sobre los criterios de sostenibilidad.
4. **Introducción a las técnicas de cogeneración**, Pere Valls en el Manual Formativo número 27 de ACTA (puede encontrarse en www.acta.es). Numerosos ejemplos concretos se encuentran en la revista **Eficiencia Energética** que edita el ICAEN (www.icaen.es).
5. Sobre las tareas de desmantelamiento de la Central Nuclear de Vandellós I y de la clausura y restauración de antiguas minas de uranio en Andalucía y de la fábrica de concentrados de uranio de Andujar puede consultarse más información en www.enresa.es

6. Fermi publica sus trabajos en junio de 1934 en la revista **Nature**.
7. Hahn y su colaborador Strassmann manifiestan su perplejidad ante el descubrimiento de la escisión del núcleo de uranio, en un artículo publicado el 22 de diciembre de 1938 en *Die Naturwissenschaften*.
8. En la película **Creadores de sombras** se describe la evolución del proyecto Manhattan; el actor Paul Newman interpreta muy convincentemente al general Groves.
9. La operación de ese primer reactor quedó inmortalizada en el cuadro al óleo de Gary Sheahan titulado "Chicago Pile 1". En él se representan a la mayoría de los científicos que participaron en el proyecto Manhattan, alrededor del reactor. En realidad sólo unos pocos de ellos se sabe que estuvieron en Chicago para la puesta en marcha, pero el pintor los reunió virtualmente, para inmortalizarlos en su obra.
10. Los datos relativos a Finlandia han sido obtenidos en NucNet de 30 de septiembre de 2002.
11. La central nuclear Vandellós I (Tarragona) utilizaba una tecnología originariamente francesa, a lo largo de su vida útil obtuvo el mejor rendimiento alcanzado por todas las de su tipo en Francia. Pocos años antes de llegar al fin de su vida útil, un incendio en un alternador, en el exterior de la zona de protección radiológica, adelantó su cierre definitivo. La experiencia de desmantelado de una central nuclear llevada a cabo por Enresa en Vandellós I es pionera en Europa. Puede recabarse más información en www.enresa.es.
12. Más información en www.ciemat.es. El CIEMAT es un centro de investigación en técnicas energéticas y medioambientales, ubicado en la Ciudad Universitaria de la Complutense de Madrid. Uno de los grupos de trabajo ubicados en este centro es el de fusión nuclear, que trabaja desde hace años con un mini reactor de fusión experimental.
13. Sobre este punto ver el informe elaborado por el Gobierno de Cataluña sobre el posible emplazamiento en Vandellós, CIDEM-Direcció General d'Indústria-Generalitat de Catalunya. Año 2002.
14. Consultar www.senupc.es/fusion
15. Consultar la página del FEEL (Fusion Energy Engineering Laboratory) y la sección de Ingeniería Nuclear de la Universitat Politècnica de Catalunya (<http://www.senupc.es/fusion>)
16. Desde esta página encontrará enlaces a toda la documentación oficial sobre ITER: www.fz-juelich.de/ipp/fusion_links/