



BIBLIOTECA
COMILLAS
Ingeniería

07

ENERGÍA NUCLEAR PARA EL SIGLO XXI

B. YOLANDA MORATILLA
M. MAR CLEDERA
JULIO MONTES (coords.)

ENERGÍA NUCLEAR PARA EL SIGLO XXI

SEMINARIO PERMANENTE EN TECNOLOGÍAS
ENERGÉTICAS

BIBLIOTECA
COMILLAS
Ingeniería

07

PUBLICACIONES
DE LA UNIVERSIDAD
PONTIFICIA COMILLAS

PEDIDOS:
Servicio de Publicaciones
c/ Universidad Comillas, 3
Tel.: 91 734 39 50 - Fax: 91 734 45 70

AUTORES:

Alberto Carbajo – Josep Castellnou – M^a Teresa Domínguez,
Germán G^a Calderón – Luis Enrique Herranz
Adolfo García Rodríguez – Carlos Alejaldre – Isabel Mellado
Agustín Alonso – Juan A. Rubio – José Ramón Armada

ENERGÍA NUCLEAR PARA EL SIGLO XXI

SEMINARIO PERMANENTE EN TECNOLOGÍAS
ENERGÉTICAS

COORDINADORES:

BEATRIZ YOLANDA MORATILLA SORIA
MARÍA DEL MAR CLEDERA CASTRO
JULIO MONTES PONCE DE LEÓN



2009

© 2009 UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
c/ Universidad Comillas, 3
28049 Madrid

© 2009 Alberto Carbajo, Josep Castellnou, M^a Teresa Domínguez, Germán G^a Calderón,
Luis Enrique Herranz, Adolfo García Rodríguez, Carlos Alejaldre, Isabel Mellado,
Agustín Alonso, Juan A. Rubio, José Ramón Armada

Diseño de cubierta: BELÉN RECIO GODOY
ISBN: 978-84-8468-274-5
Depósito Legal: M. 49.454
Impreso por R.B. Servicios Editoriales, S.L.

Reservados todos los derechos. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de este libro por cualquier procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier sistema de almacenamiento o recuperación de información, sin permiso escrito de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS.

Agradecimientos

La Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas en nombre de la Universidad Pontificia Comillas agradece el patrocinio brindado por el FORO NUCLEAR para la edición del presente libro.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	7
PRESENTACIÓN	11
PRÓLOGO	13
RESUMEN EJECUTIVO	17
CAPÍTULO I. ¿Es necesario y viable el relanzamiento de la energía nuclear? El debate sobre la energía nuclear <i>Alberto Carbajo Josa</i>	19
CAPÍTULO II. La industria nuclear española en el mercado de la exportación <i>María Teresa Domínguez</i>	29
CAPÍTULO III. La experiencia de Vandellós <i>Josep Castellnou</i>	35
CAPÍTULO IV. El ciclo del combustible y las reservas de uranio ... Germán García Calderón	41
CAPÍTULO V. La gestión de los residuos nucleares <i>José Ramón Armada</i>	49
CAPÍTULO VI. La revolución de la IV generación nuclear <i>Adolfo García Rodríguez</i>	57

ENERGÍA NUCLEAR PARA EL SIGLO XXI

CAPÍTULO VII. Innovación en la seguridad de sistemas avanzados nucleares	79
<i>Luis E. Herranz</i>	
CAPÍTULO VIII. Los nuevos principios fundamentales de seguridad del OIEA	89
<i>Agustín Alonso</i>	
CAPÍTULO IX. El control de la seguridad de las centrales nucleares ..	105
<i>Isabel Mellado</i>	
CAPÍTULO X. El proyecto <i>ITER</i> : el camino hacia la fusión como fuente de energía	117
<i>Carlos Alejandre</i>	
CAPÍTULO XI. La transmutación: hacia una energía nuclear limpia y sostenible	133
<i>Juan Antonio Rubio</i>	

PRESENTACIÓN

El Comité de Energía y Recursos Naturales del Instituto de la Ingeniería de España y la Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas de la Universidad Pontificia Comillas decidieron en 2006 aunar sus esfuerzos y establecer el “Seminario Permanente en Nuevas Tecnologías Energéticas”. Se trata de un foro de reflexión y debate sobre soluciones energéticas aplicables, de actualidad, que se desarrolla mediante varias conferencias y mesas redondas a lo largo de un curso académico.

El Seminario cubre un tema de interés y actualidad en el ámbito de las Tecnologías Energéticas y para ello invita a profesionales y académicos de reconocido prestigio a que impartan conferencias sobre las diferentes aproximaciones al tema central escogido, pasando seguidamente a establecer un debate con los asistentes. Entre los objetivos que los organizadores nos hemos marcado en este Seminario se encuentra que el enfoque de los temas abordados sea eminentemente práctico, es decir, se centre en las tecnologías técnica y económicamente viables, comparando desde estos puntos de vista las diferentes alternativas y seleccionando las más interesantes para su aplicación tanto en el contexto internacional como en España. Este planteamiento no es incompatible con el rigor científico, sino que trata de combinarlo con el enfoque aplicado que busca el sector empresarial, con el objetivo de lograr un máximo calado y dar sugerencias a los responsables de gestionar la energía en España.

Se han abierto dos vías para alcanzar la repercusión deseada en estas sesiones de reflexión. Por una parte se ha dispuesto una página web pública accesible tanto desde el Comité como desde la Cátedra en la que se recogen las presentaciones de los diferentes ponentes. De este modo en un plazo casi inmediato es posible analizar la información dada en cada sesión. Por otra parte se elabora una publicación que recoge toda la actividad del curso y que se realiza a partir de una transcripción de las confe-

rencias, que una vez montada con las figuras más relevantes de las presentaciones es revisada por los ponentes. Esta publicación se elabora tanto en versión papel como digital¹.

Este volumen es la tercera publicación del Seminario Permanente y recoge las actividades que tomando como centro la energía nuclear se llevaron a cabo en el curso 2008-09. Se realizaron cinco sesiones en las que once ponentes analizaron la oportunidad actual de esta tecnología desde varios aspectos diferentes.

Tanto desde el Comité de Energía y Recursos Naturales como desde la Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas esperamos que esta información resulte útil a la sociedad y contribuya a dar elementos y criterios de juicio a los responsables del ámbito energético, tanto de la Administración como del sector empresarial.

YOLANDA MORATILLA SORIA

*Directora de la Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas
Presidenta del Comité de Energía y Recursos Naturales
Instituto de la Ingeniería de España*

¹ Las diferentes presentaciones llevadas a cabo en el Seminario Permanente, así como las Publicaciones están disponibles en <http://www.upcomillas.es/catedras/crm/seminario.html>.

PRÓLOGO

La energía nuclear siempre es un tema controvertido en una opinión pública no informada objetivamente. El debate nuclear oficialmente no está abierto en España. Se prefieren los comunicados subliminales de organismos técnicamente no competentes con una gran carga ideológica, ignorando que la inserción de la energía nuclear en la economía de un país, es un tema exclusivamente técnico, especialmente en el nuestro, en donde los recursos energéticos con costes razonables son escasos. Como dice el Prof. Velarde en el texto que se está prologando la competitividad de la economía española exige energía barata. No se puede seguir aumentando el déficit tarifario hasta límites insostenibles.

La Universidad Pontificia Comillas, a través de la Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas ha querido dedicar las jornadas anuales a la problemática de la energía nuclear en España. Es misión de la Universidad abrir los debates sobre los temas que la sociedad plantea, de la forma más ecuánime y ponderada, para que puedan servir de pauta a otras instituciones e informar objetivamente al resto de la sociedad. Es una de las misiones de la Universidad. Este es el objetivo fundamental de estas Jornadas

La proliferación de armas nucleares, los residuos radioactivos y la seguridad de las plantas nucleares de potencia son los tres argumentos que principalmente sirven de estandarte a las campañas antinucleares. Ya no se cuestiona, por evidente, que el kWh de origen nuclear tenga unos de los costes equivalentes o más reducidos que el producido por otras energías fósiles. Y la generación nuclear no tiene subvenciones ni primas de ninguna clase

Es evidente que la decisión de producir armas nucleares es estrictamente política. Nadie sensatamente puede creer que una aventura de este tipo pueda ser tomada por un gobierno como el español. No parece muy sensato pensar que la decisión de no construir centrales nucleares en Es-

paña, aunque sean necesarias para el suministro energético, puede evitar la proliferación de armas nucleares en el mundo. China, India están iniciando un ambicioso programa de construcciones nucleares y ya tienen armas nucleares. La decisión española no parece que pueda tener mucha importancia para los posibles programas armamentísticos de otros países.

Siempre se pone como ejemplo de la inseguridad de las centrales el accidente de Chernovyl. Hay que especificar que ese tipo de reactores fue diseñado en el Reino Unido, pero no fue autorizada su construcción precisamente por ser un reactor eminentemente inseguro. Una decisión político administrativa permitió su construcción en la antigua Unión Soviética. Y una decisión también político administrativa obligó a los responsables de las tres unidades, que se encontraban en las proximidades de la que estaba accidentada, a continuar su operación sin importar el riesgo que ello implicaba. Y también una decisión de los gobiernos de los países del área soviética impidió informar a la opinión pública del desastre y tomar las precauciones pertinentes. No parece muy razonable que las decisiones político administrativas primen sobre los criterios de seguridad en ningún caso.

En España existe un órgano competente, el Consejo de Seguridad Nuclear, que vigila de forma permanente la seguridad de las instalaciones nucleares. Se podría decir que pocas instalaciones industriales tienen analizados sus posibles riesgos ni un control tan exhaustivo de su operación y actualización como las centrales nucleares. La sociedad se encuentra puntualmente informada de las vicisitudes de su operación y de su impacto medioambiental.

Es evidente que los residuos radioactivos de alta actividad procedentes de los combustibles irradiados necesitan un control. Existen procesos que puede reducir su radiotoxicidad a límites razonables. Uno de los principios de cualquier política de gestión de residuos es la reducir, reciclar y reutilizar. En varias ponencias se han explicado la viabilidad de la aplicación de estos principios a los residuos radiactivos: separar el material fisible, reutilizarlo en los nuevos combustibles y reducir los residuos de alta actividad a los actínidos menores. Y en el futuro estos elementos se pueden fisionar en los procesos de transmutación en sistemas asistidos por aceleradores o reactores rápidos de IV generación. Y los residuos radioactivos se pueden tratar de forma sostenible.

Estos tres temas: la seguridad de las centrales nucleares, el tratamiento de los residuos radioactivos y el control de los elementos susceptible de ser utilizados para la proliferación se han abordado ampliamente en estas Jornadas para servir de base informativa, técnicamente objetiva, a la sociedad. No hay secretismos en la tecnología nuclear. La opinión pública no se forma mediante pancartas sino transmitiendo a la sociedad un mensaje objetivo, veraz y ponderado.

PRÓLOGO

La tecnología nuclear sirvió en su momento para que el desarrollo industrial de España diese un salto espectacular. La ingeniería y la industria española alcanzaron niveles internacionales en calidad y competitividad. Elementos esenciales para las centrales nucleares de otros países se están fabricando en España. Las ingenierías y empresas de servicios siguen realizando trabajos para Organismos Internacionales y entidades extranjeras. Esas cotas se han mantenido gracias al esfuerzo y dedicación de un grupo de profesionales que de forma callada y constante han persistido en su labor ignorando el soporte prácticamente nulo de los medios oficiales. Ahora llega una nueva etapa. El mundo empieza a ser consciente de la importancia de la energía nuclear en su resurgir económico. ¿Puede quedarse la sociedad española sin esa fuente energética por una visión miope e ideológicamente condicionada de las necesidades energéticas futuras? ¿Se puede seguir oficialmente ignorándole desarrollo de la tecnología nuclear alcanzado en España?

*Directora de la Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas
de la Universidad Pontificia Comillas de Madrid*

RESUMEN EJECUTIVO

España es una isla energética, siendo su nivel de dependencia del exterior del 82%, superior al de la media de la UE, que se sitúa en el 50%. Con esta situación, no se debería renunciar a ninguna fuente energética madura, que contribuya a disminuir esos niveles de dependencia al mismo tiempo que no emita emisiones de CO₂ y sea económica para poder tener un mix estable y competitivo. Sin embargo la energía nuclear que cumple con todos esos requisitos arrastra un halo de peligrosidad y catastrofismo que desde estas páginas los variados autores que contribuyen en este libro intentarán clarificar siempre desde el planteamiento técnico y la rigurosidad.

El capítulo I analiza las distintas fuentes de energía que componen el mix energético, incidiendo en que las renovables no pueden estar solas porque el sistema sería insostenible y desarrolla el porqué no se debe prescindir de ninguna tecnología energética disponible incluida la nuclear.

El capítulo II está dedicado a la industria nuclear española en el mercado de la exportación. Se hace un análisis de la capacitación de la Industria nuclear española, desarrollando cómo se ha dirigido muy satisfactoriamente hacia el mercado internacional y se revisan las posibilidades de futuro en dicha industria.

En el capítulo III se presenta la percepción de una localidad pequeña que se convierte en un emplazamiento energético, y se estudian los cambios producidos en la estructura social y económica. Cuando es necesaria la convivencia entre un emplazamiento energético y la sociedad donde se implanta hay que tener en cuenta 3 principios que se desarrollan en el capítulo: seguridad, información y desarrollo económico de la zona.

El capítulo IV aborda uno de los puntos importantes para poder o no considerar sostenible a la energía nuclear ¿hay bastante materia prima para desarrollar la energía nuclear de forma masiva?. En este capítulo se da información de cómo es el ciclo de combustible nuclear, se desarrolla la tecnología del enriquecimiento de Uranio y se analiza exhaustivamente la evolución de los precios y mercados del Uranio.

El capítulo V trata el talón de Aquiles de la generación eléctrica nuclear, los residuos radiactivos. Aquí se desarrolla cómo se realiza la gestión de los residuos radiactivos tanto de media y baja actividad como de alta. En el desarrollo queda claro que los residuos no son una basura sino una posible fuente de combustible en el futuro. Se trata la necesidad del almacén temporal centralizado, así cómo se detallan las inversiones que se realizan gracias a esta función.

Los capítulos VI y VII se centran en los reactores nucleares avanzados, la cuarta generación nuclear, desde diferentes aspectos. El capítulo VI analiza la tecnología de los nuevos reactores, explicando algunos de los nuevos diseños en que se está investigando y subrayando los aspectos de sostenibilidad que tienen estos nuevos reactores. El capítulo VII explica la seguridad que va asociada a estos nuevos reactores que estarán disponibles para el 2040, haciendo hincapié en el salto cualitativo en materia de seguridad que supondrá una revolución en la generación nuclear.

El capítulo VIII aborda el desarrollo normativo que está realizando la OIEA que al no ser de obligado cumplimiento, servirá como referencia para que los Estados miembros construyan su propia pirámide normativa nuclear, siendo el objetivo perseguido la seguridad.

En el capítulo IX se detalla cómo se realiza el control de la seguridad de las centrales nucleares, por parte del organismo regulador, el CSN. Se abordan las autorizaciones, la supervisión y el control durante la explotación, los indicadores que se tienen en cuenta para evaluar la seguridad de las centrales, el programa de inspecciones llevado a cabo, así como la revisión de las instituciones internacionales.

En el capítulo X se analiza el proyecto internacional ITER, como un camino hacia la Fusión Nuclear como fuente de energía. Se abordan tanto los aspectos previos del proyecto, aspectos sociales, políticos y económicos como el día a día del mismo. Y se explican los aspectos técnicos básicos de la Fusión.

En el último capítulo se retoma de nuevo la problemática de los residuos radioactivos ya abordada desde el punto de vista de la gestión en el capítulo V, aquí se explica el funcionamiento de la Transmutación como una técnica que tendrá que complementar a la gestión de los residuos. Desde la tecnología, se detallan los principios de la transmutación, así como el sistema asistido por acelerador y se analizan los proyectos actuales que trabajan en ella.

BEATRIZ YOLANDA MORATILLA SORIA
Presidenta del Comité de Energía y Recursos Naturales del IIE
Directora de la Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas
Universidad Pontificia Comillas

CAPÍTULO I
¿ES NECESARIO Y VIABLE EL RELANZAMIENTO
DE LA ENERGÍA NUCLEAR?
EL DEBATE SOBRE LA ENERGÍA NUCLEAR

Alberto Carbajo Josa
Director General de Operación de Red Eléctrica de España

INTRODUCCIÓN

Actualmente en España, plantear la exclusión de algún tipo de energía, donde se depende energéticamente un 87%, es un sinsentido. Un ejemplo de lo que está pasando, es la complementariedad y la necesidad de todas las energías. No se puede excluir ninguna. Todas ellas tienen aspectos a favor y aspectos en contra. Lo que hace falta es buscar el equilibrio y ver de qué manera se obtiene el máximo beneficio para el consumidor en general, con el mínimo impacto para el ciudadano: desde el punto de vista económico y desde el punto de vista medioambiental.

Como se ha comentado anteriormente, la situación energética en España es de un 87% de dependencia del exterior, con un problema añadido, que es el de las emisiones. Es decir, se tiene un parque de generación que todavía tiene unos impactos medioambientales importantes. Es verdad que las emisiones de SO₂, de NOX y de partículas están absolutamente solucionadas por la tecnología, pero no ocurre lo mismo con las emisiones de CO₂. Todavía está en fase de estudio la captura y el almacenamiento de CO₂, por lo que mientras, habrá que apostar por las energías que no contaminan. Y éstas son las renovables.

APORTACIONES DE LAS DISTINTAS FUENTES

Apostar por las renovables significa mantener otras potencias firmes, porque las energías renovables, una gran parte de ellas aunque no todas, son no gestionables o no predecibles. Entonces, la seguridad del suministro exige tener siempre una potencia firme, para cuando estas energías renovables no dispongan de la materia prima para su funcionamiento. Es decir, tiene que haber una potencia en backup para cuando no funcionen las renovables.

Además, hace falta tener redes. Las energías renovables, en general, son grandes consumidoras de redes, aunque inicialmente nacieron con la visión de la energía distribuida, la realidad es que se han generado una gran cantidad de infraestructuras para la evacuación de la generación del régimen especial. Se necesitan redes para evacuar la generación no gestionable cuando está funcionando y para evacuar la generación del régimen ordinario cuando la no gestionable, no funciona. En un contexto en el que se tiene una especial sensibilidad medioambiental a las infraestructuras energéticas en general, de rechazo hacia las mismas.

En el sistema eléctrico, en los últimos diez años, ha habido un fuerte crecimiento acumulado de la demanda, del orden del 68%. Posiblemente, los diez últimos años han sido los años de mayor crecimiento económico del país y se ha notado en un mayor crecimiento de la demanda. Cuestión especialmente preocupante en un país tan intensamente dependiente. Pero el consumidor español no ha sido consciente de la gravedad de la situación energética del país. Se consume mucho, y además se consume mal, en el sentido de que se consume mucho en las puntas. La curva de carga se está apuntando y eso tiene consecuencias difíciles a la hora de gestionarla desde el punto de vista del sistema eléctrico.

De todas maneras, el crecimiento de las puntas es el driver de la inversión en el sistema eléctrico, tanto en generación como en redes. El apuntamiento de la curva significa que hay que dimensionar las redes y las instalaciones de generación para una utilización cada vez más escasa. Además se dispone de poca energía primaria y por tanto, tenemos una altísima dependencia energética. Asimismo por la forma en la que se consume, ésta viene acompañada de una necesidad superflua, en muchos casos, de infraestructuras.

Se necesitan, por tanto, políticas de ahorro y eficiencia. Y hay que hacer políticas que reflejen costes, como buena señal económica, para que el consumidor sea consciente de lo que cuesta realmente la energía. Además, estas políticas deben permitir modificar a partir de las señales tarifarias, o señales de precios, la forma de consumo de manera que sea menos costoso para todos, abastecer esa curva.

En España, la potencia instantánea ha crecido en los últimos años. Se está en casi 45.000 MW, hecho que se alcanzó en diciembre del año 2007,

batiendo el anterior récord durante una ola de frío polar en enero del 2005. Ya se está apuntando a 46.500 MW, para el invierno del 2009, a poco frío que haga. Además, este crecimiento se ha producido con ese patrón de consumo que tienen los españoles, que es producto de una mayor disponibilidad económica de las familias y de un mayor abaratamiento de los costes del equipamiento eléctrico. La sociedad ha obtenido una serie de mejoras, de mayor bienestar, producidas por la electricidad. Muy pocas casas se venden que no tengan vitrocerámica, y hay muchas que ya vienen con la preinstalación de aire acondicionado. También, todas las grandes superficies ofrecen cada vez más baratos los aires acondicionados, y por poco más se ofrecen también con bombas de calor. En regiones donde no se usaba calefacción alguna, como en el Levante y en Andalucía, ya disponen de ella. Y eso es lo que ha hecho apuntar aún más todavía esa curva de carga. En vez de ir a una curva de carga más fácil, cada vez se tienen menos horas con una demanda de potencia más elevada.

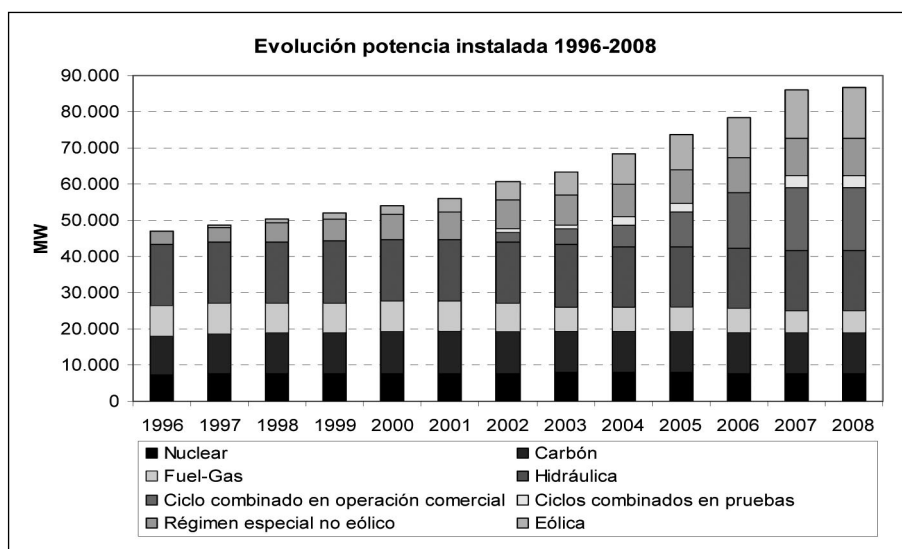
La demanda de energía eléctrica ha subido el 68%, la punta, en cambio el 77%. Y sin embargo, la potencia del régimen ordinario ha sumado un 37%. Eso significa que para poder atender esta punta de demanda, de alguna manera, se incrementó de forma masiva la potencia de régimen renovable, que no es una potencia firme. Lo cual ha hecho necesitar, seguramente, unos mayores índices de cobertura porque al no tener firmeza esta energía renovable, hace que la operación sea más complicada.

En el Gráfico I.1 se muestra exactamente qué ha sucedido hasta el año 2008, cuál es la tipología de la potencia que ha ido entrando en el mix de generación.

La energía nuclear ha permanecido constante, como el carbón, el fuelgas obviamente, y también la hidráulica. Aparece la eólica, primero con unas cantidades ínfimas y después con un crecimiento hasta alcanzar los 15 mil megavatios que se tienen en este momento. El ciclo combinado ha crecido desde el 2002 de una manera exponencial. La potencia instalada prevista se puede ver en el cuadro I-2, donde se indica hacia dónde tiende el mix de generación.

Cuando se habla de garantía de suministro, hay que separar lo que es a largo plazo del corto plazo. En el largo plazo hay que ver qué señales reciben los potenciales inversores para poder asegurar a todos los ciudadanos el suministro. Eso tiene que ver con la garantía de suministro en la parte de generación, y con la seguridad que ofrecen las redes. La generación necesita tener unas señales de inversión, quizás señales de localización y además, en el corto plazo, la disponibilidad de energía primaria. La seguridad en el suministro está relacionada con la planificación en el transporte, y al ser una actividad regulada, se requiere un modelo de retribución regulado que permita una seguridad para abordar las inversiones.

Gráfico I-1.
Evolución potencia instalada 1996-2008



Fuente: Elaboración propia

Gráfico I-2

Potencia instalada (MW) a final de año	2006	2008	2011	2016
Hidráulica convencional + bombeo mixto	13.930	13.930	13.930	13.930
Bombeo puro	2.727	2.727	3.700	5.700
Nuclear	7.716	7.726	7.783	7.783
Carbón	11.424	10.728	9.299	8.240
Fuel/Gas	6.647	1.831	670	320
Ciclos combinados	15.500	20.624	28.224	35.000
Equipos de punta (Turbinas de gas, etc.)	0	300	600	3.000
Eólica	11.233	14.980	22.000	29.000
Solar	106	530	1.700	4.500
Minihidráulica	1.811	2.000	2.240	2.450
Biomasa	554	1.560	2.360	2.770
Residuos	444	560	710	960
Cogeneración	6.785	7.000	7.370	7.990
Total Potencia instalada	78.877	84.496	100.586	121.643
Total Potencia disponible (1)	49.319	51.570	58.919	69.229
Punta de invierno	42.153	47.900	53.300	63.200
Margen	7.166	3.670	5.619	6.029
Índice de cobertura	1,17	1,08	1,11	1,10

(1) Potencia disponible determinada ex - ante a partir de cálculos probabilísticos (año 2006: datos reales)

En el corto plazo, más vinculado a la seguridad del sistema, están los criterios de operación que están redactados en resoluciones del ministerio, los cuales marcan las pautas de actuación del operador del sistema. Estos están redactados bajo el espíritu de garantizar y preservar esa seguridad del suministro. Pero hace falta que haya una disponibilidad de instalaciones y una adecuada coordinación de la generación y transporte. Esa disponibilidad de instalaciones tiene que ver con las señales que perciben tanto de las propias instalaciones, como de la materia prima necesaria para la utilización de las mismas. Todo ello conduce a esa continuidad del suministro.

SEGURIDAD DEL SUMINISTRO

La seguridad del suministro es un factor fundamental en la prestación del servicio eléctrico. Así que se necesita mantener un margen de cobertura adecuado en el largo plazo para garantizarla. Por lo que se requiere, seguramente para que se tomen estas decisiones, que existan determinadas señales del marco regulatorio que reduzcan los riesgos de la inversión a los potenciales inversores. Es lo que anteriormente se llamaba garantía de suministro y hoy tiene, bien es verdad, una cuantía bastante inferior, con dos componentes. Una componente es la garantía de la recuperación de la inversión de los ciclos combinados y otra, los pagos por disponibilidad de las centrales que tengan una energía, que pueda ser gestionable o no. Es preciso que las centrales marginales, para evitar el riesgo de su expulsión del sistema, que reciban una compensación que les permitan estar disponibles.

Se tiene también el problema de la energía primaria. Y al ver detalladamente las distintas tecnologías, en algunas se presentan ciertos problemas. Esa capacidad de disponer de energía primaria fundamentalmente tiene que ver con la gestión que se haga del agua en la hidráulica, en la eólica y en la disponibilidad de materia prima en los ciclos combinados.

La hidráulica es muy dependiente de la climatología, contribuye muchísimo al margen de cobertura de la potencia, porque tiene una rápida respuesta. Es seguramente la energía más flexible y por lo tanto de alta calidad. Contribuye, en una buena parte, en los servicios de operación del sistema, en las reservas, sobre todo en la secundaria y la terciaria. Es una energía de gran calidad y el mercado actual no da las señales suficientes como para que las empresas internalicen los criterios de seguridad del sistema en la gestión de las reservas hidráulicas. Además, algunas veces no hay las reservas con las que se contaban. Sus características principales, se resumen en:

- Estacionalidad anual y gran dispersión respecto a los valores medios mensuales (invierno y primavera).
- Elevada variabilidad interanual.
- Necesaria para la cobertura de demanda. Para cubrir reserva secundaria de “buena calidad” y terciaria rápida.
- Disponibilidad limitada por hidráulicidad y precisa mantener reservas mínimas.
- Podría utilizarse para compensar la variabilidad de la eólica sin gasto adicional de agua.
- Su contribución a la garantía ha de establecerse en función de la potencia térmica evitada en años secos.
- Baja potencia en centrales reversibles (generación/bombeo): <15%. Capacidad limitada → Bombeo diario para mantenimiento de reservas.
- Emplazamientos estratégicos → Necesarias por seguridad.

La eólica es una energía absolutamente necesaria por tres razones fundamentales: tiene nulo impacto medioambiental desde el punto de vista de emisiones. No tiene costes variables o los tiene muy pequeños, y es un gran motor del desarrollo económico y vertebrador del territorio, con lo cual tiene muchas ventajas. Pero tiene también sus dificultades. Es difícil integrar en la operación del sistema y necesita centros de control. Hay un problema, que no lo tiene la eólica en sí, pero sí que la tiene determinada tecnología eólica y es que soporta muy mal los huecos de tensión. En la energía eléctrica, donde el éxito está en el equilibrio dinámico, si de pronto desaparecen por un hueco de tensión unos mil megavatios, es verdaderamente preocupante. Hay todo un programa regulatorio para tratar de reducir ese problema de los huecos de tensión. Además, la eólica no siempre coincide con los momentos de la punta, y a lo mejor, en los valles se tiene la máxima de eólica y en la punta el mínimo, justo lo contrario de lo que se necesita. Pero es así, con unas rampas muy grandes. Por lo que a la hora de realizar las programaciones hay que situarse en las peores condiciones. También, tiene una cierta estacionalidad. Funciona mejor en invierno que en verano, más de noche que de día. Se utiliza el 24% de la potencia instalada y sus características se resumen en:

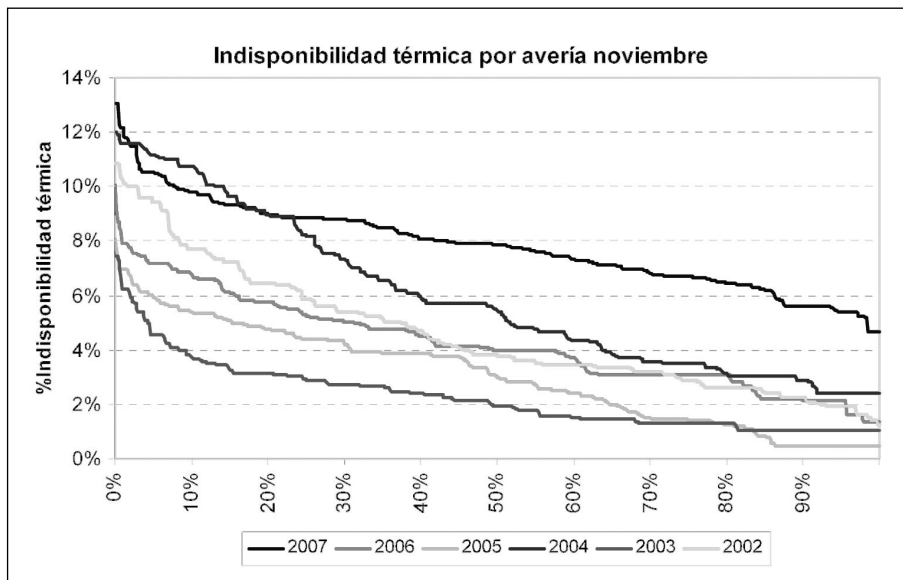
- Es una energía autóctona (disminuye el grado de dependencia), de coste variable cero y no produce emisiones de CO₂
- Comportamiento muy variable → difícil previsión y gradientes elevados (MW/h)
 - Incremento niveles de reserva de generación ordinaria.
 - Incremento gestión servicios complementarios:
 - Secundaria
 - Terciaria

- Control de tensión
- Gestión desvíos
- Desconexión ante perturbaciones:
 - Desmallado para evitar propagación de huecos de tensión → Disminución de seguridad
 - Actualmente hay instalados en torno a 15.000 MW de generación eólica de los cuales el 50% se desconectan ante huecos de tensión superiores al 10% y el 55% ante huecos de tensión superiores al 15%.
- Margen de funcionamiento limitado → desconexión ante rachas fuertes de viento.
- Ante condiciones climatológicas con temperaturas extremas → baja probabilidad de existencia de viento.
- Por todo ello, debe ser considerada como energía pero no potencia firme. Es escasa su contribución a la garantía de suministro de medio y largo plazo.

Los ciclos combinados tienen mucho peso en la cobertura, y es una tecnología nueva. Tiene el problema de la dependencia exterior del gas y algunos problemas menores como que en verano funciona peor, que funciona mejor en la costa que en el interior con más altura. El equilibrio, en el sistema gasista, tiene que ser pseudodinámico y no del orden de milisegundos como en el sistema eléctrico. Es absolutamente necesaria esa coordinación, ya que el 30% de la energía se hace ya con gas, por lo que tiene que haber una extremada cooperación entre el operador del sistema gasista con el sistema eléctrico para hacer las programaciones adecuadas. Si hay mucha eólica, habrá menos gas, por lo que tiene que haber la suficiente flexibilidad en el sistema gasista, contratos flexibles y con sistemas de almacenamiento lo suficientemente importantes. En la térmica clásica, lo fundamental es la obsolescencia que se nota fundamentalmente en las indisponibilidades, sobre todo, en las programadas. En la Figura I-3 se muestra cómo ha evolucionado la indisponibilidad. Dada su obsolescencia tienen una indisponibilidad fortuita más alta.

Por último, está la nuclear que es bastante fiable, tiene un coste variable muy reducido y tiene una gran rigidez de carga. Probablemente no valdrán, estas nucleares de hoy, para los servicios de operación, ya que son bastante rígidas. Las CC.NN han tenido en España una excelente disponibilidad durante los últimos años, superior en la mayoría de ellos al 90%. Sin embargo, incidentes aislados han causado en algunos casos indisponibilidades de larga duración. La apertura o cierre de las centrales nucleares no

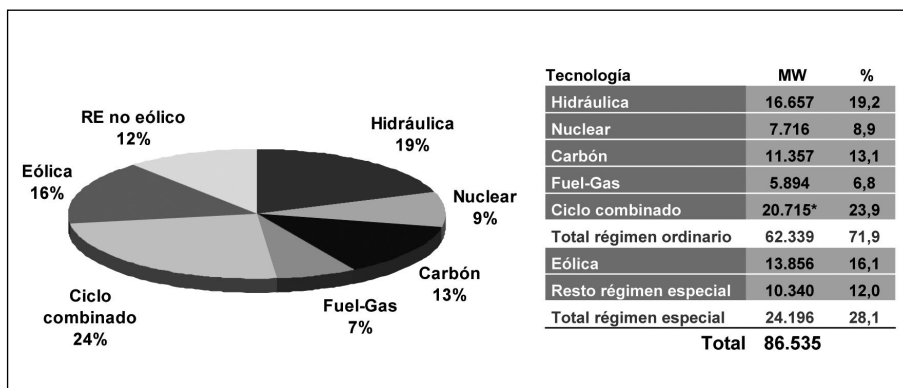
Figura I-3



Fuente:Elaboración propia

vendrá dado por las señales del mercado. Hay suficiente seguridad en el suministro de combustible. La potencia instalada neta en el sistema eléctrico español en enero de 2008 se ve en la Figura I-4:

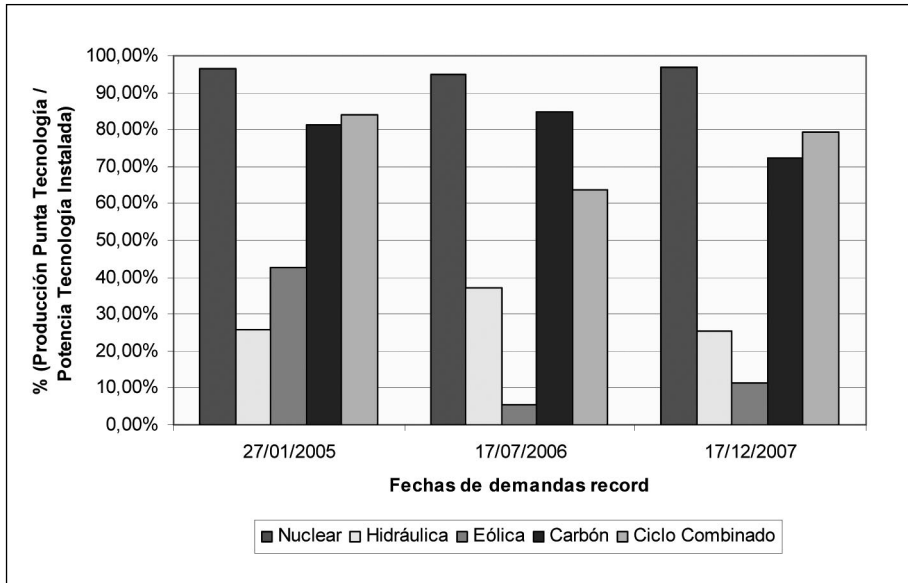
Figura I-4



Fuente: Elaboración propia

Y la contribución de las diferentes tecnologías de generación en puntas de demanda:

Figura I-5



Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

Por último, se puede concluir que:

- El riesgo regulatorio, por carencia o por impredecibilidad, actúa como barrera de entrada, siendo un factor que disminuye la apertura a la competencia
- La excesiva dependencia energética del gas podría aconsejar tomar en consideración otro vector energético de potencia firme complementario de la necesaria apuesta de las energías renovables
- Será preciso investigar hasta conseguir eficiencia económica en la captura de emisiones de dióxidos de carbono en plantas de generación de energía eléctrica alimentadas con combustibles fósiles sobre todo carbón
- Hasta el 2020 las energías renovables, cogeneración, las centrales CCTG e incluso de carbón cubrirán los aumentos de la demanda eléctrica.

- Al menos en el resto del mundo, mas allá del 2020 la operación a largo plazo las CCNN existentes, junto a las nuevas generaciones de CCNN y las centrales de combustibles fósiles con captura de CO₂ competirán en el suministro eléctrico.

Así que todas las energías son necesarias. Este país no puede renunciar a una fuente energética. Todas son necesarias y es muy importante apostar por las energías renovables. Pero las energías renovables para estar de manera segura en la red deben venir acompañadas de potencia firme.

CAPÍTULO II

LA INDUSTRIA NUCLEAR ESPAÑOLA EN EL MERCADO DE LA EXPORTACIÓN

María Teresa Domínguez
Presidenta de Foro de la Industria Nuclear Española

INTRODUCCIÓN

La demanda creciente de energía, la necesidad de garantizar el suministro eléctrico, disminuir la dependencia energética y afrontar los retos medioambientales hacen que cada vez más países en todo el mundo apuesten por el impulso de la energía nuclear. La consolidación de estos programas será sólo posible con una industria preparada para afrontar los retos de la construcción de las nuevas centrales.

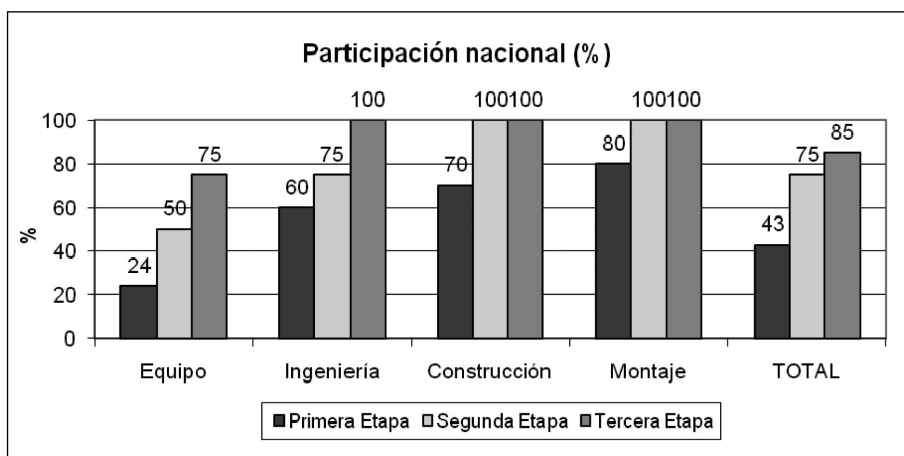
CAPACITACIÓN DE LA INDUSTRIA NUCLEAR ESPAÑOLA

La industria nuclear comenzó su andadura en España en los años sesenta a raíz de la decisión de emprender un programa de centrales nucleares en el país, alcanzando en los años en que se construyeron las últimas centrales una gran dimensión en términos de infraestructura, creación de empleo, formación de personal especializado, métodos de trabajo, etc. En el momento de máxima actividad, en los años ochenta, trabajaban en los emplazamientos de las centrales nucleares unas 20.000 personas. A esta cifra hay que añadir los empleos en las ingenierías, empresas de fabricación de combustible, de grandes componentes y bienes de equipo; hasta un número estimado en cinco veces la cantidad de personas involucradas direc-

tamente en la construcción de las centrales. Toda esta actividad implicó un importante esfuerzo de asimilación de tecnología y desarrollo organizativo, que se consolidó en los siguientes elementos:

- Una Administración responsable de las autorizaciones, un Consejo de Seguridad Nuclear competente y capacitado técnicamente, vigilante de cumplir con la legislación nuclear española y los convenios internacionales responsable de emitir los informes vinculantes para las autorizaciones por la Administración.
- Empresas eléctricas responsables de la construcción y operación de las centrales facilitando las interrelaciones de los proveedores, que coordinan sus actividades en UNESA.
- Delegaciones en España de los proveedores de sistemas nucleares.
- Empresas de ingeniería, colaboradores esenciales de los propietarios y encargadas del diseño global de la central y de sus componentes, de especificarlos y, en su caso, gestionar la compra y supervisión de fabricación y servicios.
- Proveedores de equipo, operando inicialmente sobre la base de la industria existente y, después, mediante adición de nuevas capacidades.
- Empresas de construcción y montaje, que estaban ya establecidas y que se adaptaron sin dificultad a los nuevos requisitos de calidad exigidos para las actividades nucleares.
- Empresas de servicios especializados, encargadas de la inspección en servicio, entrenamiento y la ejecución de ensayos especiales no destructivos durante las fabricaciones.
- Sociedades de inspección de Tercera Parte que certifican el cumplimiento de las normas industriales.
- Fabricante de grandes componentes (ENSA), con capacidad para vasos, generadores de vapor, contenedores, cambiadores, etc., disponiendo de las tecnologías más avanzadas y controles de calidad.
- Organizaciones de fabricación de combustible y gestión de residuos (ENUSA y ENRESA) que permiten gestionar el ciclo completo de combustible desde la minería hasta su almacenamiento.

Este entramado industrial facilitó que en la construcción de las centrales nucleares se llegase a cifras significativas de participación nacional, desde porcentajes del 40%-45% en la construcción de las primeras centrales, contratadas llave en mano, hasta las últimas en las que la responsabilidad de la ejecución del proyecto fue asumida por los propietarios, con la ayuda de empresas de ingeniería, llegando a un 86% de participación nacional. Este hecho ha llevado a España a ser seleccionada por el OIEA como ejemplo de país que tuvo un programa nuclear ejemplar de promoción industrial ante los países que inician sus programas nucleares.



Fuente: Foro Nuclear

Pasada la fase de construcción de centrales en España, la industria nuclear ha continuado el apoyo a la operación de las centrales nucleares españolas con actividades de ingeniería, servicios especializados y suministros de combustibles y equipos. La modernización continuada de nuestras instalaciones, con inversiones próximas a los 300 M€ anuales en el parque nuclear español, ha permitido que las centrales españolas hayan operado con indicadores de funcionamiento en sus niveles más altos, a la vez que han permitido que la industria disponga de las capacidades y herramientas más avanzadas del mercado. Actualmente, la industria nuclear emplea en nuestro país, de forma directa e indirecta, a unas 30.000 personas, una cifra que alcanza las 400.000 en toda la Unión Europea.

EVOLUCIÓN DE LA INDUSTRIA NUCLEAR ESPAÑOLA HACIA LA EXPORTACIÓN

En los inicios del desarrollo industrial nuclear en España las actividades internacionales se consideraban marginales, ya que existía un gran programa a largo plazo en nuestro país. No obstante, la actividad nacional de la industria nuclear española estaba preparándose para poder abordar el mercado internacional, ya que toda la estructura técnica de normas, especificaciones, cualificaciones, ejecución, inspecciones y documentación, utilizada en la construcción de nuestras centrales nucleares, se tomó del país de origen del diseño del reactor, que permitió familiarizarse con métodos de diseño y fabricación internacionales.

El conocimiento de códigos y normas de Estados Unidos, Europa y de organismos internacionales constituye un activo importante a la hora

de concurrir a los mercados exteriores. En España disponemos de titulares de los sellos "N" del ASME y cualificación para trabajar con otros códigos nucleares asociados.

Otro aspecto importante para la participación exterior es que las empresas españolas no están vinculadas con ningún proveedor de sistemas nucleares. Es decir, se puede trabajar y de hecho se trabaja para todos. El abanico de países y tecnologías se abre a la par que se incrementa la experiencia.

Cabe también resaltar como elemento que ha ayudado a la presencia en el exterior el ámbito multidisciplinario de las capacidades industriales de España que cubre prácticamente todas las especialidades en aspectos de planificación, ingeniería, construcción, aprovisionamientos, procesos de licenciamiento, puesta en marcha, apoyo a la explotación, modificaciones, suministro de componentes, sistemas de gestión de residuos, descontaminación, desmantelamiento y un largo etcétera. Este hecho confiere a las empresas españolas una gran ventaja para la exportación de bienes y servicios nucleares, especialmente para países que están iniciando su despliegue nuclear.

Entre estas consideraciones genéricas, hay un hecho singular que fue realmente dinamizador de nuestra apertura internacional. Nos referimos al Programa de Reactores Avanzados de los años 80, que permitió a la industria española participar en los reactores en desarrollo en Estados Unidos en aquella década. Este proyecto, coordinado por UNESA a través de la DTN y apoyado por el Ministerio de Industria en su ejecución, fue el inicio de una estrecha colaboración con Westinghouse y General Electric, que permitió conocer en su génesis los diseños de reactores ahora ya en proceso de certificación del diseño y/o construcción, y que se ha mantenido hasta el presente.

COORDINACIÓN DE LA INDUSTRIA, APOYOS A LA EXPORTACIÓN NUCLEAR Y PERSPECTIVAS

En esta proyección internacional, la industria ha contado con apoyo institucional. El Instituto de Comercio Exterior (ICEX) ha patrocinado la participación de las empresas en pabellones agrupados en exposiciones, congresos y actividades de promoción. En estas actividades Foro de la Industria Nuclear Española ha coordinado la presencia en dichos eventos.

Otra línea de apoyo ha sido desde la Compañía Española de Seguros de Crédito a la Exportación (CESCE), que ha financiado en los últimos años diversas exportaciones nucleares a países emergentes. Estos créditos son gestionados por las empresas exportadoras, incluso en la fase de oferta, contribuyendo al atractivo de la misma.



Fuente: Foro Nuclear

También ha sido importante el apoyo para los países del este europeo, que necesitaban recursos financieros para la modernización de sus instalaciones, ya que para ello se han dispuesto diversas fuentes de financiación, en este caso desde Europa, como los programas TACIS y PHARE y los créditos del Banco Europeo de Reconstrucción y Desarrollo, además de subvenciones de Euratom y diversos acuerdos bilaterales.

En las condiciones descritas en las que se encuentra la industria nuclear española, se debería mantener e incluso incrementar su participación en los programas nucleares en lanzamiento en el mundo, así como un posible relanzamiento en España. Sin embargo, para que esto sea posible, habría que tener en consideración algunos aspectos, como son:

- La conveniencia de mantener la competitividad, con costes controlados de producción y contar con apoyos institucionales a la exportación que nos den opciones claras en mercados internacionales.
- La conveniencia de que España participe en los proyectos internacionales lanzados para el desarrollo tecnológico y la proyección de la energía nuclear en el mundo, como son los de GEN IV y GNEP, promovidos desde Estados Unidos, así como en las iniciativas de la Unión Europea como la European Industrial Initiatives (EII), y otros similares, manteniendo la participación en INPRO del OIEA. Es en estos programas donde se definen las estrategias y se conocen las tecnologías en desarrollo. Iniciativas como la de Reactores Avanzados mencionada son de gran interés.

- También sería conveniente dar signos positivos desde el Gobierno a favor de la energía nuclear. No es fácil entrar en países comprometidos con la energía nuclear desde un país donde el desarrollo de esta energía no se contempla como estrategia energética.

Si los aspectos mencionados no se tienen en consideración, podríamos tener dificultades a largo plazo y perder la oportunidad de aprovechar las capacidades y adquisiciones que hemos sabido mantener hasta el momento.

CONCLUSIONES

No cabe duda de que estamos asistiendo al reconocimiento nuclear en todo el mundo, con la llegada cada vez mayor de países que quieren acceder a esta tecnología. Las empresas españolas formadas en el programa español contribuyen al mercado de exportación y se preparan para una mayor participación en este renacimiento nuclear. Sin embargo, las condiciones del mercado están cambiando y la permanencia en el exterior requerirá un esfuerzo para mantener la competitividad, las capacidades a través de la participación en programas internacionales y el apoyo institucional. Foro Nuclear, al igual que ha hecho en el pasado, está abierto a toda clase de iniciativas que puedan redundar en el mayor éxito de las empresas españolas en este mercado selecto y exigente.

CAPÍTULO III LA EXPERIENCIA DE VANDELLÓS

Josep Castellnou
Alcalde Vandellós

INTRODUCCIÓN

Vandellós está muy vinculado a la producción de energía eléctrica, disponiendo de las Centrales Nucleares Vandellós I y Vandellós II, y una central de ciclo combinado de Gas Natural. Dicha experiencia local enseña que la convivencia no es fácil, aunque sí posible, pues afecta a los terrenos, a las actividades, a la economía e incluso a los sentimientos.

La experiencia en Vandellós demuestra que cuando una localidad pequeña se convierte en un emplazamiento energético, se producen una serie de cambios en la estructura social y económica que derivan en un esfuerzo para llegar a la convivencia. Este esfuerzo es pocas veces valorado desde las Administraciones, las propias empresas productoras y la sociedad en general.

Dado que la necesidad de energía de la sociedad actual exige la viabilidad de estas instalaciones, se debe ser capaz de dar soluciones, no sólo como respuesta a una necesidad, sino para solucionar el problema de los emplazamientos de las centrales nucleares de hace 40 años y con disparidad de criterios, según la época y los emplazamientos.

Los municipios nucleares pretenden que las relaciones sean correctas. Para ello hace 20 años que se agruparon para crear AMAC, asociación que se fundamenta en tres premisas básicas de funcionamiento:

- La seguridad
- La información
- El desarrollo local

También a nivel europeo, los municipios nucleares se han unido creando en los años 90 la GMF, trabando y buscando soluciones al tema de los residuos, información, participación y el desarrollo económico. Dado que los problemas son los mismos, se han compartido experiencias analizando los dos modelos europeos:

1. Situación normalizada, como el ejemplo de Francia, donde ha existido y existe estabilidad normativa, o como en el caso de Finlandia y Suecia donde mediante consenso se puede alcanzar un modelo energético concreto.
2. Situación improvisada, en el cual estaría incluida España, donde existe una gran indeterminación en cuanto al plan energético, al plan de residuos, al plan de seguridad y se actúa en función de las necesidades inmediatas.

El análisis de las tres premisas básicas de funcionamiento: la seguridad, la información y el desarrollo local, no implica sólo un análisis de la situación, sino prolongar estas premisas existentes para adaptarlas en el tiempo y mejorarla. Para que el futuro de estas instalaciones sea factible, hay que trabajar para crear un buen marco de relación, ya que son actividades superiores a 40 años.

INFORMACIÓN

La información es un derecho.

La información es esencial para ofrecer una máxima transparencia. Por eso se han creado los comités y las comisiones locales de información (CLI), para integrar a los diferentes agentes sociales. Se apuesta por la información como medio para lograr la participación de la sociedad en la toma de decisiones, creando el marco que genere confianza en el futuro. Se debe comunicar y esto implica escuchar y hablar.

Es necesario marcar un canal de comunicación desde el inicio, entre los intereses de la empresa y los vecinos de la zona, buscando las fórmulas de máxima participación y transparencia. Para ello en los CLIs se integran los representantes políticos del municipio cabecera y los de su entorno, representantes de las diferentes Administraciones implicadas por razón de la materia (Industria, Medio Ambiente, etc) y los diferentes agentes sociales y económicos de la zona.

Las CLIs deben utilizar todos los canales de información posibles para poder dar la información con la máxima transparencia y dar a conocer los acuerdos que se tomen en la Comisión Local y así poder recoger todas las dudas y sugerencias de la población, dando así explicaciones y respuestas.

Esta elaboración no debe realizarse en un tiempo limitado. Por el contrario, en este proceso se debe invertir todo el tiempo necesario para que el resultado sea el óptimo, no tan solo para dar la máxima información en el proceso de la implantación de la central, sino para un mejor seguimiento del funcionamiento posterior. Por tanto, la información debe ser continuada y constante, para llegar a establecer una cultura de conocimiento en el entorno de la instalación.

SEGURIDAD

Debe ser una garantía irrevocable que tienen que percibir los vecinos.

La seguridad es innegociable y todos deben trabajar para conseguir su máximo nivel: las empresas productoras, el Consejo de Seguridad Nuclear y las Administraciones en general, realizando y divulgando los planes de emergencia.

La Central Nuclear debe garantizar la seguridad, pero además los vecinos deben percibirla y participar de ella.

El Consejo de Seguridad Nuclear es necesario y debe ser un órgano que objetivamente, independientemente y con gran prestigio, mediante el ejercicio de sus funciones, garantice el cumplimiento de las normas y de control externo sobre la instalación.

Esta premisa es posible con una información detallada de cómo es la instalación y con la percepción de disponer de un plan de emergencia que garantice cualquier eventualidad. Para ello, se requiere una difusión del mismo y que los vecinos sean conocedores del plan y una actualización continuada del mismo, mediante la ejecución de simulacros, para poder comprobar que los elementos son operativos y que permitirán actuar con efectividad en caso de emergencia.

DESARROLLO ECONÓMICO

Debe nacer de una compensación para crear oportunidad y convertirse en una vocación de fortaleza.

El desarrollo local debe ser entendido en sus dos vertientes. La compensación económica para mejorar la calidad de vida de los vecinos y la diversificación económica facilitando la creación de nuevas actividades,

con objeto de que la Central no sea un elemento aislado, sino uno más dentro de un territorio en desarrollo.

Estas instalaciones se ubican en zonas poco pobladas, y suponen un cambio en la actividad económica, una fractura del tejido económico, un cambio en el tejido social, tanto durante la fase de construcción, como en la fase de explotación.

Hay que entender que una instalación de este tipo requiere una adaptación a una nueva realidad, de carácter constante.

La fiscalidad de estas instalaciones debe ser clara, tanto para las empresas como para los municipios, para eliminar los conflictos, de los recursos del IBI y del IAE y las normas de repartos.

En Francia cuando se construye una nueva instalación nuclear en una zona, se está obligado a crear, independientemente de la instalación, el 50% de los puestos de trabajo de la instalación en relación a la zona. Y para ello es necesario captar industrias o nuevas actividades. Es necesario favorecer y ocupar empresas locales en las distintas fases de la vida de las instalaciones (construcción, explotación, desmantelamiento). En este sentido la actuación de ENRESA en el desmantelamiento de la Central Nuclear de Vandellós I resulta ejemplar.

Es necesario estudiar unas compensaciones económicas directas, como la reducción de las tarifas eléctricas, ya sean domésticas o industriales, que favorezcan la implantación de las industrias, fijando con estas actuaciones una dependencia de las actividades de la zona.

Se deben establecer convenios a largo plazo con las administraciones para mejorar la calidad de vida de los vecinos, potenciando la creación de nuevos equipamientos públicos y ampliando los servicios, y fijando en la zona la residencia de los empleados de estas instalaciones (CAP, IES, Guarderías, etc).

También es conveniente establecer estrategias con el Ayuntamiento anfitrión y los colindantes, para vincular con proyectos comunes tanto en el sector social como en el económico, que permitan que los ayuntamientos de la zona nuclear estén compensados, evitando así las tensiones entre vecinos. En definitiva, se trata de establecer planes estratégicos que contemplen la creación de mancomunidades que vinculen a todos los Ayuntamientos de la zona, desde el punto de vista social, económico y laboral, elaborando proyectos conjuntos que eviten tensiones.

Se debe transmitir seguridad, participando e informando a los vecinos, y logrando desarrollar los medios necesarios para transmitir la información con la máxima rapidez y transparencia posible. Hay que partir desde el inicio con una máxima sinceridad y generosidad, con el único fin de tener unas relaciones, no ejemplares, sino correctas y que perduren a lo largo del tiempo. Solo así se estará trazando un camino que conducirá a la convivencia.

Por tanto, no basta con tener una hoja de ruta bien detallada, sino que hay que saber recorrerla y saber explicar en qué punto se está y cómo se debe continuar el viaje.

Ya se ha empezado un viaje y se han detectado problemas. En este punto se propone que si se decide prolongar la vida de estas instalaciones, no se olviden en ningún momento las premisas de información, seguridad y desarrollo económico. La experiencia en otros lugares indica que con estos medios se favorece la consecución de estos objetivos.

Si todos trabajan juntos se podrá encontrar el camino del éxito.

CAPÍTULO IV EL CICLO DEL COMBUSTIBLE Y LAS RESERVAS DE URANIO

Germán García Calderón
Director Financiero
ENUSA

INTRODUCCIÓN

Las actividades industriales y de ingeniería de ENUSA dan servicio a las 8 centrales nucleares españolas –con una capacidad instalada en el 2007 de 7.728 MWe– indicadas en la Figura IV-1:

Figura IV-1



Fuente: ENUSA

ENUSA fue creada en el año 1972 y pertenece al grupo empresarial público SEPI en un 60% y en un 40% al CIEMAT. Las actividades que se desarrollan en ENUSA son, en primer lugar, el aprovisionamiento de uranio natural necesario para conseguir el uranio enriquecido. En ENUSA se diseñan y se fabrican los elementos combustibles con el uranio enriquecido.

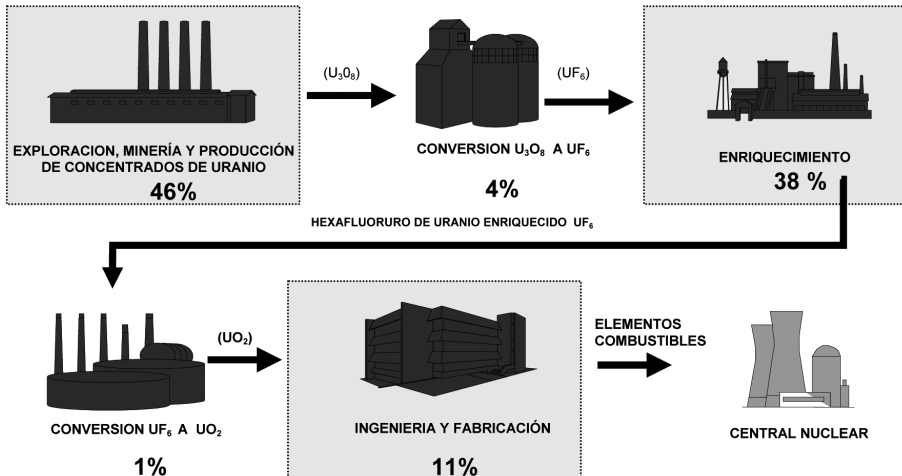
También se diseñan las recargas, es decir, el proceso de colocar en el reactor los elementos combustibles que requiere una ingeniería especializada. Además, se trabaja en el manejo de combustible, que por sus características tiene sus peculiaridades.

Igualmente se realizan una serie de actividades medioambientales que han sido desarrolladas, gracias a la experiencia en el mantenimiento de instalaciones mineras. Y por último, dentro de ENUSA hay una empresa dedicada a la producción de radioisótopos para la medicina y otra empresa de transportes.

EL CICLO DE COMBUSTIBLE

En el ciclo de combustible hay una serie de etapas previas hasta que el combustible llega al reactor. En la Figura IV-2 se muestran estas actividades y su importancia económica porcentual: exploración, minería y producción de concentrados de uranio, conversión del concentrado en hexafluoruro, enriquecimiento, conversión del uranio enriquecido en óxido de uranio, ingeniería y fabricación de los elementos combustibles.

Figura IV-2



Fuente: ENUSA

Existen como pasos intermedios unos procesos que tienen un peso económico mucho menor, aunque no por ello menos importantes ya que es una cadena de valor. La exploración, minería y producción de concentrados de uranio representa un 46% del coste total del combustible. El enriquecimiento supone un 38%, mientras que la ingeniería y fabricación un 11%, porcentaje reducido frente a la importancia que tiene la fabricación para la seguridad del suministro y el buen funcionamiento de las centrales nucleares. El elemento combustible necesita básicamente tres actividades: la primera es la obtención del uranio, que es el materia prima que produce la energía, la segunda es realizar un diseño adecuado tanto del elemento de combustible como de la manera en que se introduce en el reactor y la tercera, la fabricación propiamente dicha del elemento combustible con las especificaciones del diseño y los criterios de garantía de calidad.

Las centrales eléctricas españolas necesitan 152 toneladas de uranio enriquecido anualmente, lo que supone un coste de 278 millones de euros al año, por reactor. El coste de las recargas viene a ser de 54 millones de euros ya que casi todos reactores están en períodos de ciclos de 18 meses.

ENRIQUECIMIENTO DEL COMBUSTIBLE

ENUSA tiene la delegación de las empresas eléctricas para gestionar el suministro de uranio enriquecido y los diferentes servicios que comporta este suministro. El uranio enriquecido no se compra integrado sino que hay que desglosar el material y los servicios necesarios para disponer de un producto que pueda ser utilizado en la fabricación de los elementos combustibles. Estos servicios son: la obtención de los concentrados de uranio a partir del mineral, la conversión del óxido de uranio en hexafluoruro de uranio, los servicios de enriquecimiento, además de otros relacionados con el aprovisionamiento como son el transporte, los seguros?... El aprovisionamiento de uranio en España es una actividad que realiza ENUSA contratando, primero, el suministro de concentrados en las minas. Después contrata el servicio de conversión en hexafluoruro en diferentes empresas conversoras que hay en el mundo, que son realmente pocas, y finalmente el enriquecimiento del uranio a las pocas plantas que ofrecen este servicio en el mercado.

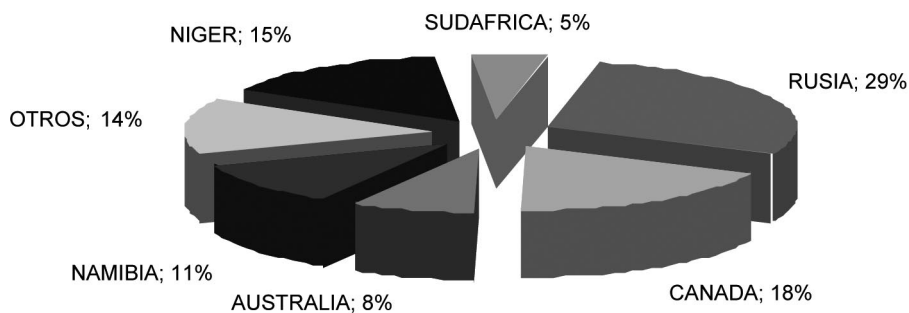
ENUSA hace una actividad de gestión de compras de las empresas eléctricas españolas. El mercado, en general, está muy concentrado, se puede decir que el mercado es un auténtico oligopolio y que en general es eficiente.

Dentro de las actividades del ciclo de combustible, ENUSA participa financieramente en una empresa minera, situada en la República del Níger.

Es una mina importante ya que tiene una producción del orden del 5% de la producción mundial. ENUSA participa con un 10% en el capital y a su vez tiene derecho a adquirir el 10% de su producción. Las otras empresas participantes son la francesa AREVA, la japonesa OURD y el Gobierno de Níger.

Otra participación importante, que en su día fue estratégica y que hoy es más financiera por la diversidad de servicios de abastecimiento, es EURODIF. Esta entidad es un consorcio europeo formado por las empresas AREVA de Francia –que tiene la mayoría–, SYNATOM de Bélgica, ENEA de Italia y ENUSA, que participa con un 11,11% del capital. De manera indirecta está en EURODIF, con un 10%, el Gobierno de Irán, originalmente accionista desde la época del Sha. El suministro de uranio enriquecido para las centrales europeas y españolas se procura que sea lo más diversificado posible. La fábrica de enriquecimiento está situada en Tricastín, en Francia, y proporciona el 25% de las necesidades mundiales de enriquecimiento de uranio.

En el siguiente gráfico se representan los principales suministradores de concentrados de uranio de ENUSA:



Fuente: ENUSA

Los concentrados de uranio en Níger se obtienen en la mina de Cominak. Un 29% se compra a la empresa TENEX de Rusia. BHP Billiton de Australia es la empresa más importante minera a nivel mundial, de todo tipo de minerales, en la que una parte pequeña del 2-3% corresponde al uranio. CAMECO de Canadá es la empresa que más centra sus actividades en el uranio, la más específica, con las mejores minas del mundo. La riqueza es tremenda. La mina que existía en España tenía una riqueza de 0.1 % mientras que las de Canadá alcanzan valores del 0,20-0,30 %, evidentemente estos valores corresponde a minas subterráneas que requieren, como contrapartida, unas inversiones mayores para su extracción. Otra empresa inglesa importante es RÍO TINTO, que tiene minas en Namibia y en

Australia. El mercado está bastante diversificado teniendo en cuenta los pocos suministradores de uranio que existen en el mundo.

El enriquecimiento de uranio solamente se realiza en cuatro empresas en el mundo. ENUSA es cliente de las cuatro, siendo el único comprador cliente de todas ellas. Los americanos no pueden comprar a los rusos y en Europa nadie compra a la empresa americana USEC. Esto hace que la diversificación sea uno de los puntos fuertes de ENUSA. Los suministradores de servicios para ENUSA se resumen en la siguiente Tabla:

Concentrados de uranio	
• Cominak (Níger)	• NUKEM (Alemania)
• TENEX (Rusia)	• NUF COR (Sudáfrica)
• BHP Billiton (Australia)	• RÍO TINTO (Namibia)
• CAMECO (Canadá)	
Servicios de Conversión	
• COMURHEX (FRANCIA)	• NUKEM (Alemania)
• TENEX (Rusia)	• CAMECO (Canadá)
• SFL (GB)	
Servicios de Enriquecimiento	
• EURODIF (Francia)	• USEC (EE.UU.)
• TENEX (Rusia)	• URENCO (Alemania-Holanda-GB)

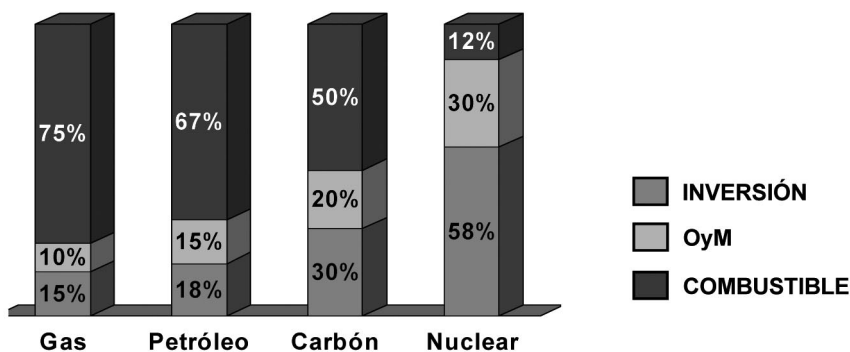
Fuente: ENUSA

EL PRECIO DEL COMBUSTIBLE

Un área de negocio importante de ENUSA es la fabricación de combustible. Se dispone de una fábrica en la provincia de Salamanca. Se puso en marcha en el año 1985 y produce pastillas de óxido de uranio (UO_2+Gd), barras combustibles, elementos combustibles y pequeños componentes (tapones). Tiene una capacidad nominal de 400 MTU/año y los tipos de elementos que produce son muy variados. Hace productos a medida, lo contrario que en Francia que hacen combustibles contra stock. En esta fábrica se hace recarga por recarga, específicamente para los reactores a los que se destina el combustible.

La cartera de clientes es diversificada dentro de Europa, porque son mercados regionales y conjuntamente, con los socios General Electric y Westinghouse, se suministra combustible a distintas compañías. Aparte de España se suministra combustible a EdF en Francia, Electrabel en Bélgica, Vattenfal en Suecia, TVO en Finlandia y RWE en Alemania.

En el siguiente gráfico se ve lo que representa la inversión, la operación y mantenimiento y el costo del combustible, en el coste de la unidad de potencia producida por las distintas energías. El porcentaje del combustible tiene una importancia mayor en la generación por gas, luego por petróleo, carbón y finalmente por la nuclear.



Fuente: ENUSA

El concentrado de uranio ha sufrido un incremento en los últimos 4 años, multiplicando por 15 su valor. Tuvo un máximo en julio del 2007 y ahora está disminuyendo. Está del orden de 10 veces el precio que tenía en el 2003. Aunque haya estas subidas tan tremendas, el impacto que tiene sobre el precio del kWh de origen nuclear es reducido por lo que se dijo anteriormente. El enriquecimiento sigue con una tendencia alcista, pero no de la manera tan espectacular como ha tenido el uranio. Entonces, el coste de la energía nuclear, a pesar de los movimientos que pueda haber en los precios, como en el caso del concentrado, es muy estable, predecible y no depende de condiciones geopolíticas.

Para que un suministro sea sostenible, debe ser limpio, fiable, estable, barato y duradero. Estos son compromisos sociales y medioambientales que se cumplen con la energía nuclear.

El que no haya suficiente uranio para las centrales nucleares es el talón de Aquiles de la energía nuclear. Sin embargo, los que así piensan, no saben la inmensidad de la corteza terrestre. No saben que, hasta ahora, realmente solo ha habido búsqueda en determinados sitios y por tiempos limitados. Hace mucho que no se hacen nuevas inversiones en exploración porque el uranio tiene unos precios muy bajos, especialmente desde la caída del muro de Berlín. Entonces hubo una inundación de concentrados de uranio por todo el mundo y los precios tocaron fondo, lo que motivó que

EL CICLO DEL COMBUSTIBLE Y LAS RESERVAS DE URANIO

muchas empresas tuvieran que desaparecer y otras que fusionarse, pasando momentos de cierta dificultad.

Aparte de la corteza terrestre, está la corteza cerebral. El ser humano no deja de imaginarse conceptos nuevos y medios para obtener más rendimiento a las tecnologías, para poder llegar a lugares más profundos y poder tener métodos de detección muy superiores a los que existían anteriormente. Esto ha funcionado desde que existe el ser humano.

Cuando el mercado da unas señales de bajadas de precios, nadie invierte en exploración, como es lógico. Pero cuando los precios suben, el mercado simplemente aumenta las inversiones en exploración, de tal manera que cuando se busca el uranio, se encuentra. A pesar de las fluctuaciones de los precios del uranio, la tendencia es siempre que la estimación de las reservas existentes siguen aumentando conforme pasa el tiempo.

En los últimos años, los precios se han disparado y automáticamente han empezado las búsquedas de nuevos yacimientos por las empresas del sector. Según los datos del Redbook de la IAEA del año 2005 y del 2007 (ver figura), las reservas existentes se calcularon a un precio de 50 dólares la libra de concentrado. El concepto de reserva es un concepto relativo y ligado directamente al precio o al coste de extracción. Nunca se pensó que pudiera estar a los 95 dólares de ahora o a los 135 dólares que estuvo en el 2007. Considerando el precio del concentrado de 50 dólares la libra, se tienen un total de recursos conocidos según las previsiones del 2005, de 4,7 millones de toneladas. Esto representa la posibilidad de satisfacer la demanda actual durante 71 años.

RECUPERABLES A < 130 \$/KgU (< 50 \$/lb U ₃ O ₈)	AÑOS DE PRODUCCIÓN			
	L.R. 2005	L.R. 2007	L.R. 2005	L.R. 2007
RECURSOS RAZONABLEMENTE ASEGURADOS (RAR) →	3.296.689	3.338.300	49	50
RECURSOS ESTIMADOS ADICIONALES →	1.446.164	2.130.600	22	32
TOTAL RECURSOS CONOCIDOS →	4.742.853	5.468.900	71	82
Demanda actual (tU/año) =		66.500	Consumo Año 2006	

Fuente: IAEA Red Book 2005 & 2007

Dos años después, en el 2007, la estimación de las reservas es de 5,4 millones de toneladas de uranio, que puede representar satisfacer la demanda actual para 82 años. Esto muestra que cuando se ponen los medios, el conocimiento de la corteza terrestre, los medios humanos y el mercado se comporta adecuadamente, al final existen reservas suficientes. La energía nuclear no tendrá problemas en necesidades de combustibles en lo que respecta al uranio.

CAPÍTULO V

LA GESTIÓN DE LOS RESIDUOS NUCLEARES

D. José Ramón Armada
Director General
ENRESA

INTRODUCCIÓN

El país tiene una demanda y una necesidad de disponer de fuentes de energía firmes que puedan asegurar la estabilidad de una red. Además, cada vez tienen que aportar más energía al consumo. Hay una fabricación sólida, con gran experiencia y no solo muy implantada en España, sino con un gran peso en la exportación. El combustible está asegurado. Se tiene la tecnología disponible ya que las centrales están ahí, por lo que en algún momento, habrá que aumentar su número. Indudablemente la producción de energía por la vía nuclear produce residuos, como los producen también otros tipos de centrales. ENRESA es una empresa que tiene unos 24 años de vida. Se creó para gestionar los residuos radiactivos que se generan en el país. Atiende a la recogida, transporte y almacenamiento de los residuos que provienen de toda España, de un total de 834 instalaciones. No solo cuentan las centrales nucleares, que son las que tienen mayor peso, sino también se gestionan los residuos de aquellos puntos como los hospitales, industrias, centros de investigación, etc. Con esto se ha dotado de unos planes generales de residuos que se proponen cada año al Ministerio de Industria, en los que se hace la previsión de gastos para cubrir las necesidades de gestión de residuos del país.

GESTIÓN DE RESIDUOS

Los residuos radiactivos que se gestionan están clasificados a nivel internacional en dos grandes grupos, los de media y baja actividad. Y el combustible gastado que es el de alta actividad.

Las previsiones se hacen contando con la vida útil de las centrales, que está fijada en 40 años. Pero si hubiese extensión de vida o nuevas centrales, como se hacen ajustes anuales, se irían cubriendo las necesidades planteadas. Los residuos de baja y media provienen, según el parque existente y en la vida estimada a día de hoy, del desmantelamiento de las centrales nucleares en un 72%, de la operación de centrales en un 20%, de la fabricación de elementos combustibles en un 1%, de las instalaciones generales de residuos en un 3% y de otras causas en un 4%.

En cuanto a los residuos de alta actividad, el combustible gastado en centrales nucleares constituye el 79%, los vidrios un 1% y otros residuos de media actividad que se generan como resultado del reproceso del combustible el 20%. Cuando se reprocesa el combustible, uno de los residuos que vuelven son los residuos vitrificados. Vandellós I reprocesó todo su combustible en Francia y en el 2010-2011 volverán a España.

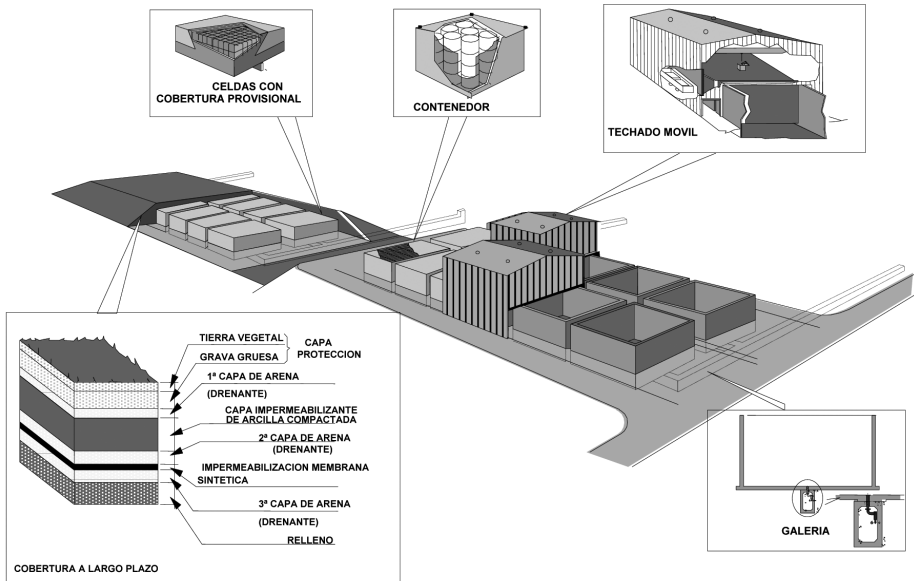
La organización de control que tiene ENRESA es bastante compleja, el 20% del capital es de la SEPI y el 80% es del CIEMAT. Por supuesto, como todo el sector, ENRESA está regulada por el Ministerio de Industria, por el Consejo de Seguridad Nuclear, por el Ministerio de Medio Ambiente y por la Secretaría General de la Energía.

La instalación para almacenamiento de residuos de media y baja actividad está en El Cabril, en la Sierra de Córdoba. Allí se almacenan todos los residuos de media y baja actividad que se generan en todo el país. El sistema es sencillo. Es un confinamiento, es decir, lo que se hace es bloquear el residuo para evitar su dispersión y blindarlo para evitar que las radiaciones afecten fuera de su entorno.

El diseño de El Cabril es el que se muestra a continuación.

Los contenedores de hormigón almacenan bidones que se reciben ya inmovilizados de las centrales nucleares y de otro tipo de instalaciones. Se pueden recibir a granel, sin compactar, y se compactan en la misma instalación. Son dados de hormigón, de 2 m de arista, que se van metiendo en unas estructuras más grandes. Al final, estas se recubren con una capa de hormigón y una vez que están llenas, se recubren, restituyendo el terreno natural con una serie de capas. Estas capas están asegurando, mediante superposición de capas impermeables y drenantes, que el agua a lo largo del tiempo no penetre y no arrastre los radioisótopos que tienen los residuos. Hay que tener en cuenta que estas estructuras están diseñadas para una vida de 300 años y no solamente hay que asegurar que va a ser así sino

LA GESTIÓN DE LOS RESIDUOS NUCLEARES



Fuente: ENRESA

que hay que demostrarlo frente a las autoridades. Todo esto lleva aparejado una serie de estudios y una serie de proyectos que se someten a autorización. En este momento se está haciendo un proyecto I+D, con una duración de unos 7 años, para el estudio de las capas de cobertura que tienen que llevar estas instalaciones.

En cuanto a almacenamiento de combustible gastado, los residuos de alta, hay que gestionar 6.600 toneladas de instalaciones actuales y de vida útil 40 años. Todas las centrales nucleares tienen su almacenamiento en piscinas. A medida que se van llenando las piscinas se van pasando a depósitos en seco. Estos cumplen la misma función que la piscina, mantener en seguridad estos elementos ya quemados.

ALMACENAMIENTO TEMPORAL CENTRALIZADO

La condición para poder empezar el desmantelamiento de la C. N. José Cabrera es que los elementos combustibles pasen de la piscina al almacenamiento en seco. Es un concepto físico diferente al de Trillo, aunque conceptualmente exactamente igual. Es un blindaje suficiente para que la radiación esté controlada fuera del confinamiento. Estos elementos combustibles todavía tienen una potencia residual que obliga tener unos sistemas de evacuación de calor. Normalmente son de circulación natural y

los diseños de los contenedores prevén que tengan una circulación natural que vaya refrigerando. Se lleva trabajando en este objetivo desde el año 2005, apareciendo en los sucesivos planes de generales de residuos. Ahora se ha tratado de darle un impulso importante mediante un almacén temporal centralizado para los elementos combustibles de las centrales, es decir, para el combustible gastado. En vez de tener una dispersión de almacenes por todo el territorio nacional, tener una instalación donde se pueda llevar todo el combustible gastado de las centrales actuales. Es un proceso complejo ya iniciado.

Los temas nucleares tienen un gran impacto en la opinión pública y sobre todo los temas de residuos, por lo que se diseñó una Comisión Interministerial que empezó a funcionar hace dos años prácticamente. Se estuvieron haciendo una serie de estudios para diseñar cómo hacer una convocatoria por la que los ayuntamientos se presentaran voluntarios para albergar en su término municipal un almacén de este tipo. La Comisión empezó a trabajar y ha ido sufriendo los sucesivos parones que imponen las sucesivas elecciones de este país. Cada año hay unas elecciones, si no son municipales son autonómicas, si no son autonómicas, son generales. Además, las autonómicas no son siempre al mismo tiempo. De esta forma, la ventana de oportunidad para plantear un proceso de este tipo es incierta. En estos momentos, con el cambio de gobierno, se ha vuelto a reorganizar la Comisión. Están nombrados todos los miembros. Se espera que a lo largo de este año se concrete el proceso de selección de ayuntamiento y emplazamiento, de tal manera que a final de año exista un emplazamiento para realizar ya las primeras obras del almacenamiento.

Hay diferentes opciones para guardar los elementos de combustible gastados y no hay acuerdo entre ellas. Algunos creen que lo mejor es hacer un almacén pequeño para cada central y otros, que lo mejor es hacer un solo almacén para todos los elementos de combustible, con ventajas mejores de gestión y de escala económica. Otros creen que es mejor ir al almacenamiento final, al almacenamiento geológico profundo sin hacer un paso intermedio. Pero ENRESA ha sopesado todo y parece mejor el almacén temporal centralizado (ATC) frente a otras opciones. Sus ventajas son:

- Permite abordar gestión CG/RAA de forma unificada.
- Se independiza la gestión temporal de la definitiva.
- Dota al sistema de capacidad de maniobra ante imprevistos.
- Reduce el número de instalaciones de almacenamiento y emplazamientos.
- Disminuye riesgos y servidumbres asociados a estas instalaciones (seguridad física, ...)

- Permite cumplir las cláusulas de repatriación de residuos y materiales del reprocesado del CG en el extranjero.
- Reduce significativamente los costes.
- Permite racionalizar y optimizar la operación y servicios de apoyo.

Además, permite hacer un I+D mucho más potente, asociado a un centro de investigación y cercano al centro de almacenamiento. Pensar en estos momentos en soluciones definitivas, como un AGP, lo hacen solamente los países que ya disponen de un almacén temporal centralizado y España, actualmente, no está en esos niveles. En estos momentos ya se tiene en cuanto a residuos de media y baja un almacén centralizado, que es el de El Cabril. Pero es importante también, disponer de uno para combustible gastado, para que el panorama nuclear quedase completamente limpio en su futuro con respecto a la gestión de residuos. Estaría absolutamente solucionado para un plazo de 60 a 100 años. Este plazo excede a la mayoría de los plazos de temas más vitales como el combustible y la energía. Tampoco se tiene asegurado el abastecimiento de alimentos a 60 años, y sin embargo, se ofrece este plazo con respecto a la energía nuclear, su posible desarrollo, su exploración segura, etc. Un almacén de este tipo es asegurar que no va a haber problema en los próximos 60 años.

Hay instalaciones de almacenamiento de todo tipo en el mundo. En Clab (Suecia), el almacén centralizado es una piscina. Fue el primer almacén centralizado que apareció en Europa y utilizó las tecnologías disponibles en aquel momento que eran las piscinas. Van apareciendo en Paks (Hungría), en Surry (EE.UU.) y Haba (Holanda).

Aparte de gestionar residuos, también se producen cuando se desmantelan las centrales, entre las paradas. Se desmantelará la de José Cabrera. En ese momento, ENRESA se convierte también en productor de residuos. Se gestiona de principio a fin. ENRESA hace todo tipo de clausuras de instalaciones como:

- FUA y La Haba: finalizadas y en fase de vigilancia.
- Rehabilitación de antiguas minas de uranio:
 - Andalucía y Extremadura (1997-2000)
 - Salamanca (2006-2007).
- Saelices el Chico (2001-2008).
- CIEMAT (PIMIC) (2001-2009).

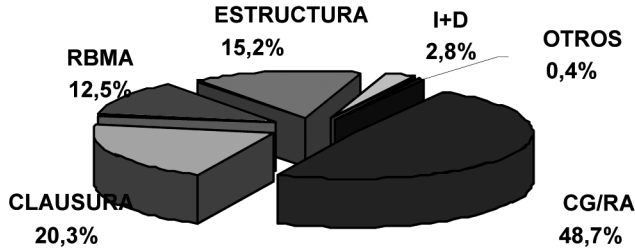
Otras actuaciones en las que participa son:

- Protocolo de colaboración sobre la vigilancia radiológica de los materiales metálicos.
- Apoyo a la respuesta en caso de emergencia.

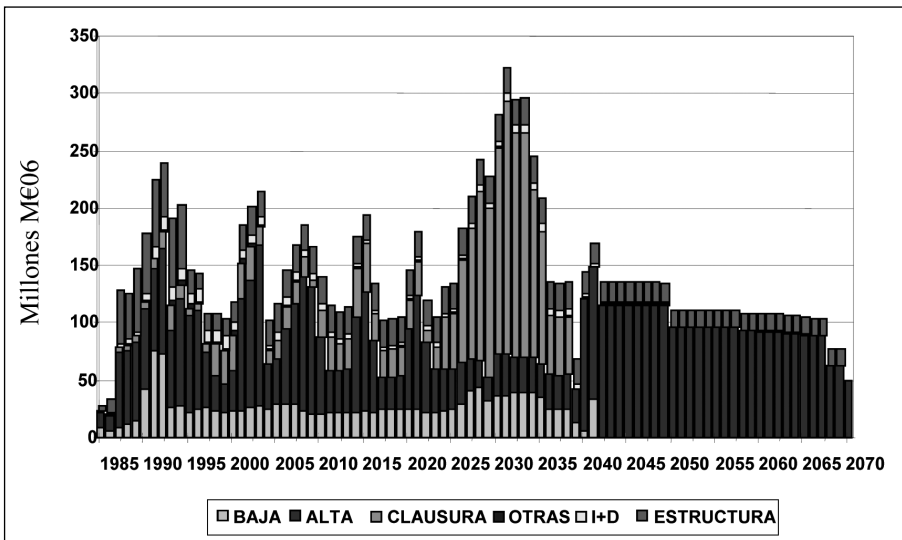
- Gestión de cabezales radiactivos de pararrayos.
- Gestión de otros materiales radiactivos aparecidos fuera del sistema regulador.

INVERSIONES

Además, ENRESA tiene un potente plan de investigación y desarrollo con los residuos. El cálculo del coste de la gestión de los residuos se va ajustando año a año. En el siguiente gráfico se muestra cómo va a variar el coste de los residuos a lo largo de los 40 años de la vida de las centrales, con un coste total estimado de 13.000 M€06 para el período de 1985-2070. El coste de la gestión de los residuos es de 0,0023 €/kWh nuclear y no es algo que impida el desarrollo de la energía nuclear.



Fuente: ENRESA



Fuente: ENRESA

CONCLUSIONES

El problema de la energía nuclear son los residuos. No se entiende muy bien, pero se oye mucho. Y también se oye que el problema de los residuos no está solucionado. Son dos frases inducidas por los movimientos ecologistas como una estrategia para parar, no el tema de la gestión de residuos sino el tema de la generación de la energía nuclear. Tienen mucha falacia detrás. Nadie se ha encontrado un residuo al andar por la calle o descolocado de su sitio. Están perfectamente analizados, caracterizados, en su sitio y pueden tener toda la vida que tiene una central nuclear y mucho más. Son residuos de alta que duran miles de años. Pero, efectivamente están solucionados. Y en el campo de los residuos hay soluciones a medio y largo plazo. Plazos que exceden en mucho a otros plazos de resolución de problemas más vitales. Se está habituado a que el gas que se consume en las centrales de ciclo combinado sea de un mes o de dos meses, con reservas garantizadas. El combustible de los coches también tiene un período en el que existe abastecimiento, pero no hay más allá. Lo que se quiere transmitir es que está solucionado para un plazo bastante más largo que cualquier otro problema mucho más acuciante.

CAPÍTULO VI LA REVOLUCIÓN DE LA IV GENERACIÓN NUCLEAR

Adolfo García Rodríguez
Presidente
Empresarios Agrupados

INTRODUCCIÓN

Desarrollo Sostenible

La energía es un bien necesario para el desarrollo. Países tan poblados como China e India han iniciado ya esa senda y otras áreas del mundo lo están haciendo o pronto lo harán. Vamos a necesitar, por tanto, cantidades crecientes de energía a precios asequibles para todos, incluidos los países en vías de desarrollo. De no conseguirse este objetivo nos podemos ver inmersos en problemas de inestabilidad social y conflictos en diversas zonas del planeta.

En la actualidad más del 80% del consumo energético mundial está basado en el carbón, el petróleo y el gas natural. Se trata de recursos no renovables que no podrán mantener un ritmo de incremento sostenido a largo plazo y que tienen un impacto negativo sobre el medio ambiente. Adicionalmente, una gran proporción de las reservas de gas y petróleo, como es bien sabido, se encuentran situadas en zonas políticamente inestables.

En consecuencia, cuando hablamos de energía hay tres aspectos fundamentales a considerar: seguridad del suministro, impacto sobre el medio ambiente y precio.

Se requiere, pues, desarrollar y hacer uso de todas las fuentes que puedan aportar energía en condiciones fiables, seguras, económicas y de res-

peto al medio ambiente, sin excepción alguna. Los combustibles fósiles representan un elevadísimo porcentaje en el “mix” actual, y a pesar de los esfuerzos que se hagan con otras fuentes lo van a seguir representando durante mucho tiempo. Es por ello que debemos esforzarnos, también, en el desarrollo de técnicas orientadas a la combustión limpia, en especial, del carbón.

De entre todas las fuentes alternativas a los combustibles fósiles, la nuclear es probablemente la más prometidora. Disponemos de centrales en explotación que han demostrado ya su viabilidad técnica y económica. Pero, además, la energía nuclear nos ofrece una vía de investigación y desarrollo muy importante a corto, medio y largo plazo.

En el corto plazo, contamos con versiones avanzadas de las centrales actuales. Su despliegue se ha iniciado ya en diversos países. Se trata de las denominadas Generación III y III⁺.

A medio plazo disponemos de nuevos conceptos que se encuentran en fases preliminares de desarrollo, los denominados reactores de Generación IV, a los que más adelante me voy a referir con algún detalle. Entre otros objetivos tienen los de aumentar sustancialmente la disponibilidad de combustible, reducir los residuos radiactivos, y conseguir aplicaciones más allá de la generación eléctrica, p.ej. producción de hidrógeno.

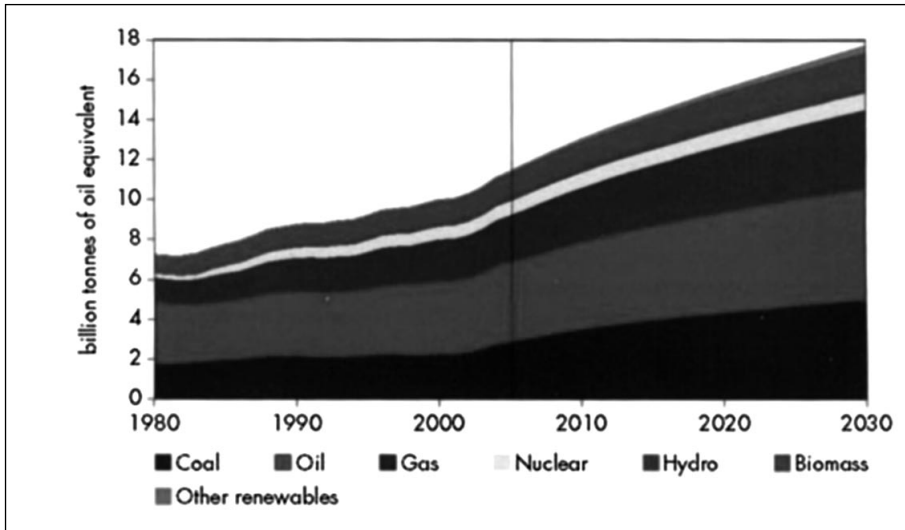
La solución del problema energético, que con carácter general tenemos planteado, pasa, pues, por el desarrollo de fuentes alternativas a los combustibles convencionales, así como de nuevas técnicas para el uso de estos en condiciones aceptables para el medio ambiente. Se trata de una tarea ingente que va a requerir enormes recursos técnicos y financieros. Sólo el mundo desarrollado está capacitado para llevar a cabo esta tarea, con el objetivo de obtener fuentes energéticas asequibles para todos, no sólo para los más ricos. Es este un problema, como dije anteriormente, de sostenibilidad social en una economía cada vez más globalizada, que requiere una decidida voluntad política.

Antes de plantear los detalles del Programa de Generación IV, voy a exponer las conclusiones del World Energy Outlook (WEO) 2007 de la Agencia Internacional de la Energía (AIE) en relación con la cuestión de la energía en el horizonte del 2030 y el papel que sus analistas asignan a la energía nuclear. De todo ello se desprenderán las razones que aconsejan desarrollar una nueva generación de reactores nucleares cuyo despliegue debería empezar a estar disponible a partir de esas fechas.

INFORME WORLD ENERGY OUTLOOK 2007 DE LA AIE

EL WEO-2007 establece un Escenario de Referencia para la Evolución de la Demanda de Energía Primaria en el Mundo, tal como queda reflejado en la Figura VI-1. Este Escenario contempla una continuidad de las políticas actuales. La proyección al 2030 muestra un incremento sostenido del recurso al carbón, petróleo y gas, de tal modo que el porcentaje de la aportación de los combustibles fósiles se mantiene prácticamente constante, en el entorno del 80%.

Figura VI-1

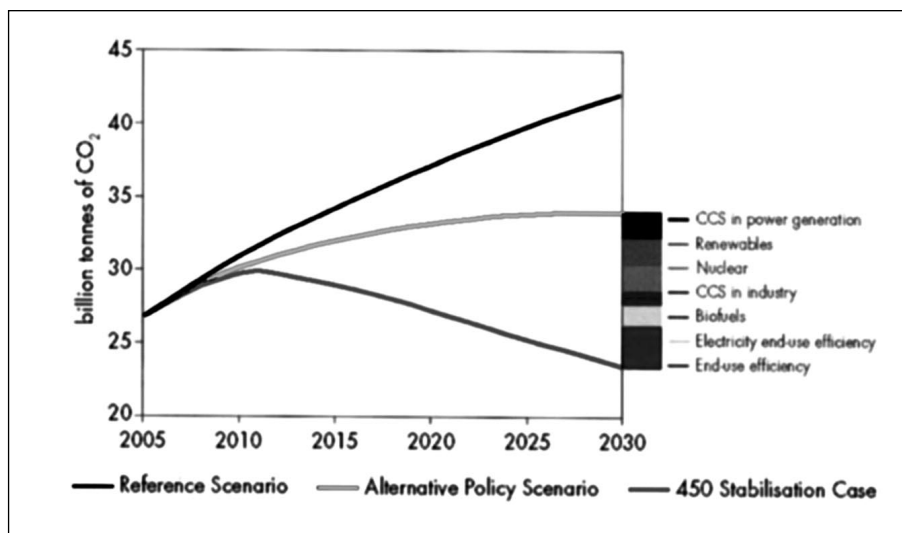


Fuente: WEO 2007, AIE

De mantenerse el Escenario de Referencia se plantean dudas sobre la disponibilidad y precio de los combustibles fósiles, cuyo consumo se incrementaría en más de un 50% desde 2005. Además está el problema del control de las emisiones de CO₂. El Escenario de Referencia traería consigo un aumento de emisiones desde las 27.000 × 10⁶ toneladas de CO₂ en 2005, hasta alrededor de 42.000 × 10⁶ en 2030. Esta elevación se considera inaceptable. Por esta razón se han estudiado dos nuevos Escenarios, Alternativo y de Estabilización. Los resultados pueden verse en la Figura VI-2. El Escenario Alternativo considera la implantación de todas las políticas de reducción de CO₂ que se vienen contemplando internacionalmente. El resultado es una estabilización de las emisiones de CO₂ en los 33.000 × 10⁶ de toneladas/año entre los años 2020 y 2025. El problema está en que la con-

centración de CO₂ en la atmósfera seguiría subiendo. Por esa razón se ha planteado un nuevo caso de Estabilización de esa concentración en el nivel de 450 ppm, por encima de los 380 ppm que tenemos en la actualidad. Para conseguir ese objetivo habría que introducir y aplicar nuevas políticas de manera casi inmediata que se reflejen en una reducción de emisiones sostenida a partir del 2012, consiguiendo alcanzar la cifra de 23.000 × 10⁶ toneladas/año en 2030.

Figura VI-2



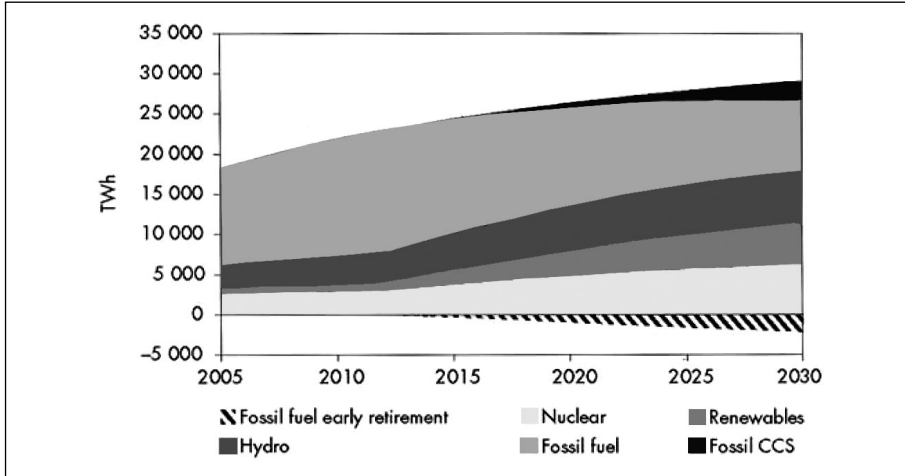
Fuente: WEO 2007, AIE

Las medidas adicionales están reflejadas en la Figura VI-2 y se refieren básicamente a intensificar el secuestro de CO₂, potenciar las renovables y la energía nuclear, aumentar la producción de biofuels y mejorar la eficiencia en el uso de la energía.

En la Figura VI-3 se representa la evolución de la generación eléctrica bajo este Escenario de Estabilización. Cabe señalar una moderación en el incremento del consumo, una reducción en el uso de los combustibles fósiles y una potenciación de la energía nuclear, las fuentes renovables y la hidroeléctrica. Se ha considerado también la retirada anticipada de centrales de combustibles fósiles –carbón fundamentalmente– y su sustitución por nuevas centrales termoeléctricas con secuestro de CO₂.

Bajo estas hipótesis se plantea una duplicación de la generación nuclear en los próximos 20 años. Para ello sería necesario iniciar la construcción de alrededor de 450.000 MWe entre los años 2010 y 2025, con el fin de disponer

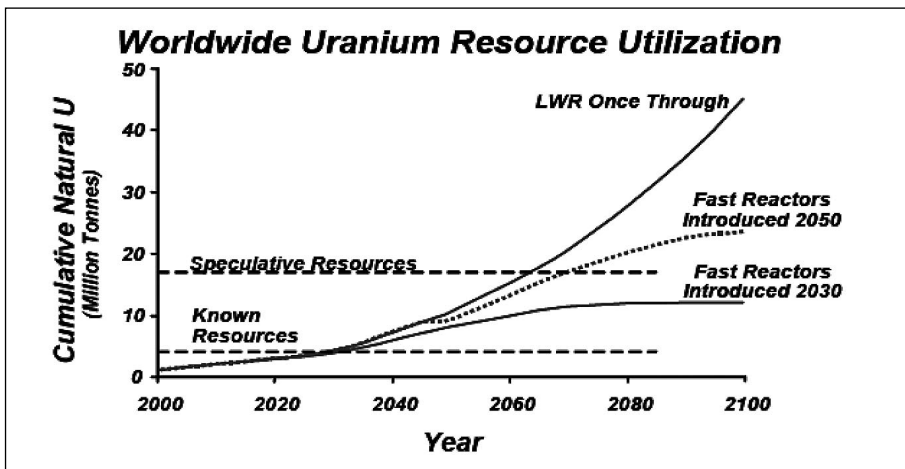
Figura VI-3



Fuente: WEO 2007, AIE

de unos 700.000 MWe en operación en 2030. Esto representa una fuerte reactivación del sector nuclear hasta alcanzar más de 40.000 MWe/año en la década del 2020. Este ritmo de construcción nuclear obliga al desarrollo de una nueva generación de reactores, entre los que se encuentran los denominados rápidos que permitan asegurar la disponibilidad de combustible nuclear a largo plazo. La Figura VI-4, tomada del Informe, A Technology Road-map for Generation IV Nuclear Energy Systems, refleja esta necesidad.

Figura VI-4



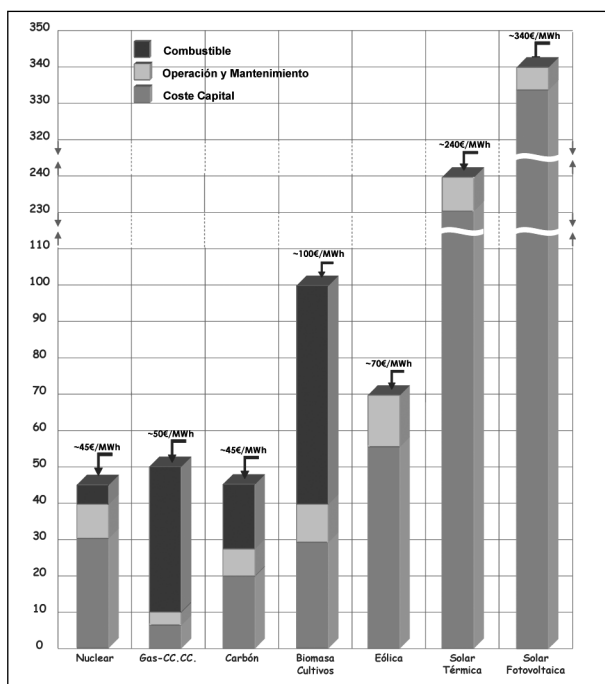
Fuente: Technology Road-map for Generation IV Nuclear Energy Systems

COSTES COMPARATIVOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

He señalado anteriormente la importancia de conseguir desarrollar fuentes energéticas seguras, fiables, respetuosas con el medio ambiente y, además, económicas, ya que la energía debe estar al alcance de todos, como se ha dicho. En este sentido es de interés considerar, a título de ejemplo, los datos económicos aproximados de diversas opciones, tal como queda reflejado en la Figura VI-5, obtenidos a partir de la situación en España en 2006.

La energía nuclear, el gas en ciclos combinados y el carbón, se pueden considerar en un rango de costes de 45-55 €/MWh. Las diferencias entre estas tres opciones están en la diversa contribución del coste de capital, operación y combustible, en cada caso. Mientras la nuclear es intensiva en capital el gas depende en gran proporción del precio del combustible. El carbón, por su parte, ocupa una situación intermedia. La nuclear ofrece, por tanto, una gran estabilidad económica a largo plazo por el escaso peso del combustible, si bien tiene todos los inconvenientes asociados a su carácter de ser intensiva en capital y de los largos plazos de maduración de las inversiones.

Figura VI-5



Fuente: Elaboración propia

La opción biomasa-cultivos, en España, requiere fuertes subvenciones ya que el coste de generación se situaría en el entorno de los 100 €/MWh. Este coste puede ser susceptible de reducción en otros países y también a través de futuros desarrollos en los cultivos energéticos.

La eólica ha venido reduciendo su coste de generación hasta situarse actualmente en España en el entorno de los 70 €/MWh que, naturalmente, requiere subvenciones. Hay que tener en cuenta también el carácter no gestionable de esta energía, lo que reduce el valor real del MWh. Con todo, es previsible que la energía eólica se siga desarrollando al tiempo que reduce su coste.

La energía solar, por su parte, alcanza elevados costes de generación, entre los 240 €/MWh de la solar térmica y los 340 €/MWh de la fotovoltaica. Su desarrollo actual en España está basado en fortísimas subvenciones. De hecho la fotovoltaica que ha entrado en explotación con anterioridad al pasado 29 de septiembre recibirá, de manera garantizada, 450 €/MWh durante los primeros 25 años de explotación y 320 €/MWh a partir de ese momento. Existen, no obstante, líneas de desarrollo, sobre todo en fotovoltaica, que puede aportar mejoras tecnológicas que redunden en una reducción importante de los costes de generación. Quedarán siempre las dificultades inherentes a la captación de una energía de muy baja intensidad.

Parece claro, en cualquier caso, que no disponemos de una solución única que nos pueda resolver el problema de la energía. Debemos realizar un gran esfuerzo de desarrollo en diversos frentes, de tal modo que la combinación de los resultados que se vayan obteniendo en cada uno de ellos contribuya a poder satisfacer una demanda creciente.

UNA NUEVA GENERACIÓN DE REACTORES NUCLEARES

Disponemos en la actualidad, como se ha dicho, de un parque de centrales nucleares en explotación que han demostrado su viabilidad técnica y económica. No obstante, su despliegue a gran escala plantearía problemas de agotamiento de los recursos de Uranio, así como de la gestión de los residuos radiactivos. Adicionalmente, la opinión pública demanda actuaciones orientadas a la mejora de la seguridad ante eventuales accidentes y plantea inquietudes en relación con el confinamiento de los residuos.

La tecnología nuclear tiene un largo recorrido por delante. Se ha planteado, por ello, el desarrollo de la fusión nuclear. No obstante se trata de un largo proceso, cuyos resultados finales están lejos de poder garantizarse y, menos aún, en el corto-medio plazo. Se requiere, por todo ello, abordar con decisión un ambicioso proceso de desarrollo de la tecnología de fisión nuclear, en líneas que vayan más allá de las que hoy ya do-

minamos: los reactores de neutrones térmicos, tanto de agua ligera como de agua pesada.

Hasta el momento se han venido realizando trabajos en diversas instituciones y países en varias líneas de investigación, incluyendo la construcción de instalaciones, incluso con vocación comercial, de diversas técnicas, tanto en relación con el ciclo del combustible como con Sistemas (concepto de reactor nuclear). No obstante, aunque con resultados valiosos, son insuficientes a la vista de la magnitud de nuestras necesidades.

Es por todo ello que en los últimos años han surgido iniciativas de carácter internacional para abordar con mayor solidez los trabajos de I+D necesarios para dar un gran impulso a la tecnología de fisión nuclear.

Entre estas iniciativas se encuentran fundamentalmente 3:

- **Generation IV International Forum (GIF)**. Promovido inicialmente por el DOE (EE.UU.) aunque con una vocación multinacional que ya ha cuajado.
- **Programa INPRO**. Promovido por el IAEA en paralelo con GIF. Es un plan menos ambicioso que ha ido convergiendo. EE.UU. que no participaba inicialmente, en la actualidad es miembro.
- **Programa Global Nuclear Energy Partnership (GNEP)**. Es también un programa multinacional promovido por el DOE (EE.UU.), tiene como objeto el ciclo del combustible y la no proliferación de cara a un despliegue internacional de la energía nuclear sin riesgos.

GENERATION IV INTERNATIONAL FORUM (GIF)

Como se ha dicho, Gen IV fue una iniciativa del Department of Energy (DOE) de los EE.UU.

En enero de 2000 se adhirieron otros 8 países, formalizándose la asociación en julio de 2001. En la actualidad forman parte de GIF 12 países más EURATOM, de los que 8 (*) han ratificado el Acuerdo a la fecha. En Europa son miembros, además de EURATOM, Francia, El Reino Unido y Suiza.

Figura VI-6
Países Miembros de GIF

■ Argentina	* Francia	■ Rusia
■ Brasil	* Japón	* Suiza
* Canadá	* China	■ Reino Unido
* EURATOM	■ Suráfrica	* Estados Unidos
	* Corea	

Fuente: GIF

El Acuerdo está basado en la participación de los respectivos países que aportan representantes del gobierno para constituir un órgano máximo de gestión y control, el Policy Group. Adicionalmente los distintos países aportan asesores técnicos, para constituir el Experts Group.

Las bases de la colaboración están basadas en que cada miembro soporta sus propios costes y participa en los Sistemas (concepto de reactor nuclear) y actividades de I+D que él decide. Existe también un acuerdo de intercambio de información abiertamente “cuando es posible”.

Los trabajos se iniciaron en enero de 2000, mediante la constitución de grupos de trabajo que deberían analizar las tecnologías existentes y las propuestas ofrecidas por la comunidad técnica y científica internacional. Resultado de ese trabajo fue la edición en diciembre de 2002 de un Documento como Hoja de Ruta para definir los trabajos a realizar: A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems.

La Hoja de Ruta

Para la elaboración de los trabajos se establecieron con carácter general los siguientes:

Objetivos

Sostenibilidad

- Extender la disponibilidad del combustible nuclear a largo plazo y en proporción tal que permita la sustitución de otros combustibles con vertidos perjudiciales a la atmósfera.
- Minimizar la producción de residuos radiactivos y reducir su vida.

Economía

- Conseguir un coste de ciclo de vida útil inferior al de otras alternativas energéticas.
- Que el riesgo de las inversiones financieras sea similar al de otras opciones.

Seguridad y fiabilidad

- Conseguir la excelencia en seguridad y fiabilidad de las instalaciones.
- Reducir a niveles muy bajos la probabilidad y alcance de daños al núcleo en los accidentes postulados.

- Eliminar la necesidad de establecer planes de emergencia fuera del recinto de la central.

Proliferación y protección física

- Dificultar el uso y la desviación de materiales radiactivos para su utilización en la fabricación de armas nucleares, al tiempo que se mejora la protección de las instalaciones contra eventuales actos terroristas.

SISTEMAS SELECCIONADOS

A partir de los objetivos señalados se estableció un plan de trabajo dirigido por el Roadmap Integration Team. Se obtuvieron cerca de 100 propuestas e ideas por parte de investigadores de doce países diferentes. Se estableció una metodología de evaluación y se constituyeron grupos de trabajo para analizar las opciones y sus implicaciones en cuanto a necesidades de I+D.

Los expertos que participaron en los grupos de trabajo procedían de los 10 países que entonces formaban parte de GIF y también de organizaciones internacionales tales como la OECD, la NEA, la Comisión Europea y el IAEA.

Como conclusión del esfuerzo realizado por los grupos de trabajo, se procedió a la selección de 6 Sistemas diferentes, que serían objeto de desarrollo:

- | | |
|--------------------------------------|------|
| • Gas-Cooled Fast Reactor | GFR |
| • Lead-Cooled Fast Reactor | LFR |
| • Molten Salt Reactor | MSR |
| • Sodium-Cooled Fast Reactor | SFR |
| • Supercritical-Water-Cooled Reactor | SCWR |
| • Very-High-Temperature Reactor | VHTR |

Veamos ahora cuales son las características básicas de cada uno de esos Sistemas:

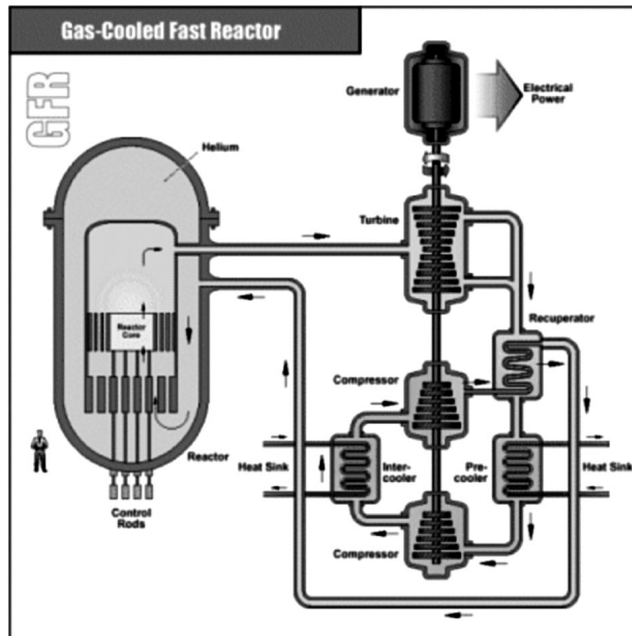
GFR – Gas-Cooled Fast Reactor

Reactor rápido de 1.200 MWe refrigerado por He, con temperatura de salida de 850 °C, conectado directamente a una turbina de gas. Está basado en un ciclo cerrado de carácter reproductor, con capacidad de gestión de actínidos. Esta gestión se realiza en instalaciones en cada planta

en explotación. Requiere un esfuerzo importante en I+D en relación con el combustible y su reciclaje. Se ha previsto una planta de demostración en 2020.

Esta tecnología está basada fundamentalmente en la experiencia de los reactores de gas europeos que han operado en Gran Bretaña, Francia y España (Vandellós 1). Los datos que se están generando para este Sistema dentro de GEN IV proceden en su mayor parte del 6º Programa Marco (GCR Project) orientado a la recuperación de esta experiencia y a la definición de un diseño conceptual. No obstante, en la actualidad participan también Francia, Japón y Suiza, y se están definiendo dos proyectos de I+D relacionados fundamentalmente con el combustible, el reprocesamiento y los aspectos de seguridad de estos reactores.

Figura VI-7



LFR – Lead-Cooled Fast Reactor

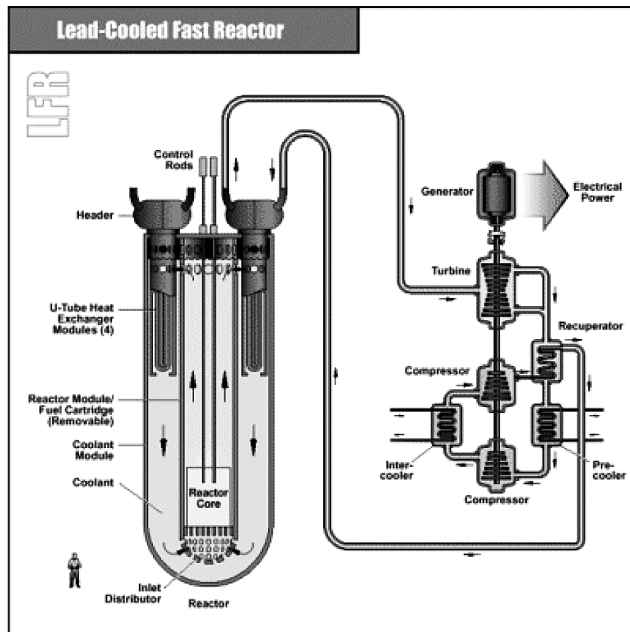
Reactor rápido, refrigerado por plomo en estado líquido o plomo bismuto, con posibles aplicaciones en los rangos de 50-150 MWe, con muy largos intervalos de recarga (1030 años), 300-600 MWe, de carácter modu-

lar, o grandes centrales en el rango de los 1200 MWe. Está basado en varias opciones de ciclo cerrado de combustible con capacidad de reproducción y gestión de actínidos. Dicha gestión se llevaría a cabo en instalaciones centralizadas. Las temperaturas en la salida del refrigerante se sitúan entre 480 y 800 °C. Estos reactores poseen excelentes características desde los puntos de vista de resistencia a la proliferación y protección física. Requieren esfuerzos importantes en I+D en relación con el combustible, materiales y control de la corrosión.

Se ha previsto una planta de demostración hacia el 2025.

En este Sistema se están realizando estudios en Europa dentro del 6º y 7º PM (proyecto ELSY), identificándose nuevos conceptos de diseño innovadores respecto al propuesto en el Roadmap que pueden hacer del Sistema un candidato real para GEN IV en la familia de reactores rápidos. Otro aspecto positivo en este caso es que convergen las tecnologías de transmutación contempladas en el programa GNEP lanzado por EE.UU. con posterioridad a GEN IV. Bajo esta perspectiva, EE.UU. está desarrollando trabajos para este reactor en su proyecto SSTAR, así como también Japón.

Figura VI-8

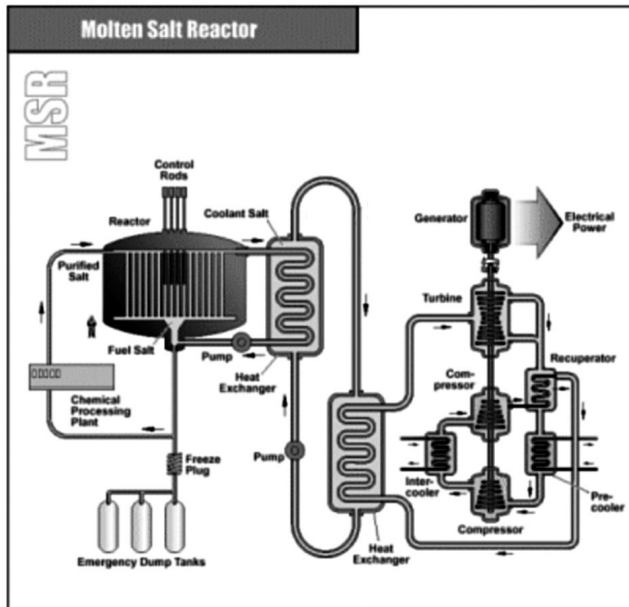


MSR – Molten Salt Reactor

Reactor térmico con un ciclo de combustible cerrado que puede estar diseñado para el quemado eficiente de elementos transuránicos procedentes del combustible gastado de reactores de agua ligera. Se contempla el reciclado total de actínidos. Puede también ser utilizado como reactor reproductor, dependiendo del combustible, tanto en espectro térmico como rápido. El combustible en forma de sales fluidas compuestas por sodio, circonio y fluoruros de uranio, circula a través de canales en una matriz de grafito. Los actínidos y otros productos de fisión forman fluoruros en el líquido. No se precisa la fabricación de elementos combustibles. Se contemplan centrales de 1000 MWe operando a baja presión y con temperaturas por encima de los 700 °C. Se utilizaría para generación eléctrica y quemado de residuos. Requiere un esfuerzo importante de I+D en el desarrollo del sistema.

En este Sistema no se ha avanzado gran cosa desde el diseño presentado en el Roadmap. No obstante, es una línea de desarrollo con un interés potencial importante relacionado con las ventajas del combustible líquido, que pudiera reactivarse para determinadas aplicaciones.

Figura VI-9

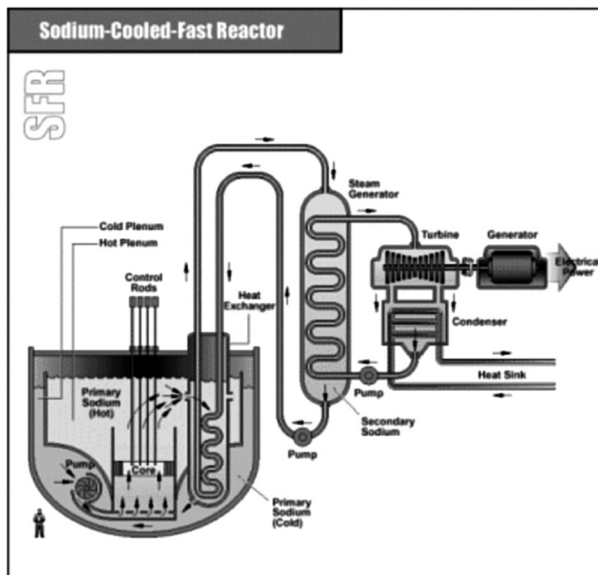


SFR – Sodium-Cooled Fast Reactor

Reactor rápido de pequeño tamaño –50 a 300 MWe– o grande –hasta 1500 MWe– refrigerado por sodio con temperatura de salida en el entorno de los 550 °C. Dispone de un ciclo de combustible cerrado como reactor reproductor y para la gestión de actínidos. Hay dos versiones –bucle a presión una y piscina, la otra– basadas en distintos combustibles, constituidos por una mezcla de uranio y plutonio en ambos casos en forma de aleación metálica con actínidos menores y circonio, en el segundo, y óxido en el primero. Ambos cuentan con un sistema de cierre del ciclo, centralizado. El esfuerzo en I+D se centrará en estos casos en las tecnologías de reciclado –en medio acuoso para el óxido y pirometalúrgico para la aleación– economía del sistema y mejora de la seguridad. En la versión modular –50 a 300 MWe– se ha previsto que el reprocesado se lleve a cabo en una instalación colateral a la propia central.

Este reactor es uno de los primeros Sistemas de GEN IV candidatos a operar, posiblemente en Francia. En su diseño se están volcando las experiencias de los prototipos PHOENIX y SUPERPHOENIX en Francia, también refrigerados por Sodio (Na), y de Japón y otros países. Los mayores avances se están produciendo en el desarrollo del combustible. En INPRO es uno de los Sistemas más soportados, y es en este marco donde India y China también han venido contribuyendo a su desarrollo.

Figura VI-10



Los proyectos de I+D definidos en GIF en apoyo al desarrollo de estos reactores, son los siguientes:

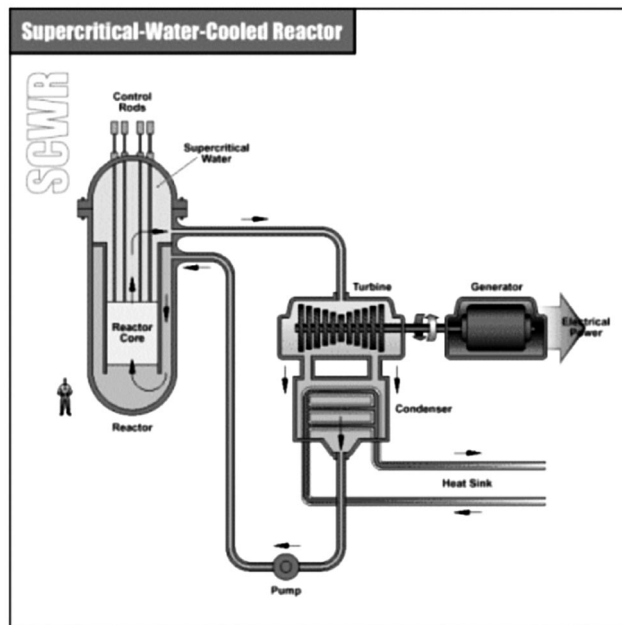
- Integración del Sistema y Evaluación
- Seguridad y Operación
- Combustibles Avanzados
- Diseño de Componentes y del Resto de la Central
- Demostración Internacional del Ciclo Global de Actínidos

Se ha previsto poder disponer de una planta de demostración que se ajuste a los criterios GIF hacia 2020.

SCWR – Supercritical-Water-Cooled Reactor

Se trata de un Sistema que contempla dos opciones. La primera es un reactor térmico con ciclo de combustible abierto, mientras que la segunda se refiere a un reactor rápido con ciclo de combustible cerrado y reciclado total de actínidos. En ambos casos el refrigerante es agua en condiciones de presión y temperatura más allá del punto termodinámico crítico, con el fin de aumentar la eficiencia energética. Se puede utilizar tanto en versión con vasija como con tubos a presión. La temperatura de salida del refrige-

Figura VI-11



rante se sitúa entre 510 y 625 °C. Se trata de plantas en los rangos de los 300-700 Mwe y los 1000-1500 MWe, que se espera sean sencillas en sus sistemas auxiliares y económicas de inversión y de explotación. Requieren un esfuerzo en I+D, fundamentalmente en el área de materiales. Esta prevista una planta de demostración de 30 a 150 Mwe en 2022.

En este Sistema la mayor contribución a GEN IV procede de Europa y Canadá, donde se han realizado experimentos del comportamiento del núcleo en condiciones supercríticas.

Hasta el momento se han definido tres proyectos de I+D en apoyo del desarrollo de estos reactores:

- Diseño e Integración
- Termohidráulica y Seguridad
- Materiales y Química

Además de Euratom y Canadá, están interesados en algunos de los referidos proyectos, Japón, Corea y Francia, si bien a la fecha no se ha formalizado ninguno de ellos.

VHTR – Very-High-Temperature Reactor

Es un reactor térmico con ciclo de combustible abierto. Su tamaño se sitúa en el entorno de los 250-300 MWe, con He como refrigerante y grafito como moderador con temperatura de salida de 900-1000 °C. Se considera de interés para suministrar calor para diversos procesos industriales, incluida la gasificación del carbón y la producción de H₂ aunque también puede ser utilizado en régimen de cogeneración de energía eléctrica y calor.

Existe una experiencia de base en diversos países utilizable en algún modo en el desarrollo de este tipo de reactores, derivada de centrales comerciales, prototipos y trabajos de laboratorio. No obstante, se requiere un esfuerzo considerable en I+D para conseguir resultados utilizables en los nuevos diseños, que se están llevando a cabo tanto en el contexto de GIF como en programas nacionales. Los proyectos definidos en GIF, son los siguientes:

- Diseño, Seguridad e Integración del Sistema
- Materiales
- Componentes
- Combustible y Ciclo del Combustible
- Producción de H₂
- Métodos y Herramientas Avanzados de Cálculo

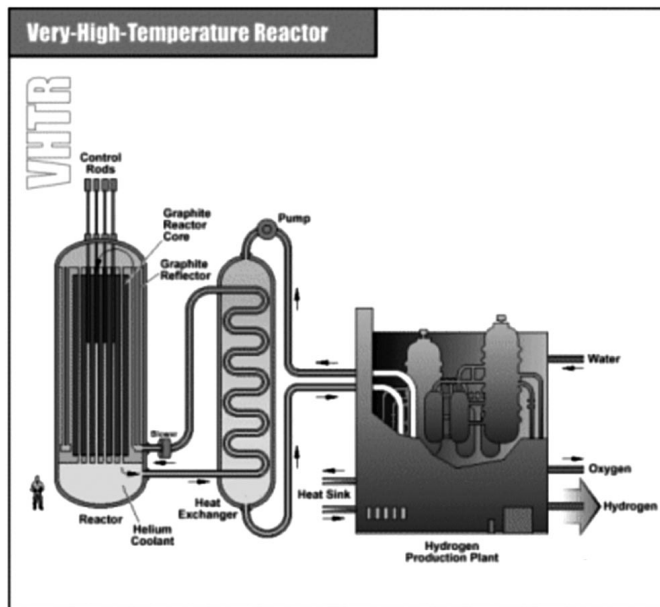
Se contempla, inicialmente, un ciclo de combustible abierto utilizando uranio enriquecido en proporción $< 20\%$, pero se van a estudiar también ciclos cerrados basados en U/Pu orientados a la reducción de residuos de forma simbiótica con reactores de agua ligera.

Entre los trabajos que se vienen realizando en programas nacionales conviene destacar el PBMR, reactor modular, con bolas como elementos combustibles, de 160 Mwe, que está desarrollando la República de Suráfrica. Se encuentra en la actualidad en fase avanzada de diseño para la construcción de un prototipo de esa potencia.

Se considera que los 6 Sistemas seleccionados cumplen con los siguientes criterios:

- Aportan avances importantes en relación con los objetivos propuestos.
- Permiten asegurar el crecimiento de la generación eléctrica al tiempo que aportan soluciones de generación de calor para aplicaciones industriales y en particular para la producción de H_2 .
- Poseen algunas características que son comunes en varios de ellos, al objeto de tener en cuenta que no todos pudieran finalmente desarrollarse.
- Han tenido en cuenta las necesidades, intereses y prioridades de los países miembros de GIF.

Figura VI-12

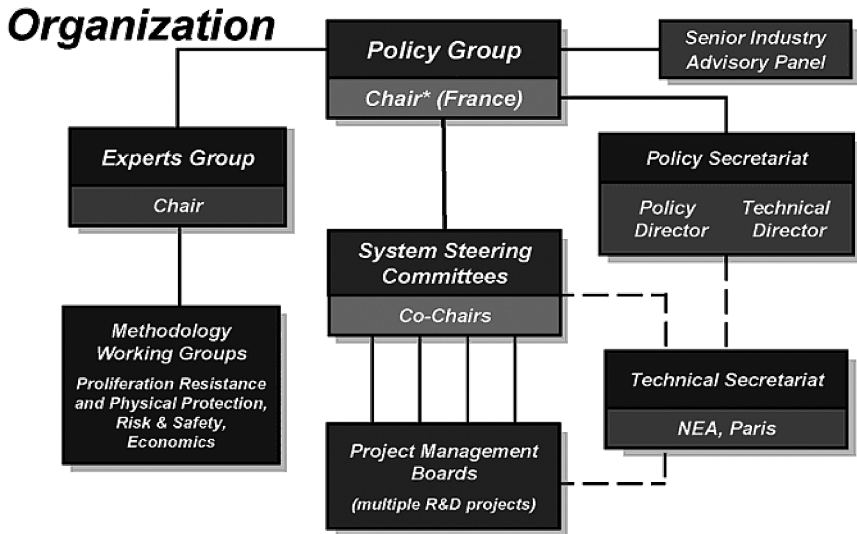


ORGANIZACIÓN DE GIF

Como hemos podido ver, GIF es un ambicioso proyecto multinacional en el que participan hoy 13 miembros con diverso grado de compromiso. De ellos 8 han ratificado el Framework Agreement: Canadá, Euratom, Francia, Japón, República de Corea, Suiza, Estados Unidos y República Popular China.

La Organización de GIF, es la que se refleja en la Figura VI-13.

Figura VI-13



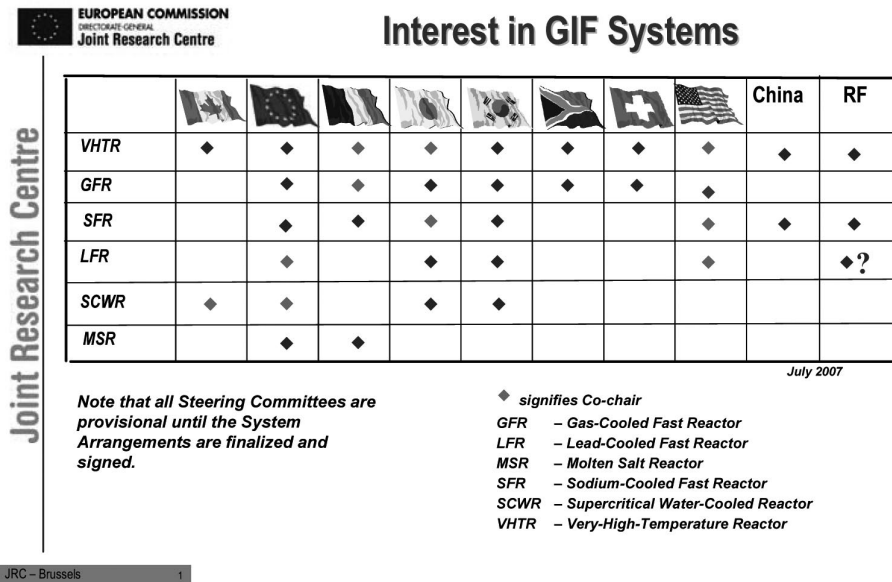
<http://www.gen-4.org/GIF/Governance/index.htm> 19

Existe, como se ha dicho, un órgano rector máximo que es el Policy Group, constituido por representantes de los gobiernos de los países miembro. El PG está asistido por un Secretariado (Policy Secretariat) y de él dependen el Experts Group y los System Steering Committees, uno para cada Sistema. La NEA asume el Technical Secretariat. Adicionalmente el PG cuenta con el asesoramiento del Senior Industry Advisory Panel, constituido por representantes de la industria nuclear, que de ese modo pueden aportar ideas relativas a la industrialización y posterior comercialización de los desarrollos que se están llevando a cabo.

Como se ha dicho, también los distintos miembros de GIF deciden en que Sistemas desean participar y en que áreas del desarrollo de I+D quieren hacer aportaciones.

En la Figura VI-14 están representados los países que se han interesado en participar en el desarrollo de los distintos Sistemas.

Figura VI-14



En la figura se puede ver que a la fecha de julio de 2007 sólo EURATOM había manifestado su interés en participar en los 6 sistemas.

SITUACIÓN ACTUAL

Las actividades a realizar por los miembros del GIF están gobernadas por 3 textos legales:

- **Framework Agreement** (2005). Este texto es el de rango superior y a la fecha ha sido ratificado por 8 de los miembros: Canadá, Francia, Japón, Estados Unidos, Suiza, República de Corea, EURATOM y República Popular China.

- **System Arrangements.** Textos que recogen los acuerdos formales de participación en cada uno de los 6 Sistemas. A la fecha se han firmado los siguientes acuerdos:
 - GFR – Entre EURATOM, Francia, Japón y Suiza
 - SCWR – Entre Canadá, EURATOM y Japón
 - SFR – Entre EURATOM, Francia, Japón, República de Corea y Estados Unidos
 - VHTR – Entre Canadá, EURATOM, Francia, Japón, República de Corea, Suiza y Estados Unidos.

- **Project Arrangements.** Textos que se refieren a los acuerdos de participación en Tasks y Work Packages definidos en los Project Plans. Cada Sistema daría lugar a entre 4 y 6 Proyectos. En la actualidad se han establecido 2 Proyectos en el GFR, 3 en el SCWR, 5 en el SFR y 4 en el VHTR.

Tal y como se ha indicado, con independencia de la firma de los documentos señalados, se han mantenido los programas nacionales de I+D para estos Sistemas avanzados en diversos países, con un alcance en la mayoría de los casos ya definido antes de la iniciación del GIF. Como resultado de estos trabajos, los prototipos seleccionados en el Roadmap han quedado desactualizados, existiendo en todos ellos en el momento actual conceptos diferentes. Esta evolución está exigiendo obtener, a nivel internacional, conclusiones sobre una posible reorientación del programa para algunos de estos Sistemas. Esto se consolidará en una revisión del Roadmap prevista para ser publicada a finales de 2008.

Alguna de las conclusiones que previsiblemente se incorporarán en el nuevo Roadmap pueden anticiparse a la vista del estado actual de los Sistemas y son: la posibilidad de no mantener como objetivo de GEN IV los 6 Sistemas; la reorientación del VHTR (1000 °C) para consolidar el HTR (800 °C); la reorientación de los reactores rápidos de metales líquidos con nuevos diseños tanto en los Sistemas como en el combustible y la incorporación al Roadmap de los resultados de iniciativas de INPRO y GNEP.

Se puede decir que se ha realizado un gran esfuerzo y se ha puesto en pie un Programa muy ambicioso en un esquema de amplia colaboración internacional. No obstante, el proceso ha resultado ser bastante lento y requeriría un fuerte impulso si de verdad se quieren conseguir los objetivos propuestos. En el momento actual y al ritmo de los trabajos que se están llevando a cabo, las fechas propuestas para el despliegue de los distintos Sistemas se pueden considerar optimistas.

Se precisaría que algunos de los actuales miembros de GIF refuercen su interés en el Programa, amplíen considerablemente los recursos asignados

y se decidan a ejercer de líderes para el desarrollo de determinados Sistemas. Entre estos países deberían figurar Estados Unidos, Francia, EURATOM y Japón. En el caso de EURATOM se precisa una decisión política clara y decidida de la Unión Europea. Se trataría de comprometer, como resultado de ello, fondos comunitarios importantes a través del JRC, así como activar la participación, a través del propio EURATOM, de instituciones y empresas de diversos países miembros de la UE.

EL CASO DE ESPAÑA

Finalmente unas palabras para hablar de la participación española. Es claro que la situación política en relación con la energía nuclear en nuestro país ha impedido que España fuera miembro de GIF. No obstante a pesar de las dificultades, también de naturaleza política, EURATOM acabó firmando el Acuerdo.

En el momento actual la comunidad científica y técnica nuclear española puede participar y de hecho participa en el Programa GIF a través de EURATOM. En tanto y cuanto esta organización amplíe sus recursos de I+D para este propósito, España también lo hará. No obstante el Programa es flexible y admitiría una participación reforzada española si nuestro gobierno así lo desease y estuviera dispuesto a aportar los medios necesarios para ello. Estamos hablando de un área estratégica en la que España cuenta con recursos tecnológicos suficientes para asumir un papel de cierta relevancia.

La experiencia del desarrollo de una comunidad técnica y científica en este campo ha sido un hecho demostrado como consecuencia del desarrollo de nuestro programa nuclear en las décadas de los 60, 70 y 80. Es uno de los pocos ejemplos en nuestro país en que se ha conseguido un desarrollo sostenido y armónico del que han sido actores los centros de investigación, la universidad y la industria en un esquema de colaboración mutua. Sería, por lo tanto, una de las áreas claras en las que un esfuerzo financiero en la fase actual de I+D aportaría unos resultados con efecto multiplicador sobre nuestro tejido industrial y sobre la sociedad en general.

CAPÍTULO VII INNOVACIÓN EN LA SEGURIDAD DE SISTEMAS AVANZADOS NUCLEARES

Luis E. Herranz

Responsable de la Unidad de Investigación en Seguridad Nuclear

Departamento de Energía

CIEMAT

INTRODUCCIÓN

Tres ideas generales sustentan el planteamiento de este capítulo. A saber:

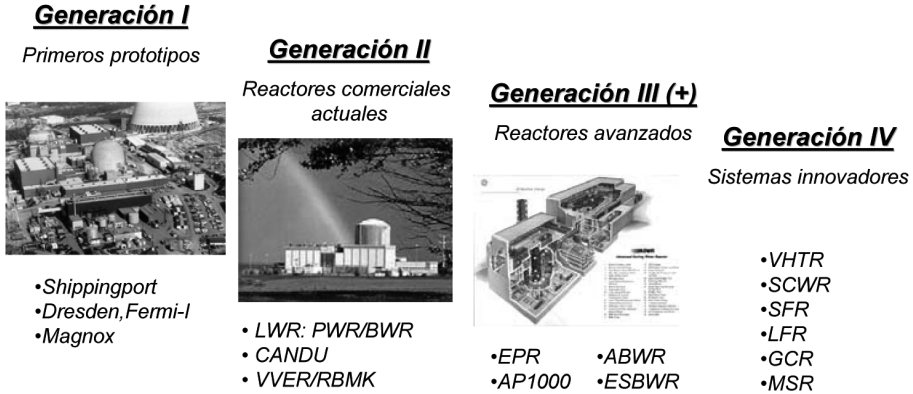
- La sencillez de los fundamentos de la seguridad nuclear.
- La seguridad como cualidad a mantener y mejorar constantemente.
- La seguridad de los reactores actuales como condición *sine-qua-non* para una expansión de la generación de energía de origen nuclear.

Sobre ellas se estructura el siguiente análisis que revisará los principios de seguridad y sus realidades en los reactores nucleares en operación y en los sistemas innovadores de producción nuclear, no sin recordar la primera configuración de sistemas de seguridad en la denominada Pila de Fermi.

La FiguraVII-1 ilustra la evolución temporal de la tecnología nuclear, desde los primeros prototipos, allá en los 50, hasta la Generación IV, cuya implantación comercial se espera a lo largo de la tercera y cuarta décadas del presente siglo. Actualmente, la producción núcleo-eléctrica consta mayoritariamente de diseños de Generación II, con algunas unidades de Generación III ya operando en algunos países asiáticos como Japón.

Haciendo un merecido homenaje a los pioneros que, liderados por Fermi, demostraron la viabilidad del auto-mantenimiento de la reacción de fisión, los dibujos que de aquel evento pueblan los textos permiten identificar dos sistemas de control y seguridad, cuyo fin era detener la reacción

Figura VII-1



Fuente: Elaboración propia

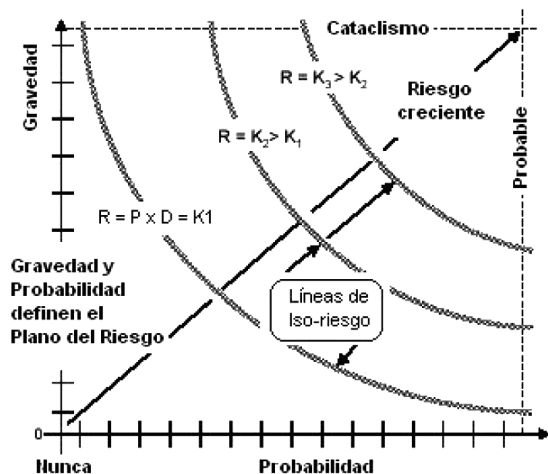
en cadena en caso necesario. Ambos basados en la capacidad del cadmio como absorbente neutrónico, uno de los sistemas consistía en verter una solución salina de este elemento sobre la pila de grafito y uranio, mientras el otro consistía en la introducción de una columna de madera forrada de una película también de cadmio. Por tanto, podríamos datar en diciembre de 1942 el origen de los sistemas de seguridad; en otras palabras, la seguridad nuclear nació intrínsecamente ligada a la posibilidad de generación nuclear de energía.

MÉTRICA DE LA SEGURIDAD: EL RIESGO

Desde su nacimiento, el fin último de la seguridad nuclear ha sido mantener la radiactividad confinada en cualquier circunstancia, bien sea en operación normal o durante accidentes, de modo que no tenga efecto nocivo alguno sobre las personas y/o el medio ambiente.

Previo a valorar la seguridad nuclear es indispensable introducir algunas ideas. Ante cualquier actividad, particularmente las de carácter industrial, la cuestión a plantear no es: “¿Es segura?”. La formulación correcta de la pregunta es: “¿Cuánto segura es?”. Para responder a la última se suele hablar en términos de riesgo, variable complementaria a la seguridad (i.e., $S+R=1.0$), cuya definición estricta es el producto de la probabilidad por el daño (i.e., $R=P \cdot D$). En términos matemáticos diríamos que el riesgo se representa mediante una hipérbola equilátera en el espacio probabilidad-daño. En la Figura VII-2 se muestran varias curvas de iso-riesgo que inspiran los fines de la seguridad nuclear: por un lado, hacer el riesgo lo

Figura VII-2



Fuente: Elaboración propia

mínimo posible; por otro, lograrlo mediante la disminución de la probabilidad a valores excepcionalmente bajos para aquellos sucesos de consecuencias más graves. En cualquier caso, ha de notarse que no existe riesgo nulo, cualquiera que sea la actividad que estemos considerando.

Es decir, la energía nuclear es excepcionalmente segura, a pesar de suponer peligros potenciales, ostentando valores de riesgo clasificados como trivial (i.e., aquél que no merece medida alguna por parte de los individuos y/o la sociedad). Ahora bien, la opinión pública refleja que la percepción de ese riesgo no se atiene a la realidad.

GENERACIÓN II

Como se dijo anteriormente, se pueden diferenciar dos situaciones a la hora de hablar de seguridad nuclear: operación normal y accidente. En cualquiera de los casos, existen muchos indicadores que permiten evaluar cuantitativamente la seguridad en tales condiciones. Tal es el caso del número de fallos de barra, el factor de capacidad, las interrupciones imprevistas de operación, las dosis al público y las exposiciones colectivas a la radiación, en el primer caso; y de las frecuencias de daño al núcleo del reactor y de las liberaciones masivas de radiactividad, en el segundo.

En operación normal, el número de barras falladas autorizadas en el reactor es del 1%; actualmente, este indicador se halla por debajo del 0.005%.

Históricamente, si se representa la evolución del número de fallos de barras entre 1980 y 2007, se aprecia una reducción en 2007 al 30% de su valor en 1980. En cuanto al factor de capacidad (i.e., razón entre la energía generada durante el año y la máxima producible operando a plena potencia), se aprecia que desde 1990 (~77%) los niveles han crecido hasta alcanzar valores aproximados entre el 86% y el 88% en el lustro 2003-2007. Este crecimiento es consistente con la disminución registrada en el número de interrupciones imprevistas de operación, que aproximadamente se han reducido al 30% de las habidas al inicio de la década de los 90. De igual modo, la contribución de la producción de energía núcleo-eléctrica a la dosis de radiación recibida por el público es inferior al 0.4%, siendo las principales fuentes la presencia de radón en espacios cerrados poco ventilados (casi el 50%), la radiación terrestre y cósmica, las exposiciones médicas y la ingestión de algunos alimentos que contienen isótopos radiactivos. Por último, la serie temporal de la dosis recibida por los trabajadores de centrales de agua ligera profesionalmente expuestos demuestra una reducción de un factor 2,5, aproximadamente, respecto a los niveles en 1987.

La regulación nuclear impone valores máximos para la frecuencia de daño al núcleo (CDF, *Core Damage Frequency*) y la liberación masiva de radiactividad (LERF, *Lartge Early Release Fraction*), en caso de accidente. Teniendo en cuenta que actualmente existen 439 reactores operando en el mundo, la máxima frecuencia admisible de deterioro de un núcleo sería de 1 suceso cada 20-25 años; mientras que el escape masivo de radiactividad no podría suceder más frecuentemente que 1 vez cada 200-250 años. Sin embargo, si tomamos como ejemplo la central nuclear de Almaraz, los análisis probabilistas de seguridad han resultado en cifras inferiores a tales índices en más de un factor 20; es decir, si las centrales del mundo fueran igual de seguras que Almaraz, sería esperable daño en algún núcleo de los reactores existentes y escape desde alguna central cada 400-500 años y 4000-5000 años, aproximadamente.

Con objeto de lograr una percepción más allá de las cifras expuestas arriba, se puede comparar el riesgo nuclear con el que suponen otras actividades. Así, tomando como referencia la pérdida de expectativa de vida, se observa que mientras vivir al lado de una central nuclear supone estadísticamente una pérdida de unos 5-10 horas de vida, actividades como fumar, conducir o montar en bicicleta, suponen una pérdida aproximada de expectativa de vida 7000, 600 y 20 veces mayor, respectivamente. Si llevamos esta comparación al marco de la producción de energía eléctrica por distintas fuentes y escogemos el número de fallecimientos ocasionados por cada una entre 1970 y 1992, las cifras indican que la generación hidráulica, el carbón y el gas implicaron mas de 110, 40 y 10 veces más muertes por unidad de energía eléctrica producida que la generación nuclear.

Por tanto, se puede concluir que la mejora permanente de la Generación II de reactores ha hecho de su seguridad una característica sobresaliente.

SISTEMAS AVANZADOS

El buen funcionamiento de los reactores de segunda generación condujo a la adopción de muchos de sus fundamentos en la gestación de los sistemas avanzados de generación nuclear. En materia de seguridad, el principio básico heredado es el de “defensa en profundidad”. La idea implícita que los sustenta es el reconocimiento de que nada es perfecto. El sistema se proyecta para que opere correctamente, pero admitiendo que, a pesar de los esfuerzos y del conservadurismo y de la calidad en el diseño, podrían producirse desviaciones. Por ello, el propio sistema incluye mecanismos para la detección, control y corrección de posibles desviaciones. Aún más allá, el diseño se prepara para el confinamiento de la radiactividad incluso en el escenario más adverso imaginable, denominado habitualmente accidente base de diseño, y para ello se provee al sistema de salvaguardias capaces de garantizar la refrigeración estable del núcleo del reactor. Pero, incluso obviando tales sistemas y admitiendo el deterioro de las barreras que la propia envuelta de combustible y las tuberías y componentes del sistema de refrigeración suponen al escape radiactivo, el sistema se dota de una contención cuyo objetivo último sería evitar cualquier emisión al medio ambiente. Y, por último, si a pesar de todos los niveles de protección y barreras interpuestos entre radiactividad y entorno, ésta finalmente encontrara una vía de escape, se establecen planes de emergencia fuera y dentro de la central para hacer frente a estas contingencias.

Los sistemas de seguridad que integran cada uno de los niveles de protección descritos manifiestan tres características esenciales: redundancia, independencia y diversidad. Cualquier actuación de seguridad puede ser realizada, al menos, por dos sistemas (redundancia) que no comparten componente alguno (independencia) y cuyos mecanismos motrices son distintos (diversidad). Estas propiedades otorgan una fiabilidad extrema a los sistemas de seguridad de las centrales nucleares.

A la defensa en profundidad, los sistemas avanzados agregan otros principios. Unos, igualmente heredados de la generación anterior, como el ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*) o minimización de la dosis en cualquier actividad a desarrollar. Otros, más novedosos, como la consideración en el diseño de accidentes potencialmente más peligrosos que el propio accidente base de diseño; son los llamados accidentes severos.

Desde el punto de vista de la seguridad los sistemas avanzados de generación nuclear, pueden clasificarse como: evolutivos, pasivos e innovadores.

Los evolutivos (Generación III) se basan en la experiencia adquirida con la operación de los reactores de segunda generación, la evolución tecnológica lograda y el desarrollo de los análisis probabilistas de seguridad. La investigación realizada, particularmente a partir del accidente en la unidad 2 de *Three Mile Island*, ha dado lugar a la creación de modelos matemáticos capaces de simular escenarios accidentales más complejos que los propios derivados de situaciones de fallo único (accidente base de diseño). El tratamiento probabilista de estos análisis complementaría la aproximación determinista. Los pasivos (Generación III) suponen la utilización masiva de sistemas pasivos de seguridad, los cuales no requieren actuación humana, sino la concurrencia de fuerzas naturales omnipresentes en cualquier circunstancia, como la gravedad o las fuerzas de flotación. Su utilización supone una fuerte reducción de equipos y componentes, así como la garantía en algunos diseños de la condición segura del reactor durante períodos de hasta 3 días sin intervención alguna del operador. No obstante, su incorporación ha requerido demostrar su capacidad para ejercer eficazmente la función de seguridad encomendada, ya que los mecanismos motrices son en estos casos más débiles que los inducidos. Finalmente, los sistemas innovadores (Generación IV) están tratando de excluir los accidentes severos desde el propio diseño; es lo que se denomina “seguridad por diseño”.

Esta mejora de la seguridad de los sistemas avanzados sobre la de los reactores actuales se pone de manifiesto en los valores alcanzados por los indicadores discutidos anteriormente (i.e., CDF y LERF). Así, tanto en tecnologías BWR como PWR, no es extraño encontrar valores de estos índices menores que los actuales en más de un orden de magnitud. En otras palabras, la cuantificación actual del riesgo de estos reactores, permite estimar que la frecuencia en ellos de daño a núcleo o grandes liberaciones de radiactividad, acontecerían siempre con frecuencias inferior a 1 suceso cada 250 años y 2500 años, respectivamente. La siguiente Tabla ofrece valores característicos de CDF y LERF para sistemas nucleares de Generación II y III.

	<i>Sistemas en Ebullición</i>				<i>Sistemas a Presión</i>		
	<i>BWR-4</i>	<i>BWR-6</i>	<i>ABWR</i>	<i>ESBWR</i>	<i>PWR</i>	<i>EPR</i>	<i>AP1000</i>
<i>Potencia (MWe)</i>	1098	1360	1350	1550	1210	1600	1100
<i>CDF_{FOM} (r⁻¹.y⁻¹)</i>	<10 ⁻⁴		<10 ⁻⁵		<10 ⁻⁴	<10 ⁻⁵	
<i>CDF_{EXP} (r⁻¹.y⁻¹)</i>	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	2·10 ⁻⁷	3·10 ⁻⁸	8.4·10 ⁻⁵	1.3·10 ⁻⁶	5·10 ⁻⁷
<i>LERF_{EXP} (r⁻¹.y⁻¹)</i>	N.A.				4.9·10 ⁻⁶	8.4·10 ⁻⁸	6·10 ⁻⁸

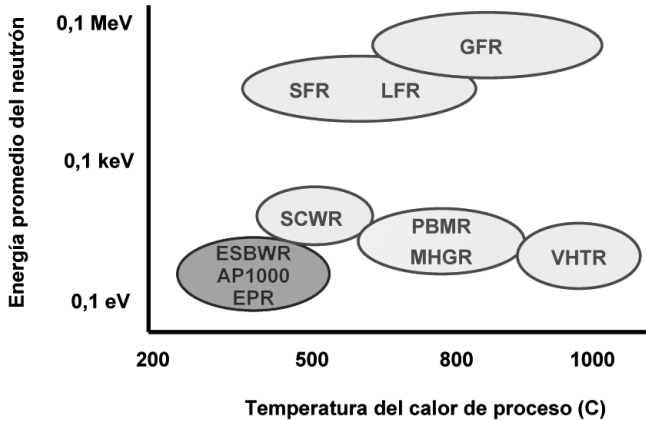
Fuente: Elaboración propia

Como ejemplo de la línea evolutiva, el diseño EPR (*European Pressurized Reactor*) de AREVA, logra esa notable reducción en las cifras de riesgo mediante el incremento de la redundancia en sistemas de seguridad (i.e., 4 trenes completamente independientes; 2 paredes de contención de, aproximadamente, 1 m de espesor cada una), la incorporación, incluso, de algunos sistemas de naturaleza pasiva y, no menos importante, la mejora de la interfaz hombre-máquina en sala de control. Como ejemplo de la línea pasiva podríamos citar el AP1000 (*Advanced Pressurized 1000*), donde además de la disminución ostensible en la cantidad de bombas, válvulas, longitud de conducciones, etc., cabe destacar el sistema pasivo de refrigeración de la contención que, mediante la condensación de vapor de agua sobre la superficie de la contención en régimen de circulación natural, mantiene la presión dentro de los límites de diseño.

En síntesis, se podría decir que las expectativas en niveles de seguridad de los reactores de Generación III son extraordinarias. Sin embargo, no disponemos, como en el caso de la Generación II, de la experiencia que las acredite, ya que sólo hay un número reducido de reactores de este tipo instalados en el mundo (Japón) y algunos en construcción (Finlandia, Francia, China, etc.).

La generación IV de sistemas nucleares plantea como objetivos de alto nivel: alcanzar niveles de excelencia en seguridad y fiabilidad, lograr frecuencias de daño al núcleo excepcionalmente bajas y eliminar la necesidad de plan de emergencia exterior. Sin necesidad de entrar en detalles específicos de sus diseños, al haber sido objeto de la presentación anterior, ha de enfatizarse su carácter revolucionario respecto a las dos generaciones anteriores en múltiples aspectos, algunos de los cuales se ilustran en la Figura VII-3. Por citar algunos ejemplos: la alta energía de los neutrones responsables de la reacción de fisión en el SFR (*Sodium Fast Reactor*), el LFR (*Lead Fast Reactor*) y el GFR (*Gas Fast Reactor*), que les confiere la denominación de sistemas reproductores (i.e., formación en reactor de más material combustible del que se consume durante la producción de energía); las elevadas temperaturas que alcanza el refrigerante a su paso por el reactor, ningún diseño por debajo de 500 °C y algunos postulando lograr los 1000 °C (VHTR, *Very High Temperature Reactor*); los ciclos avanzados de potencia de algunos de ellos, donde se analizan posibilidades tales como un Rankine supercríticos (SCWR, *Super-Critical Water Reactor*) o, incluso, ciclos de Brayton de muy elevada temperatura; la convivencia de combustible y refrigerante en la misma fase (sistemas homogéneos), como es el caso del MSR (*Molten Salt Reactor*). La diversidad y especificidad aconsejan tomar uno de estos sistemas como referencia para ilustrar los objetivos citados anteriormente. Sea, en este caso, el VHTR.

Figura VII-3



Fuente: Elaboración propia

Existen varias opciones de VHTR, pero todos ellos comparten características tales como tener baja potencia 400 y 600 MWt, utilizar un gas (habitualmente helio) como refrigerante o estar moderados por grafito. Entre las más relevantes en cuestiones de seguridad están la naturaleza, la configuración y la disposición del combustible en el reactor.

La esencia del combustible VHTR son las denominadas partículas TRISO. En ellas, esferas de 0.5 mm de diámetro de óxido de uranio enriquecido (entre 6 y 20%, según diseños), están recubiertas por 3 capas de distintos compuestos de carbono que actúan a modo de contención. Miles de estas partículas (unas 15000 en el prototipo PBMR en diseño en la República de Sudáfrica) se embeben en una matriz esférica de grafito del tamaño aproximado de una bola de billar (5-6 cm de diámetro). Sometidas a pruebas para analizar los fallos cometidos en su fabricación, y las dañadas por irradiación o alta temperaturas, los resultados fueron espectaculares: de más de 3 millones de ensayos, sólo se detectaron 100 fallos en su fabricación; en unos 300000 ensayos de irradiación, hubo sólo 4 fallos; y no se pudo encontrar fallo alguno en estas partículas, siempre que su temperatura se mantenga por debajo de 1600 °C (a unos 2300 °C se detectó el fallo de una de estas partículas). Pues bien, los sistemas VHTR se diseñan de tal modo que, incluso si todo el helio refrigerante escapara del sistema en caso de accidente y no hubiera refrigeración convectiva, conducción y radiación serían suficientes para que las partículas TRISO no excedieran 1400 °C (en condiciones normales las temperaturas se mantendrían en torno a los 1000 °C). Por tanto, estos diseños parecen asegurar la exclusión de escenarios con fusión del núcleo, hecho que la investigación en curso habrá de demostrar experimental y analíticamente.

A estas peculiaridades descritas del combustible que derivan en la exclusión de escenarios con grave deterioro del núcleo, se unen otras no menos importantes. Así, el uso de helio como refrigerante (gas noble), elude cualquier posible interacción con materiales del sistema; ello implica la ausencia de corrosión y, con ella, de generación de hidrógeno (gas potencialmente explosivo), como ocurriría en los reactores de generación II y III en caso de producirse un accidente severo. Otra característica no menos relevante es la gran inercia térmica del reactor, consecuencia de su alta conductividad efectiva y capacidad calorífica, que le permite una variación moderada y progresiva de temperatura; el uso de enormes cantidades de grafito en el núcleo está directamente vinculado a este comportamiento.

Por último, un tema controvertido es la disyuntiva planteada entre contención y confinamiento. Existen argumentos a favor de que, incluso en caso de accidente, la emisión de radiactividad al medio ambiente estaría muy por debajo de los límites permitidos, dado que en ningún caso se alcanzarían temperaturas en el núcleo que condujeran al deterioro masivo de partículas TRISO. Por otro, el edificio de contención ha sido siempre una garantía de seguridad.

Éstas y otras características del diseño de reactor eliminarían la necesidad de establecer medidas de seguridad exterior al emplazamiento, tales como la evacuación. De modo que el quinto nivel de protección que integra el principio de defensa en profundidad desaparecería, siempre que se demuestre taxativamente su dispensabilidad.

En resumen, la Generación IV podría alcanzar un *cum laude* en seguridad si su aproximación se demuestra veraz y viable. La investigación a realizar en los próximos 20-30 años habrá de dar cuenta de ello.

CONCLUSIONES

El principio fundamental de la seguridad nuclear, “Defensa en profundidad”, permanece vigente en los sistemas avanzados y se refuerza mediante: la experiencia acumulada y los análisis probabilistas de seguridad (sistemas evolutivos), las salvaguardias pasivas (sistemas pasivos) y el propio diseño (sistemas innovadores).

En cuanto a la Generación II, su seguridad ha alcanzado niveles encoiables que se han de mantener; sin duda alguna, la investigación ha sido y sigue siendo imprescindible para su mejora continua.

La Generación III mejora los niveles de seguridad alcanzados por la Generación II en órdenes de magnitud, considerando ya en su diseño sistemas y características específicamente diseñados para hacer frente a situaciones esperables en caso de accidente severo. La inclusión de sistemas

pasivos de seguridad ha supuesto un avance extraordinario en la concepción de sistemas de seguridad y ha exigido un volumen de investigación sobresaliente.

Finalmente, la Generación IV, cuya llegada se prevé en 2-3 décadas, supone una revolución en materia de seguridad tanto en planteamiento como en niveles. La exclusión por diseño de determinados escenarios accidentales podría simplificar, incluso, los niveles de protección que configuran el concepto de “Defensa en profundidad”. No obstante, la investigación habrá de demostrar su veracidad y viabilidad con extremo rigor.

CAPÍTULO VIII
LOS NUEVOS PRINCIPIOS FUNDAMENTALES
DE SEGURIDAD DEL OIEA

Agustín Alonso
Prof. Emérito
UPM

INTRODUCCIÓN

El desarrollo nuclear de los países y la utilización de las radiaciones ionizantes requiere la consideración de aspectos sociales, entre los que sobresalen: la seguridad nuclear de las instalaciones, la protección radiológica de los individuos, la gestión de los residuos radiactivos y el transporte de materiales radiactivos. Los cuatro aspectos mencionados tienen historias y desarrollos reglamentarios y normativos separados, pero se basan en principios comunes que el Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA, ha definido en un documento publicado en 2007, con el título **Principios fundamentales de seguridad** [1], que forma parte de la Colección Seguridad del OIEA, N° SF-1, documento que es el objetivo de esta presentación.

EL RÉGIMEN REGLAMENTARIO DEL OIEA

El OIEA tiene la responsabilidad estatutaria de redactar normas para la utilización segura de las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear y las radiaciones. Esta actividad reglamentaria ha sido tradicionalmente una de las más significativas del Organismo. En el momento actual tiene en marcha desde 1995 un programa de desarrollo normativo en el campo de la

seguridad nuclear, la seguridad radiológica, la seguridad en la gestión de los residuos radiactivos y el transporte de materiales radiactivos. Los documentos normativos publicados por el OIEA no son de obligado cumplimiento, sino la referencia para que los Estados Miembros construyan su propia pirámide normativa nuclear.

El OIEA ha establecido tres tipos de documentos que titula: Nociones (o principios) fundamentales; Requisitos y Guías de seguridad. Las Nociones incluyen principios fundamentales que se espera sean aceptados por todos los países; de hecho, están ya siendo utilizados en los países emergentes y tendrán que ser considerados en el perfeccionamiento normativo de los países más adelantados, como España. Los Requisitos desarrollan los principios: también se espera que sean aceptados en lo esencial y adaptados a las peculiaridades jurídicas de cada país. Las Guías de seguridad constituyen ejemplos de cómo es posible satisfacer los requisitos específicos. El proceso lógico consiste en redactar, en primer lugar, las Nociones (o principios) Fundamentales, seguidos de los Requisitos y estos de las Guías de Seguridad. En esta nueva etapa, el OIEA publicó primero (1993) las Nociones Fundamentales de Seguridad de Instalaciones Nucleares [2], seguido (1995) de las Nociones Fundamentales sobre Gestión de Residuos Radiactivos [3] y de las Nociones Fundamentales de Protección Radiológica y Seguridad de Fuentes Radiactivas [4]. Los requisitos establecidos para el transporte seguro se basaban en los principios de seguridad y protección.

Pronto se observó que los principios de seguridad nuclear, de protección radiológica y de gestión de residuos radiactivos eran técnicamente compatibles, si bien se habían expresado de forma diferente. Surgió así el deseo de unificar todos los principios en un solo conjunto, el trabajo comenzó en 2000 y se completó después de seis años de trabajo. El texto se elaboró tratando de lograr un amplio consenso internacional para tener la garantía de que los Principios fundamentales de seguridad se respetarían en todos los Estados Miembros del OIEA. La versión española fue publicada en 2007. El documento establece un objetivo de seguridad que desarrolla en diez nuevos principios, igualmente aplicables a la seguridad nuclear, la protección contra las radiaciones ionizantes, la gestión de los residuos radiactivos y el transporte de materiales radiactivos.

La importancia fundamental de los Principios Fundamentales que se glosan reside en su amplia aceptación, que incluye a la Comunidad Europea de la Energía Atómica (EURATOM), la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la Organización Internacional del Trabajo (OIT), la Organización Marítima Internacional (OMI), la Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (AEN/OCDE), la Organización Panamericana de la

Salud (OPS), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), todas ellas organizaciones patrocinadoras del documento, circunstancia que constituye el pilar de lo que se ha dado en llamar **régimen global de seguridad del OIEA**.

Los documentos que elabora el OIEA tienen una enorme precisión lingüística y gramatical. Con el fin de no introducir ambigüedades y evitar las interpretaciones subjetivas, las palabras y términos utilizados en el texto deben interpretarse tal como se definen y explican en el Glosario de Seguridad del OIEA (<http://www-ns.iaea.org/standards/safety-glossary.htm>) [5] en el que se ha armonizado el uso en las distintas esferas temáticas y, en la medida de lo posible, se ha tratado de mantener la coherencia. Se recomienda el uso de tal glosario, y de la versión española que ha completado la Comisión de Terminología de la Sociedad Nuclear Española, con el fin de consolidar una terminología adecuada y precisa. Se ha de observar, sin embargo, que la utilización por el OIEA del vocablo desecho no es admitido en la terminología española que ha preferido el vocablo residuo.

El Documento utiliza la expresión “*riesgos asociados a las radiaciones*” para referirse a: los riesgos para la salud derivados de una exposición a la radiación, supuesta que esta exposición es cierta, y los riesgos para la salud derivados de un escenario accidental que tenga consecuencias radiológicas. El primer caso es propio de la protección contra las radiaciones ionizantes –como es sabido el riesgo de contraer una enfermedad somática o genética es una función de naturaleza probabilista de la dosis y de la tasa de dosis recibida. El segundo caso es propio de la seguridad de una instalación o de una actividad e incluye, en primer lugar, la probabilidad de que aparezca un escenario accidental que produzca exposiciones a la radiación, de las cuales se deduce, en segunda instancia, la probabilidad de que aparezcan daños somáticos y genéticos como en el caso anterior. Por ello, la seguridad es más amplia que la protección contra las radiaciones que es una de sus partes.

OBJETIVO DE LA SEGURIDAD

El documento especifica que:

“El objetivo fundamental de la seguridad es proteger a las personas y el medio ambiente contra los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes”.

La protección de las personas es un objetivo obvio, admitido desde el principio, no así la protección del medio ambiente, que inician los movi-

mientos ecologistas de los años setenta y que ha crecido de forma significativa desde entonces, hasta hacerse tanto o más importante, incluso desde el punto de vista normativo, que la protección de los individuos y de la sociedad. Un documento que está siendo esencial en el proceso regulador es el **Informe sobre el Impacto ambiental** de las instalaciones y actividades nucleares sin que exista un documento comparable sobre el impacto social de tales instalaciones y actividades. De hecho, la Comisión Internacional de Protección Radiológica, CIPR, comenzó a considerar el medio ambiente en la década de los años 90. Al principio se estimó que protegido el hombre quedaban también protegidas la fauna y la flora, pero esta hipótesis tiene que ser demostrada y en ello se está invirtiendo un esfuerzo considerable, a veces superfluo.

En el texto explicativo asociado a este principio se indica que la satisfacción del objetivo debe respetar y considerar los múltiples beneficios que cabe esperar del uso de las radiaciones y de la energía nuclear y añade que el objetivo fundamental de la seguridad debe alcanzarse *“sin restringir indebidamente la explotación de las instalaciones o la realización de actividades que sean fuente de riesgos asociados a las radiaciones”*. Cabe utilizar aquí la expresión utilitarista **“la seguridad es un deber y el beneficio una necesidad”**.

Para garantizar el objetivo propuesto es preciso ejercer tres actividades básicas:

- a) controlar la exposición de las personas a las radiaciones y la liberación de material radiactivo al medio ambiente;
- b) prevenir escenarios accidentales en las instalaciones nucleares y radiactivas o en cualquier otra fuente de radiación;
- c) mitigar las consecuencias de esos sucesos, cuando se produzcan.

PRINCIPIOS DE SEGURIDAD

El Documento formula diez principios de seguridad, que constituyen la base para elaborar los requisitos que definan las medidas pertinentes que deben ser aplicadas para alcanzar el objetivo fundamental de la seguridad. Los principios de seguridad forman un conjunto que se aplica en su totalidad a todo tipo de instalaciones y actividades nucleares y radiactivas de las que se deriven riesgos asociados a las radiaciones. En la práctica, aunque todos los principios deban ser considerados, su importancia es función de la instalación o de la actividad en consideración. En estas consideraciones se pone énfasis en las centrales nucleares y en las instalaciones del correspondiente ciclo del combustible.

*** Principio 1: Responsabilidad de la seguridad**

“La responsabilidad primordial de la seguridad debe recaer en la persona u organización a cargo de las instalaciones y actividades que generan riesgos asociados a las radiaciones”.

La asignación de la responsabilidad primordial –la que está en primer lugar– se hace constar formalmente en la autorización de la instalación o de la actividad solicitada y no puede ser transferida. Tal autorización va acompañada de requisitos generales y específicos que el titular debe cumplir. El titular está también legalmente obligado a suscribir una póliza de seguro contra riesgos radiológicos a terceros y los propios estados han establecido y suscritos convenios internacionales específicos para tal fin.

Otros agentes que participen en la instalación o actividad, tales como diseñadores, fabricantes, suministradores, constructores o contratistas tienen también responsabilidades derivadas o secundarias que se hacen constar en los contratos correspondientes y que suelen estar amparadas por decisiones gubernamentales y convenios internacionales. Los propios organismos reguladores son también responsables de sus actividades de acuerdo con los estatutos correspondientes.

Por lo general, la responsabilidad de los titulares se encuentra bien definida, pero no lo está la de los otros agentes que se mencionan. La gestión de los desechos radiactivos crea problemas especiales por abarcar muchas generaciones humanas. La responsabilidad de la disposición definitiva de residuos radiactivos requiere también la vigilancia institucional, así como la realización de posibles operaciones del futuro. En el caso de España, la responsabilidad de Enresa está bien definida hasta el cierre de sus instalaciones, mientras que la responsabilidad de las actividades posteriores al cierre no se ha definido aún con precisión.

*** Principio 2: Función del gobierno**

“Debe establecerse y mantenerse un marco de seguridad jurídico y gubernamental eficaz, que incluya un órgano regulador independiente”.

Como en el caso de cualquier otra actividad que genere riesgos, *“el gobierno es responsable de adoptar, en su ordenamiento jurídico nacional, la legislación, reglamentación y demás normas y medidas que puedan ser necesarias para el cumplimiento efectivo de todas sus responsabilidades nacionales y obligaciones internacionales, y de establecer un órgano regulador independiente”*; además, en el caso de los residuos radiactivos, el gobierno es responsable de definir la disposición final de los residuos ra-

diactivos. La ley 25/64 sobre energía nuclear, enmendada en varias ocasiones, y sus desarrollos reglamentarios, así como la ley 15/80, de creación del Consejo de Seguridad Nuclear, también enmendada recientemente, constituyen un conjunto reglamentario básico satisfactorio. Aún falta disponer de una ley específica sobre la gestión de los residuos radiactivos que considere, en especial, la disposición final de los residuos de elevada actividad específica y vida larga.

Una de las responsabilidades más significativas de los gobiernos es la creación de un organismo de control que pueda tomar decisiones independientes de toda influencia indebida. Estos organismos, el Consejo de Seguridad Nuclear en el caso español, no tienen las atribuciones de un tribunal de justicia, pero si parte de tal carácter, en el sentido de que el gobierno requiere el informe mandatario y vinculante del organismo antes de tomar decisiones específicas y reglamentadas. Los organismos de control tienen tres responsabilidades fundamentales.

- a) Desarrollar y proponer un conjunto satisfactorio y completo de leyes, reglamentos, requisitos, instrucciones y guías de seguridad. La pirámide normativa española sobre residuos radiactivos no se ha desarrollado de forma específica y, de momento, queda en parte embebida en la normativa general.
- b) Verificar el cumplimiento de la legislación aplicable, general y específica, a instalaciones y actividades de los que se deriven riesgos asociados a las radiaciones, a través de la evaluación de las propuestas formuladas por los titulares y la inspección. También son responsables del control y la vigilancia radiológica ambiental y la vigilancia de la salud pública potencialmente afectada por las radiaciones.
- c) Corregir cualquier desviación que se produzca en el cumplimiento de la normativa aplicable, tanto si es inadvertida como voluntaria, a través de un sistema de vigilancia y un procedimiento sancionador. En el caso español, el Consejo de Seguridad Nuclear tiene la obligación de denunciar las anomalías encontradas y proponer las sanciones que procedan de acuerdo con un sistema reglado.

*** Principio 3: Liderazgo y gestión en pro de la seguridad**

“Deben establecerse y mantenerse un liderazgo y una gestión que promuevan eficazmente la seguridad en las organizaciones que se ocupan de los riesgos asociados a las radiaciones, y en las instalaciones y actividades que los generan”.

El titular de una instalación o de una actividad que genere riesgos asociados a las radiaciones debe crear y mantener una organización responsable de la seguridad que comience en los más altos niveles de la organización e incluya un sistema de gestión eficaz. La experiencia ha demostrado que el principio se puede cumplir de forma satisfactoria promoviendo una cultura de la seguridad, estableciendo un programa sistemático de formación del personal y practicando la retroalimentación de la experiencia de la propia instalación o actividad y de otras instalaciones o actividades comparables.

El concepto **cultura de la seguridad** nació como consecuencia del accidente de Chernobyl-4 en abril de 1986. Las autoridades soviéticas decidieron en agosto de dicho año presentar ante el OIEA un análisis de las causas y consecuencias del accidente. Después de esta confesión pública, los expertos occidentales dictaminaron que las causas del accidente se encontraban en la falta de cultura de la seguridad en la explotación de las centrales nucleares soviéticas. Una cultura de la seguridad abarca lo siguiente:

- “a) Un compromiso individual y colectivo respecto de la seguridad por parte de los dirigentes, la administración y el personal en todos los niveles;*
- b) la rendición de cuentas de las organizaciones y personas de todos los niveles en lo que concierne a la seguridad;*
- c) medidas que estimulen una actitud inquisitiva y de aprendizaje y que desalienten la autocomplacencia en lo que respecta a la seguridad”.*

La experiencia ha demostrado que los errores humanos contribuyen más que los fallos técnicos a la aparición de sucesos notificables, incidentes e incluso accidentes. Por ello es necesario disponer de un programa de **formación sistemática** tanto del personal con licencia, como de otro tipo de personal que trabaje en una instalación o realice actividades que supongan un riesgo de irradiación. Las recientes Instrucciones del Consejo IS-11 y IS-12, contemplan este importante aspecto.

La experiencia ha demostrado que la **retroinformación** sobre la experiencia operacional en las instalaciones y actividades es un medio fundamental para mejorar la seguridad. Por esta razón, los titulares de las instalaciones deben establecer procedimientos para analizar, documentar y compartir la experiencia operativa de su instalación o actividad análoga. El propio OIEA ha establecido, desde antiguo, un Sistema de Información sobre Incidentes en instalaciones y en actividades.

* Los tres principios de la radioprotección

La protección contra las radiaciones ionizantes se ha basado en tres principios de la ética utilitaria que preconizara el filósofo inglés Jeremy Bentham (1748-1832): la **justificación**, la **optimación** y la **limitación**, que han de aplicarse de forma conjunta. Los principios reconocen que toda dosis de radiación supone un riesgo para la salud; por ello, se preconiza la justificación de toda actividad que genere riesgos radiológicos por los beneficios que proporcione. Además, exige que las dosis inevitables que puedan recibir los usuarios sean tan pequeñas como sea razonablemente posible teniendo en cuenta los aspectos económicos y sociales a través de un proceso de optimación. En todo caso se añade que es necesario establecer la limitación de que las dosis previsibles no sean superiores a las dosis máximas permisibles. En el nuevo documento se amplía el alcance de estos tres principios fundamentales.

** Principio 4: Justificación de las instalaciones y actividades

“Las instalaciones y actividades que generan riesgos asociados a las radiaciones deben reportar un beneficio general”.

Este principio tiene su origen en la publicación 60, y reiterada en la publicación 103, de la Comisión Internacional de Protección Radiológica, CIPR, “...any decision that alters the radiation exposure situation should do more good than harm...”, que fue tomada por el Consejo de la Unión Europea en su Directiva 96/29/EURATOM y transpuesta a la legislación española en el Reglamento sobre Protección sanitaria contra radiaciones ionizantes [6]. El art.4 especifica: “*Toda nueva clase o tipo de práctica incluida en el presente Reglamento deberá ser justificada por el promotor de la misma ante la autoridad competente...*”; sin embargo, el reglamento no incluye de forma específica a las centrales nucleares, art. 2, y no define la autoridad competente a cada caso, tampoco el Reglamento ha sido completado con instrucciones o guías de seguridad complementarias.

El principio exige que las instalaciones y actividades puedan considerarse justificadas, si los beneficios individuales, sociales y medioambientales que reporten superan los riesgos asociados a las radiaciones a que den lugar. Se trata de resolver la inecuación

beneficio > riesgo.

La aplicación práctica de este principio requiere el establecimiento de una misma unidad de cuantificación, que no ha sido todavía considerada

con detalle. En el caso de las aplicaciones médicas de la radiación, la evaluación, no cuantitativa, sino estimada, la debe realizar el paciente con las ayudas médicas y psicológicas apropiadas. En otros casos sencillos, generalmente relacionados con fuentes radiactivas y generadores de radiación, la comparación se realiza utilizando unidades monetarias, lo que requiere dar un valor económico a la dosis de radiación.

Cuando el riesgo que importa se asocia a una gran instalación o actividad, la comparación resulta muy difícil. La decisión de introducir en un país la energía nuclear para la generación eléctrica, por ejemplo, requiere la decisión del gobierno, quien en la partida de los beneficios debe manejar conceptos pobremente cuantificables, como la independencia energética del país; otros más asequibles, como el impacto sobre el medio ambiente y el cambio climático, y otros cuantificables en términos monetarios, como los aspectos económicos. En el lado de los riesgos será necesario conocer el impacto radiológico de los efluentes radiactivos durante la operación normal, así como las consecuencias radiológicas en caso de accidente. El primero es un proceso complejo que supone la medida de tales efluentes y la estimación teórica de sus consecuencias. El segundo, mucho más difícil, requiere el conocimiento de la frecuencia esperada de los accidentes y las repercusiones radiológicas sobre las personas y el medio, así como sociales y económicas, como se contemplan en el nivel 3 de los estudios probabilistas de seguridad, que sólo se han practicado de forma genérica.

La inecuación representa la diatriba actual entre los defensores de la energía nuclear, quienes resaltarán los beneficios, y los que se oponen poniendo énfasis en los riesgos. Es también la discusión entre los expertos, que nunca negarán los riesgos nucleares, y los no entendidos, que elevarán los riesgos a la categoría de certezas. Nada nuevo en la historia de la sociedad, una circunstancia similar existió en la discusión platónica entre la *doxa*, o conocimiento terrenal basado en los sentimientos y el *epísteme*, o conocimiento profundo basado en el raciocinio; también es equivalente a la diatriba de la Edad Media entre estoicos-racionalistas-y místicos-espirituales.

El principio reconoce la importancia de la justificación, pero en ningún modo desarrolla la metodología. En los países nórdicos, esencialmente Suecia y Finlandia, ha primado la información y larga discusión social y política con resultados positivos; mientras que en otros, fundamentalmente Francia, país cartesiano, ha dominado el criterio de los expertos. En otros países, fundamentalmente Italia, Alemania y España, después de un desarrollo nuclear excepcional, ha predominado el criterio de los sentimientos; mientras que en otros, EE.UU. y Reino Unido, el desarrollo nuclear se ha supeditado a los criterios económicos. El criterio es esencial, pero requiere

un desarrollo legislativo y normativo profundo, que sólo se ha iniciado en estos últimos países.

**** Principio 5: Optimización de la protección**

“La protección debe optimizarse para proporcionar el nivel de seguridad más alto que sea razonablemente posible alcanzar”.

El principio exige que *“las medidas de seguridad aplicadas en las instalaciones y actividades que generan riesgos asociados con las radiaciones se consideren optimizadas si proporcionan el nivel de seguridad más alto que sea razonablemente posible alcanzar a lo largo de toda la vida útil de la instalación o la duración de la actividad, sin limitar indebidamente su utilización”.* En realidad se trata de ampliar el concepto ALARA de la protección, de cuantificación fácil si se da un valor monetario a dosis de radiación evitada por una medida de protección de un coste determinado. La US NRC ha decidido, para tales fines, dar un valor de 2000\$/rem.

El criterio ampliado requiere un mayor esfuerzo; en realidad es necesario obtener el valor mínimo de la función

$$\min.<F(r_1, r_2, \dots, r_n)>,$$

en la que deben incluirse todos los riesgos r_n asociados al problema en cuestión. La reciente crisis canadiense relacionada con el suministro de Mo-99 reveló que el riesgo social asociado a mantener parado el reactor NRU era mucho mayor que el riesgo asociado con el funcionamiento del reactor sin cumplir un requisito de seguridad menor. En este momento, el arranque de las centrales nucleares paradas en Bulgaria y en Eslovaquia como requisito para formar parte de la Unión Europea probablemente supondría un riesgo social menor que la indisponibilidad de gas natural que están sufriendo dichos países. Este tipo de análisis no se ha hecho de forma cuantitativa, pero si se ha expresado de forma emocional.

**** Principio 6: Limitación de los riesgos para las personas**

“Las medidas de control de los riesgos asociados a las radiaciones deben garantizar que ninguna persona se vea expuesta a un riesgo de daños inaceptable”.

En protección contra radiaciones ionizantes la limitación de las dosis ha constituido el esfuerzo principal de la Comisión Internacional de Protección Radiológica desde su creación. El nuevo principio extrapola esta situa-

ción al caso de la seguridad de las instalaciones y las actividades; en este caso la seguridad es cuantificada mediante el concepto complementario de riesgo. Indica que las instalaciones y las actividades no deben ocasionar dosis superiores a los límites establecidos, ni superar riesgos previamente fijados. Los reglamentos y normas de protección contra las radiaciones ionizantes incluyen valores concretos de las dosis límites aceptadas universalmente para una variedad de situaciones.

Sin embargo, no existen tales límites para el caso de los riesgos radiológicos-frecuencias esperadas de accidentes y consecuencias de los mismos. El principio exige también que no sólo se deban satisfacer el principio de la justificación y la optimación, sino que además los riesgos asociados no deberían superar un valor aceptable. Esta circunstancia obliga también a un desarrollo posterior de este principio.

*** Principio 7: Protección de las generaciones presentes y futuras**

“Deben protegerse contra los riesgos asociados a las radiaciones las personas y el medio ambiente del presente y del futuro”.

Los riesgos asociados a las radiaciones de instalaciones y actividades de un país en un momento determinado pueden afectar al propio país y a otros países en el presente y en el futuro. Estos riesgos pueden provenir de vertidos radiactivos en circunstancias normales o en caso de accidente. En el primer caso los vertidos han de estar limitados y vigilados. En el segundo es necesario establecer procedimientos para restaurar la habitabilidad de los terrenos contaminados. Las operaciones realizadas para controlar las contaminaciones producidas por el accidente de Chernobyl-4 constituyen el paradigma más representativo. Por ello, el principio exige que no sólo haya que proteger en el presente y en el futuro a los habitantes y al medio ambiente del país propietario, sino que también hay que proteger a los países potencialmente afectados.

La disposición definitiva de los residuos sólidos es otra de las causas que pudiera ocasionar riesgos a las generaciones futuras si tal disposición no se comporta de la forma prevista. El documento añade: *“Cuando los efectos puedan abarcar a más de una generación, las generaciones siguientes deben quedar adecuadamente protegidas sin que tengan que adoptar ninguna medida de protección importante”.* Ello exige que las generaciones que producen los desechos deban encontrar y aplicar soluciones seguras, viables y ambientalmente aceptables para su gestión a largo plazo de modo que no se imponga una carga indebida a las generaciones futuras. Sin embargo, no se cuantifica qué se entiende por medida de protección importante o carga indebida.

Como en casos anteriores, las cuantificaciones precisas de magnitudes sólo indicadas han de ser objeto de desarrollo específico posterior. Una medida siempre utilizable es producir la cantidad mínima posible de residuos mediante técnicas de reciclado y reutilización de los materiales. Esto tiene una importancia extraordinaria en el caso de los elementos combustibles irradiados en los reactores nucleares. Para ellos, la mejor gestión es el reciclado del material y la transmutación de los isótopos de vida larga.

* Principio 8: Prevención de accidentes

“Deben desplegarse todos los esfuerzos posibles para prevenir los accidentes nucleares o radiológicos y para mitigar sus consecuencias”.

Para prevenir accidentes con consecuencias radiológicas se introdujo desde el principio el concepto de seguridad a ultranza o defensa con profundidad. Ésta consiste fundamentalmente en disponer de niveles de protección consecutivos e independientes que tendrían que fallar de forma sucesiva o simultánea antes de que se produjeran efectos nocivos para las personas o el medio ambiente. La independencia garantiza que el fallo de un

Tabla 1
La matriz de la seguridad a ultranza

Niveles	Objetivo	Medios
Nivel 1	Prevención de fallos y comportamientos anormales	Diseños redundantes y conservadores, elevada calidad en la construcción y explotación rigurosa
Nivel 2	Detección de fallos y control del funcionamiento anormal	Inclusión de sistemas de control, protección y vigilancia diseñados de acuerdo con criterios de seguridad
Nivel 3	Control de los accidentes base del proyecto	Incorporación de salvaguardias tecnológicas y procedimientos de operación de emergencia diseñados con criterios de seguridad
Nivel 4	Control de los accidentes graves que superen las bases de proyecto	Adición de salvaguardias tecnológicas específicas y previsión de la gestión integral de los accidentes graves
Nivel 5	Mitigación de las consecuencias radiológicas de los escapes radiactivos	Establecimiento de un plan de emergencia radiológica de acuerdo con criterios de protección universales

nivel de protección no implica el fallo del siguiente nivel que cumpliría con la función asignada. La seguridad a ultranza garantiza que ningún fallo humano o técnico pueda, por sí solo, causar accidentes y que sólo combinaciones muy poco probables de fallos pudieran dar lugar a accidentes con efectos radiológicos. La Tabla 1 representa la esencia de la seguridad a ultranza.

El concepto de la seguridad a ultranza debe ser también aplicado a los reactores de la generación IV y desarrollado en requisitos y guías precisos. A pesar de los esfuerzos realizados no ha sido aún posible establecer tales requisitos.

*** Principio 9: Preparación y respuesta en casos de emergencia**

“Deben adoptarse disposiciones de preparación y respuesta para casos de incidentes nucleares o radiológicos”.

“El titular de la licencia, el órgano regulador y las dependencias competentes del gobierno deben adoptar, de antemano, disposiciones de preparación y respuesta para casos de emergencia nuclear o radiológica en el lugar de los hechos, en los planos local, regional y nacional y, cuando así lo acuerden los Estados, a nivel internacional”.

En la normativa nacional, por lo general se requiere que el titular establezca un plan de emergencia interior y contribuya a la preparación del plan de emergencia exterior a la central. El plan de emergencia exterior requiere la respuesta de los servicios de protección civil de la nación y la actuación de las autoridades locales, nacionales y regionales. Las autoridades de los países limítrofes tienen el derecho a recibir información a fin de poner en marcha sus propios sistemas de protección de la población en caso de emergencia. Además, aquellos Estados Miembro del OIEA que hayan suscrito la **Convención sobre la pronta notificación de accidentes nucleares**, están obligados a comunicar tal situación al OIEA. Todos estos requisitos han sido bien contemplados en la legislación española.

Las instalaciones y actividades relacionadas con la gestión de residuos radiactivos deben también disponer de un plan de emergencia que cubran también cualquier contingencia durante el transporte y las operaciones de almacenamiento. La disposición final de los residuos radiactivos, tanto superficiales como geológicas, no requieren planes de emergencia, ya que no cabe la aparición de escenarios accidentales. Si en el caso de los almacenamientos superficiales se produjese la liberación de productos radiactivos, en caso de deterioro de las barreras técnicas y geológicas, ésta sería en todo caso lenta y se podría detectar a través del sistema de vigilancia insti-

tucional. No cabe tal posibilidad en el caso de los almacenamientos geológicos. En todo caso, este requisito no ha sido aún contemplado con suficiente detalle.

*** Principio 10: Medidas protectoras para reducir los riesgos asociados a las radiaciones existentes o no reglamentados**

“Las medidas protectoras para reducir los riesgos asociados a las radiaciones existentes o no reglamentados deben justificarse y optimizarse”.

El principio contempla, por vez primera, tres casos de interés:

- 1) La exposición a las fuentes de radiación naturales, especialmente el radón en viviendas y en lugares de trabajo; o en operaciones mineras o químicas, como es el caso de los llamados fosfo-yesos, e incluso en los materiales de construcción de viviendas en los que se utilicen cenizas de la combustión de carbones ricos en uranio o en torio. Los códigos de la construcción de los países avanzados incluyen requisitos para reducir los riesgos de radiación a causa del radón.
- 2) La exposición ocasionada por actividades humanas del pasado que nunca se sometieron a control reglamentario, o que se sometieron a un régimen de control menos riguroso. Muchos laboratorios de investigación, reactores experimentales y plantas piloto de los primeros años del desarrollo nuclear han quedado seriamente contaminados y requieren una descontaminación. En España el Proyecto PIMIC trata de descontaminar algunos laboratorios e instalaciones de la antigua Junta de Energía Nuclear, ahora Ciemat. En muchos países las antiguas explotaciones de minerales radiactivos han dejado también situaciones que están siendo remediadas.
- 3) La exposición remanente que puede quedar en los terrenos y sistemas hídricos contaminados en caso de accidente con liberación de productos radiactivos al medio ambiente. El caso más significativo se encuentra hoy en los terrenos contaminados como consecuencia del accidente de Chernobyl-4. En España, el caso más substancial fue la contaminación de los ríos Manzanares y Jarama por el escape de residuos líquidos procedentes de la planta piloto de reelaboración M-1 de la antigua Junta de Energía Nuclear en noviembre de 1970, que requirió la confiscación de cosechas vegetales y la limpieza de los canales de riego afectados. Más recientemente, la fusión de una fuente de cesio-137 en la planta de Acerinox en Algeciras requirió la des-

contaminación de las instalaciones con la producción de cantidades sustanciales de residuos de baja y muy baja radiactividad.

En todos estos casos, las medidas protectoras que se pueden adoptar tienen costos económicos, sociales y ambientales, a veces muy elevados, y pueden entrañar ciertos riesgos asociados a las radiaciones, como ha ocurrido con los llamados liquidadores del accidente de Chernobil-4. Otras veces el problema a resolver es de poca importancia, en tales casos las medidas protectoras se consideran justificadas sólo si los beneficios obtenidos son superiores a los riesgos asociados a la situación y a la aplicación de los remedios.

CONCLUSIONES

Primera. El desarrollo nuclear de los países y la utilización de las radiaciones ionizantes requiere la consideración de aspectos sociales, entre los que sobresalen: la protección radiológica de los individuos, la sociedad y el medio ambiente; la seguridad nuclear de las instalaciones; la gestión de los residuos radiactivos, y el transporte de los materiales radiactivos. Los cuatro aspectos mencionados tienen historias y desarrollos distintos, pero se basan en principios comunes que el Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA, ha definido en un documento publicado en 2007, con el título **Principios fundamentales de seguridad**.

Segunda. El objetivo fundamental de la seguridad es proteger a las personas y el medio ambiente contra los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes. El objetivo fundamental de la seguridad debe alcanzarse “sin restringir indebidamente la explotación de las instalaciones o la realización de actividades que sean fuente de riesgos asociados a las radiaciones”.

Tercera. Los Principios Fundamentales de la Seguridad formulan diez proposiciones, que constituyen la base para elaborar los requisitos y guías de seguridad que definan las medidas pertinentes que deben ser aplicadas para alcanzar el objetivo fundamental de la seguridad. Los principios de seguridad forman un conjunto que se aplica en su totalidad a todo tipo de instalaciones nucleares y radiactivas de las que se deriven riesgos asociados a las radiaciones.

Cuarta. Los Principios Fundamentales de la Seguridad han definido con claridad la asignación de responsabilidades y las funciones del gobierno. Estas últimas son particularmente significativas en el caso de la renovación del parque nuclear y en gestión de residuos, en especial en el campo jurí-

dico, no bien contemplado, y en la vigilancia radiológica de los lugares donde se han dispuesto de forma definitiva los residuos.

Quinta. Los Principios Fundamentales de la Seguridad han ampliado de forma considerable el alcance de los tres principios clásicos de la protección contra las radiaciones ionizantes: la justificación, la optimación y la limitación, que ahora se refieren a los riesgos radiológicos de las instalaciones y de las actividades que ofrecen tales riesgos.

Sexta. La declaración de proteger a las generaciones presentes y futuras y exige que las generaciones que producen los desechos deban encontrar y aplicar soluciones seguras, viables y ambientalmente aceptables para su gestión a largo plazo de modo que no se imponga una carga indebida a las generaciones futuras. Sin embargo, no se cuantifica qué se entiende por carga indebida.

Séptima. Los Principios Fundamentales de Seguridad fortalecen la necesidad de disponer de medidas protectoras para reducir los riesgos asociados a las radiaciones naturales y las que pueden existir en instalaciones antiguas o en la realización de actividades no bien reglamentadas o procedentes de liberaciones accidentales.

CAPÍTULO IX
EL CONTROL DE LA SEGURIDAD
DE LAS CENTRALES NUCLEARES

Isabel Mellado
Directora Técnica del Consejo de Seguridad Nuclear

INTRODUCCIÓN

¿Cómo se consigue, desde el Consejo de Seguridad Nuclear, el control de la seguridad de las instalaciones nucleares, en concreto de las centrales nucleares?

En primer se explicarán de los controles administrativos, el valor añadido que aportan a la seguridad; otra parte, el control de la seguridad en la central una vez que tiene los permisos de explotación, cómo se hace la supervisión y el control de esa etapa, dedicándole especial atención, ya que es en la etapa que estamos ahora, con las centrales actuales; y por último explicaremos la relevancia que tienen las revisiones internacionales de la seguridad. Todo lo que sea abrirnos y aprender de otros nos aportará beneficios. Finalmente, las conclusiones.

CONTROLES ADMINISTRATIVOS. AUTORIZACIONES

El tema de las autorizaciones y los controles administrativos se podría ver desde un punto de vista meramente burocrático. Sin embargo, gran parte de la seguridad recae en los controles que se hacen a través de las autorizaciones. Son un instrumento de control que obliga en primer lugar al Titular y en segundo lugar a las administraciones.

Al titular lo obliga a hacer una demostración completa de la seguridad de sus instalaciones, en las distintas etapas en las que se requiere autorización.

A la Administración la obliga a verificar que la instalación cumple esas condiciones de seguridad, a través, fundamentalmente de la Normativa, que es el listón de seguridad que se le pone a la instalación, a realizar las inspecciones necesarias para comprobarlo y a imponer requisitos y condiciones sobre esa autorización que van a regular el funcionamiento de la misma. Esto sería el principio general.

Las autorizaciones que están definidas son:

- Autorizaciones previas, o de emplazamiento. Fundamentalmente se revisan las condiciones del lugar en el que se va a implantar la instalación (condiciones sísmicas, geológicas, hidrogeológicas, meteorológicas); población de los alrededores; el uso de las aguas y de la tierra; las posibilidades de evacuación para establecer los planes de emergencia, etc. Toda una serie de requisitos necesarios para la seguridad de una instalación de estas características.
- Autorizaciones de construcción (nuestra reglamentación no está muy desarrollada, ya que se ha ido haciendo de forma paralela a las construcciones).
- Autorizaciones de puesta en marcha (prácticamente unida a la de explotación).
- Autorizaciones de explotación. Inicialmente se concedía para cada ciclo de operación, pero se vio que no era práctico. En cada recarga había que sacar una nueva autorización de explotación. Posteriormente se dio por dos o tres años y actualmente se conceden por períodos de 10 años tras hacer una serie de revisiones importantes: una revisión de la operación durante todo el período en que ha estado vigente esa autorización; el cumplimiento de las condiciones que se le han requerido a la instalación por la autorización vigente o por las instrucciones o condiciones emitidas por el Consejo durante el período de vigencia; se hace una revisión periódica de la seguridad que cubre el estado de la instalación durante los últimos 10 años y finalmente, un nuevo requisito que se acaba de añadir en las renovaciones para los siguientes períodos de la central, que es una actualización con la normativa que está fuera de lo que hasta ahora se le había requerido a esa instalación (en algunos países sólo se le requiere a las nuevas centrales). En España, el Consejo decidió pedirlo a todas, no de toda la nueva normativa, pero selecciona cuál sería la que puede aportar un mayor beneficio para la seguridad de la instalación. Previamente a la renovación de la autorización le requiere

que analice explícitamente toda esa normativa y que procure adaptarse a ella.

- Autorizaciones de modificaciones en la instalación (una vez que se autoriza hay que regular qué modificaciones requieren autorizaciones específicas).
- Autorización de desmantelamiento y declaración de clausura. Es la última parte en la vida de una instalación.

Hasta aquí las autorizaciones necesarias para el caso de una central que cumple 10 años, y que en los próximos 10 años no va a ir más allá de los 40 años iniciales.

En el caso de que en el próximo período de renovación se vaya a extender la actividad más allá de los 40 años de funcionamiento iniciales, falta un tipo de autorización, ligado al tiempo de explotación, en los que hay que hacer una serie de análisis adicionales para demostrar que después de esos 40 años, los controles de seguridad siguen siendo válidos.

Tenemos un ejemplo en la actualidad, para la renovación de la Central Nuclear de Garona. Hablamos de 40 años porque en los cálculos iniciales de diseño hay que hacer unas estimaciones sobre la base de una vida de operación de aproximadamente este tiempo (realmente 32 años de funcionamiento efectivo a plena potencia)

En el diseño de la instalación hay una serie de hipótesis en los análisis del diseño, desde el análisis de la fragilización del material de la vasija, hasta los temas de resistencia estructurales, de fatiga térmica, u otro tipo de fenómenos que pueden estar ligados al tiempo y al envejecimiento.

SUPERVISIÓN Y CONTROL DURANTE LA EXPLOTACIÓN

Durante esta fase, el control y la supervisión de la seguridad se hace a través de una serie de instrumentos:

- el seguimiento de los incidentes
- a través de un programa de inspección,
- a través del conjunto de indicadores de funcionamiento y
- a través de la revisión de toda la información genérica que remiten los titulares.

Los elementos más importantes, son el tema de los incidentes y sobre todo el programa de supervisión (es el que estamos llevando a cabo ahora) donde se trata de integrar de una manera sistemática lo que se puede controlar mediante un programa de inspección y lo que se puede supervisar mediante datos subjetivos de indicadores de funcionamiento.

Las incidencias que puede haber en las centrales son de muchos tipos, están todas ellas categorizadas. Hay una Instrucción del Consejo, que regula sobre qué tipos de incidentes se tienen que notificar. Dependiendo de la importancia de esas incidencias en cuanto a su relación con la seguridad, las que son de cierto nivel tienen que comunicarse por parte de los titulares entre 1 y 24 horas y presentar un informe detallado en 30 días. En esos informes detallados lo más importante es el propio análisis del incidente que hace el titular, las lecciones aprendidas, el análisis de las causas y las mejoras que se van a introducir. Además, estos informes se usan para mejorar la seguridad en las otras centrales. Los informes se distribuyen a las demás centrales, y estas deben hacer sus propios análisis de aplicabilidad, las lecciones aprendidas y mejoras derivadas de estas incidencias.

Por parte del Consejo, cuando ocurren incidentes, lo primero que se hace es un análisis inmediato de la situación. Recibimos la información del incidente *in situ*, sobre la relevancia que ha tenido sobre la seguridad. Y dependiendo de las conclusiones de este análisis inmediato, un equipo de evaluación pequeño se encarga de la toma de decisiones sobre la necesidad de una inspección reactiva. Cuando un incidente presenta ciertas características de relevancia para la seguridad, o no se entienden bien las causas, o hay alguna actuación que no parece correcta, hay que poner en marcha una inspección reactiva.

Otra de las acciones importantes del Consejo en relación con los incidentes es la información al público y a las instituciones. Este es un tema que ha ido tomando cada vez más relevancia por la demanda de la sociedad en general de todo tipo de información. En cuanto a las instituciones, en particular me refiero a las instituciones locales, municipios, ayuntamientos, todas las autoridades de la zona, están recibiendo cada vez una información más directa y relevante sobre estos temas.

La Agencia de la Energía Atómica ha desarrollado la escala internacional llamada INES, como un medio de informar al público sobre cuánto de relevante ha sido el incidente. Clasifica los incidentes en siete categorías: siendo el cero los que no son relevantes para la seguridad y el 7 el grado de mayor importancia para la seguridad (por ejemplo, Chernovil). En cada incidente que ocurre se asigna un grado y se publica la información en la página web del Consejo. Si es cero no se hace nada más. Si está por encima de cero se distribuye la información a mayor escala.

Por último tenemos otro medio para el seguimiento de la experiencia operativa y de los incidentes: es el **panel de revisión de incidentes**. Es un panel en el que se reúnen mensualmente un grupo de especialistas del Consejo de distintas especialidades (ingeniería mecánica, eléctrica, factores humanos, análisis probabilista de seguridad) donde se hace una revisión sistemática de todos los incidentes que van ocurriendo para ver si las ac-

ciones que se han hecho hasta ese momento son adecuadas desde todos los puntos de vista; si hay alguna connotación genérica que convendría hacer un estudio genérico de ese incidente y si hay que pedir algún requisito adicional a todas centrales.

SISTEMA INTEGRADO DE SUPERVISIÓN DE CENTRALES (SISC)

Este sistema se ha puesto en marcha de manera completa y definitiva hace dos años (primeros del 2007).

Trata de integrar todos los datos que vamos teniendo durante la explotación de las centrales a través de los instrumentos más objetivos posibles. Si fuera posible medirlo todo a través de indicadores sería lo óptimo. Pero no todo se puede cuantificar. Tenemos un conjunto definido de indicadores y por otro lado las inspecciones y el sistema de tratamiento y categorización de los hallazgos de inspección para que a partir de todos ese conjunto de datos se pueda obtener una percepción rápida y objetiva de cómo está funcionando una central o de dónde puede estar teniendo problemas.

Este sistema es la adaptación a la situación española de un sistema que puso en marcha en los Estados Unidos en el año 2000. Es un sistema de supervisión de los reactores y cuyos objetivos fundamentales son el concentrar las actuaciones en áreas con mayor riesgo potencial. Es decir, que es un sistema que está informado por el riesgo. Se trata de no dedicarle el mismo tiempo ni la misma atención a componentes o actuaciones que, si fallan, no son relevantes para el riesgo, aunque sean temas de seguridad. Hay aspectos que son los más críticos para el riesgo, por lo que el objetivo es focalizar todas las actividades y prestar mayor atención a los temas más relevantes para el riesgo.

También se pretende graduar las actuaciones con las centrales en función de su propio comportamiento, es decir a una central que tenga peor comportamiento habrá que dedicarle mayor atención y mayores recursos que a una central que está funcionando razonablemente bien. Ese es uno de los objetivos del programa.

Otro objetivo es usar un sistema lo más objetivo posible. Ya que no se pueden usar todos los indicadores, tratar de objetivar al máximo posible todas las observaciones y responder a las desviaciones o a los incumplimientos de los titulares de una manera predecible y proporcionada a un tiempo.

Con estos objetivos se pretende dar una mayor transparencia. A las actividades de supervisión. Es una herramienta pensada para dar al público y a la industria en general valoraciones actualizadas e inteligibles del funcionamiento de las centrales.

El esquema de la supervisión está basado en cumplir los objetivos fundamentales de la seguridad y la protección.

El objetivo 1º es *mantener la protección* del público y del medioambiente en la explotación de las centrales nucleares. Este objetivo se vigila a través de 3 áreas prioritarias:

- *La seguridad del reactor*. Lo que clásicamente hemos designado siempre como “seguridad nuclear”.
- El *área de protección radiológica* y
- La *seguridad física* (ha cobrado máxima importancia a partir del 11 de septiembre).

Estas tres áreas tienen su repercusión dentro del programa. Veremos cómo se clasifican las centrales en función de su funcionamiento, dónde tiene problemas y dónde no. No podemos tratar lo mismo a una central que tiene problemas en un área que en dos áreas distintas (áreas estratégicas). Y combinaremos los resultados dependiendo de en qué área nos encontramos.

Cada área se divide en otras parcelas más pequeñas de supervisión que llamamos *pilares de seguridad*. Son los principios básicos para mantener los criterios de seguridad.

En el área de *seguridad del reactor*, por ejemplo, ¿qué es lo que hay que mantener para proteger la liberación de los productos de fisión? Sería *la integridad de las barreras*: la vaina de combustible, el circuito primario o el edificio de contención. Hay una serie de indicadores de funcionamiento y de inspecciones que van dirigidas a vigilar que se mantiene la integridad de las barreras.

Otro pilar de seguridad del reactor importante son los *sistemas de mitigación*. Todos aquellos sistemas que tienen que intervenir si hay algún accidente. Hay indicadores e inspecciones para vigilar que los sistemas de mitigación funcionan correctamente.

Otro elemento del riesgo muy importante son los *sucesos iniciadores* que tienen lugar en esa planta. Son tipos de sucesos que ocurren en la central que pueden ser iniciadores. Hay otra parcela dedicada a vigilar estos hechos.

Un capítulo importante es todo el capítulo de *preparación para emergencias*.

Todo esto es lo que vemos integrado dentro del área estratégica de la seguridad nuclear.

En el área de protección radiológica los dos pilares clásicos son la *protección radiológica ocupacional* y la *protección radiológica del público*.

Y por último el tema de la seguridad física. Todos estos temas están sujetos a unas reglas de confidencialidad. Desde el principio, cuando se puso

en marcha este sistema, se decidió que los temas de seguridad física no formaban parte del SISC. Se hacen inspecciones de seguridad física, evidentemente hay un control de la misma, pero el programa está fundamentalmente centrado en los temas de seguridad nuclear y protección radiológica.

Aparte de las áreas descritas están las que llamamos *áreas transversales*. Debilidades o deficiencias en estas áreas transversales, pueden repercutir o producir deficiencias en uno o en varios de los pilares de seguridad de los que hemos hablado. Son todo lo relativo al comportamiento humano, al ambiente de trabajo, el que exista verdaderamente un programa de identificación y de resolución de problemas por parte del titular, el que sea capaz de identificar los problemas que tiene, ser proactivo y corregir sus propios problemas. En el ambiente de trabajo es importante la atención a las denuncias y notificaciones de problemas de seguridad que hacen los propios trabajadores.

Todo el tema de formación está dentro del comportamiento humano. En resumen, están todas esas áreas transversales que afectan y que pueden inducir problemas de seguridad en los otros pilares de seguridad.

RECOGIDA DE DATOS DEL PROGRAMA

La recogida de datos se hace a través de inspecciones y de indicadores. Hay un conjunto de indicadores que veremos cuáles son, y el tipo de inspecciones que se hacen. De todo ese conjunto de inspecciones y de indicadores, el proceso fundamental para tratar de objetivar cómo es el funcionamiento de una instalación, eliminar al máximo las subjetividades de esas valoraciones, es tener una serie de procesos y de umbrales. En los indicadores es muy fácil: como son números, se obtienen una serie de valores umbrales para definir la importancia del problema que se está detectando, y definir cómo está afectando a la seguridad. Si estamos dentro de los valores normales, el indicador estará en verde; y si va adquiriendo valores de cada vez de mayor relevancia, iremos pasando a blanco, amarillo, a rojo. En función de esos resultados vamos a ver qué actuaciones tenemos que llevar a cabo.

Esto que es muy fácil en los indicadores, es más complicado en el caso de las inspecciones y hay todo un sistema complejo en el que se utilizan unos diagramas de flujo para categorizar la importancia para la seguridad de los resultados de las inspecciones, de los hallazgos. Y cuantificarlos en aquellos casos en que se pueda cuantificar con los análisis probabilísticos de la seguridad y obtener una medida del impacto en el riesgo (un hallazgo de inspección es una deficiencia) que tiene para la seguridad.

En resumen: primero recabamos los datos de los indicadores y de las inspecciones; en segundo lugar se hace un proceso de categorización de hallazgos de inspección o de comparar contra los umbrales; a partir de ahí tenemos la determinación de la importancia categorizado con un código de colores.

Partiendo de estos datos, vamos con ellos al proceso de evaluación. Juntándolos todos podemos ver si esos resultados deficientes (de indicadores y de inspecciones) se nos están dando en un solo pilar de seguridad, en varios, si esos varios están dentro de la misma área estratégica o distinta área estratégica; y a partir de ahí identificar cuáles son las acciones que se tienen que llevar a cabo por parte del titular y del organismo regulador en relación con esa instalación que está planteando deficiencias.

A partir de aquí: por un lado, hemos dicho que un objetivo del sistema es evaluar, definir el proceso de la central, definir las acciones a adoptar e informar al público.

Y por otro lado, sacar una información pública y definir la respuesta del organismo regulador que tendrá que llevar a cabo distintas acciones en función de la importancia de las deficiencias que se están encontrando.

No podemos olvidar el proceso coercitivo porque si una deficiencia implica el incumplimiento de un precepto reglamentario, evidentemente estamos dentro de lo que es una infracción y hay que instar al régimen sancionador, y proponer al Ministerio de Industria el expediente sancionador que corresponda. Es otra derivación distinta de todo este proceso.

INDICADORES DE FUNCIONAMIENTO

Los indicadores están agrupados para responder a los pilares de seguridad que vimos anteriormente.

En los sucesos iniciadores hay 3 indicadores que lo regulan y que son:

- Las paradas instantáneas no programadas del reactor por 7000 horas críticas;
- Las paradas no programadas con la pérdida de la evacuación normal de calor;
- Cambios de potencia no programados por 7000 horas críticas. Esos cambios de potencia serían superiores al 20%.

En los sistemas de mitigación hay 6 indicadores:

- 5 Índices de comportamiento de los sistemas de emergencia y
- Fallos funcionales de los sistemas de seguridad

En la integridad de las barreras hay 2 indicadores:

- Uno sobre la actividad específica del refrigerante del reactor y
- Uno sobre fugas del sistema del refrigerante del reactor.

En la preparación para emergencias tenemos tres:

- La respuesta ante situaciones de emergencia real y simulacros;
- La organización de emergencia y
- De las instalaciones, equipos y medios.

En protección radiológica ocupacional hay un indicador que mide la efectividad del control de la exposición ocupacional.

Y en la protección radiológica del público, un indicador sobre el control de efluentes radiactivos.

PROGRAMAS DE INSPECCIÓN

El Programa de Inspección tiene un Programa Base de aproximadamente 40 inspecciones temáticas en la que se cubren todos los temas relevantes para la seguridad. Hay inspecciones que se realizan cada trimestre, anualmente y como mínimo (frecuencia mínima) cada dos años. Ahí se vigilan todos los temas tradicionales de seguridad, desde el mantenimiento, a las modificaciones del diseño, preparación para emergencias por supuesto, controles radiológicos, el funcionamiento de los controladores de calor, la preparación para las condiciones meteorológicas adversas, tanto por exceso como por defecto en las temperaturas... todo un conjunto de inspecciones que forman el Programa Base de Inspección.

Pero el sistema prevé que cuando empieza a haber comportamientos deficientes hay que intensificar las inspecciones en esa instalación. Hay inspecciones especiales que van teniendo cada vez mayor alcance y exigiendo mayores recursos en número de inspectores y en número de días que están en la central cuando en una central se detectan hallazgos relevantes. Es decir, hallazgos blancos, amarillos, rojos... se va subiendo el grado de los requisitos de actuación.

Hay también como se ha dicho inspecciones reactivas frente a incidentes (se categorizan igual, por colores), inspecciones especiales sobre temas genéricos e inspecciones de licenciamiento cuando son necesarias para valorar solicitudes de autorizaciones.

Una vez categorizados los hallazgos y los indicadores vamos a valorar el funcionamiento global y definir en la *matriz de acción* qué tenemos que hacer todos.

Las evaluaciones se hacen trimestralmente y se hace la valoración conjunta con los hallazgos de inspección, como he dicho, cada trimestre. Cuando un titular tiene todos los resultados, y todos los indicadores son verdes y los hallazgos de inspección también, lo único que tiene que hacer el organismo regulador es mantener el programa base de inspección. Que significa seguir mirando, sin ninguna actuación adicional.

Cuando empezamos a tener resultados en blanco, uno o dos resultados en pilares diferentes (uno en un pilar, y si son dos, en diferentes pilares). Estaríamos en la banda de respuesta de regulación, que quiere decir que el organismo regulador tiene que empezar a intervenir haciendo una inspección especial. En la reunión con el titular tiene que hacer un análisis de causas-raíz por parte del titular para ver que ha pasado. Y se hace una inspección suplementaria de grado 1. Está encaminada a hacer un análisis de causa-raíz que ha hecho el titular y ver las necesarias acciones correctoras.

Si encontramos dos resultados blancos en un pilar de seguridad o uno amarillo, o tres blancos en distintos pilares de una misma área estratégica estamos ya en un pilar de seguridad degradada. Hay que intervenir de una manera más “intervencionista”. En la reunión del personal directivo con el titular; el titular tiene que determinar la extensión del problema, y se hace una inspección suplementaria de mayor nivel encaminada igualmente a ver la extensión del problema.

Si entramos en uno rojo, lo que supone varios pilares degradados con el criterio anterior, varios resultados amarillos, o un resultado rojo, en las reuniones con el pleno del Consejo se tiene que establecer un análisis a fondo y un plan de mejora que tiene que ser aprobado y supervisado por el Consejo y se somete a la instalación a un régimen de vigilancia especial.

La inspección suplementaria de grado 3 prácticamente significa que el Consejo realiza un análisis de causa-raíz independiente de la que ha hecho el titular, mediante organismos externos.

Por último, con un funcionamiento inaceptable se prohibiría el funcionamiento de la central.

Todos los resultados obtenidos se publican en la web del Consejo. Está todo el sistema disponible: los procedimientos de inspección, cómo se categorizan los hallazgos y los indicadores, todos los sistemas que usamos están disponibles. Las evaluaciones se hacen trimestralmente, y podemos ver los resultados de la última evaluación trimestral: corresponden al 3^{er} trimestre del 2008 en la Figura IX-1.

La de Trillo tiene un problema en los generadores diesel; la de Cofrentes tuvo una parada no programada; la de Ascó II tuvo un problema de cerramiento de la exclusiva. Las tres en el umbral blanco.

Figura IX-1

FUNCIONAMIENTO CENTRAL	CENTRAL	
Respuesta del titular: Todos los resultados verdes	GARONA, ALMARAZ I Y II	VERDE
Respuesta reguladora: 1 ó 2 resultados blancos en pilares diferentes	TRILLO, COFRENTES, ASCÓ II	BLANCO
Pilar de seguridad degradado: 2 resultados blancos en un pilar ó 1 amarillo o 3 blancos en un área	ASCÓ I, VANDELLÓS II	AMARILLO
Múltiples/Repetidas degradaciones: Varios pilares degradados o varios resultados amarillos o uno rojo	ROJO	
Funcionamiento inaceptable: No se permite operación centra		GRIS

Fuente: CSN

En la zona amarilla tenemos la de Ascó I, que tuvo un incidente de liberación de partículas radioactivas y Vandellós II hay indicadores blancos debidos a problemas con los generadores diesel y fallos en unos sistemas nuevos instalados para corregir el sistema de refrigeración.

REVISIONES INTERNACIONALES DE LA SEGURIDAD

Las revisiones internacionales son un tema de mucha importancia. Tanto los titulares como el Consejo de Seguridad Nacional estamos sometidos al escrutinio y a la revisión del resto de los Organismos internacionales.

La primera revisión internacional se realiza a través de la Convención de Seguridad Nuclear. España la ha firmado, y se compromete a cumplir todos los requisitos de la Convención mediante un compromiso vinculante ratificado por el Parlamento. Hay que repetir informes cada 3 años y reuniones de examen entre países, después de los cuales se someten a escrutinio y se hacen recomendaciones a cada país.

Ya hemos presentado todos los países el cuarto informe y la reunión de examen ha sido en abril del 2008. Es un método de control y supervisión de las condiciones de seguridad de los países adheridos a la Convención.

Y luego mediante otras misiones del OIEA:

- Misiones OSART a las centrales nucleares;
- Misión IRRS al CSN y
- “Peer Review” de WANO (“World Association of Nuclear Operators”)

CONCLUSIONES

La conclusión de cómo son las condiciones de seguridad de las centrales nucleares españolas es que están al nivel de la de los países más avanzados.

Esto está avalado por un sistema regulador y una normativa contrastada de uso internacional.

Está avalado también por un sistema de control y supervisión actualizado con las metodologías más modernas. No hay muchos países con este tipo de metodología de supervisión.

Esto conlleva un proceso de mejora continua. Aunque haya deficiencias, hay que identificarlas y corregirlas.

Tenemos una participación activa en todos los foros internacionales, que incluye evaluaciones independientes tanto de las instalaciones como del organismo regulador.

La transparencia en las actuaciones es un elemento esencial de mejora, tanto del organismo regulador como de las centrales, para prevenir los errores y corregirlos cuando suceden.

CAPITULO X
EL PROYECTO *ITER*: EL CAMINO HACIA LA FUSIÓN
COMO FUENTE DE ENERGÍA

Carlos Alejaldre
Director general
ITER Organization

INTRODUCCIÓN

Una de las peculiaridades del proyecto ITER es haber conseguido juntar un grupo de 120 ó 140 personas, trabajando en la construcción de un proyecto tecnológico, con un objetivo único. Es una experiencia en investigación que merece la pena estudiar y exportar fuera del país (y para otros campos dentro del mismo), el ejemplo de este grupo de trabajo para la consecución de objetivos comunes.

Se va a hablar de fusión, en concreto del Proyecto **ITER**. *Iter* (“camino”, en latín), es el camino necesario para conseguir una nueva energía, el paso necesario para el desarrollo de la *fusión* como fuente de energía. Se debe demostrar que el Proyecto es viable científica y tecnológicamente. Es, sin duda, el mayor proyecto de investigación en fusión que se está realizando y se ha realizado hasta la fecha y probablemente el de mayor nivel de colaboración internacional del mundo; un modelo y un ejemplo cuando se analiza lo que se está haciendo en Cadarache.

Estos son algunos datos de lo que se está haciendo allí.

- Se quiere construir una máquina que produzca 500 megavatios, diez veces la energía que se tiene que introducir a la máquina para conseguir las condiciones extremas que se producen dentro de la misma.

- El proyecto integrará la mayor parte de las tecnologías necesarias para las futuras plantas de fusión. No todas, ya que algunas quedarán como trabajos alternativos que se están realizando paralelamente a ITER, sobre todo en materiales para las plantas productoras de energía eléctrica. Las principales tecnologías estarán integradas, y se necesitarán 10 años de construcción, 20 años de operación y 5 años de desactivación.
- El coste es elevado, aunque todo es relativo. Se estimó en 5.000 millones de euros en el 2001, una cantidad elevada pero no tanto si se escuchan las cifras que se manejan cuando se habla de la crisis actual (basta compararlo con los 25.000 millones de euros que se manejan en Estados Unidos anualmente en negocio de los cacahuetes...). El presupuesto es de 500 millones de euros anuales durante 10 años para la construcción, y para ello ha sido necesario poner de acuerdo a Estados Unidos, la Unión Europea, Rusia, China, India, Japón y la República de Corea del Sur.
- Es, probablemente la mayor colaboración científica del mundo, y un modelo a seguir. En este momento, en política científica se está hablando de construir grandes instalaciones en astronomía, grandes telescopios, nuevos aceleradores, y los promotores de todos ellos están visitando el Iter para conocer bien cómo se ha sido capaz de poner de acuerdo a todos estos países, focalizarlos en este proyecto. Es un modelo de colaboración que no es sencillo, que tiene muchas complicaciones a la hora de su implementación (se están viendo en el equipo), pero que sin duda es un modelo para las entidades que tienen que financiar estos grandes proyectos, muy adecuado para seguirlo.

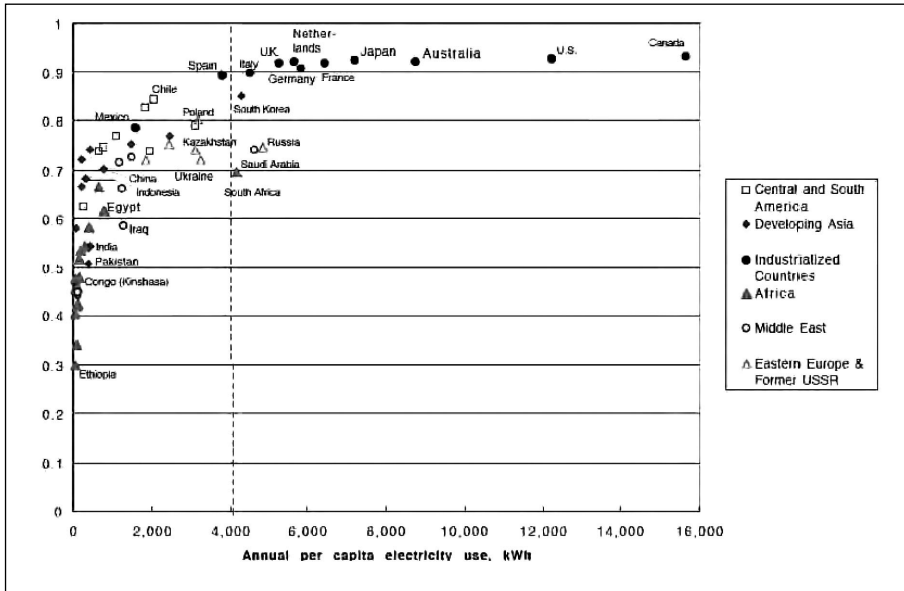
¿POR QUÉ SE ESTÁ TRABAJANDO EN ESTE TEMA?

En la Gráfica X-1 de las *Naciones Unidas* se puede ver el índice de desarrollo humano, el índice de bienestar de una sociedad en relación a datos como la longevidad, la educación, el producto interior bruto, etc.

Es una gráfica asintótica, en la que prácticamente en todos los países, en el momento en que su consumo energético supera el índice de 4.000 KW-h ya no hay gran avance. España está justamente en ese índice.

Esto tiene importantes implicaciones: todos los países que no han llegado a ese índice, que están en un índice de desarrollo humano pequeño, van a querer aumentar su nivel de bienestar. Para aumentar ese nivel de bienestar tendrán que llegar a esos 4.000 KW-h. Países como China, la India, se están convirtiendo en unos grandes consumidores de energía.

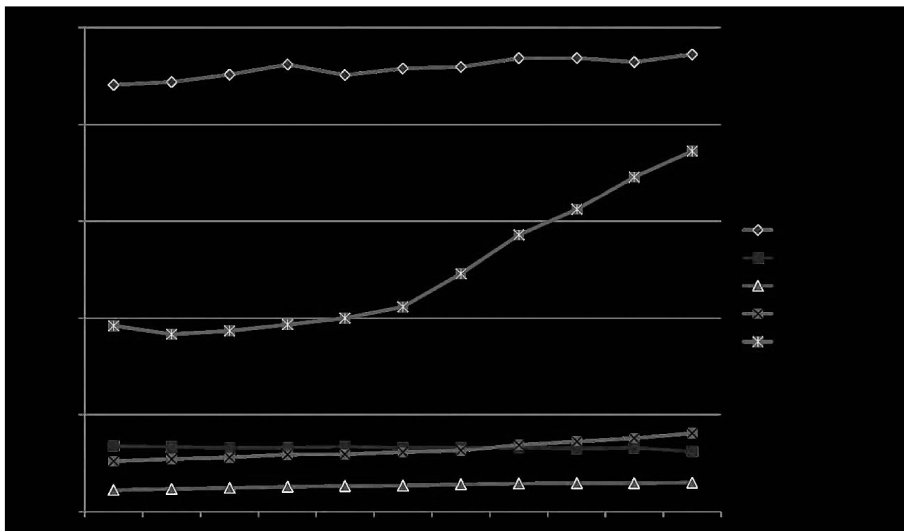
Figura X-1



Fuente: Naciones Unidas

Otras gráficas, como Figura X-2 de British Petroleum, lo demuestran igualmente.

Figura X-2



Fuente: BP

Se puede ver el crecimiento en consumo energético en algunos países. Se ve Estados Unidos, con un alto consumo energético; China, Alemania, India, y España. Es llamativo el crecimiento que está experimentando China. El crecimiento en los dos últimos años supera el consumo energético de Alemania. India todavía no ha despegado, aunque la población de ambos países es similar.

Esto lleva a la necesidad de buscar opciones energéticas al problema para alimentar a todo este consumo que inevitablemente se va a necesitar. ¿De dónde se puede traer? Se puede traer del petróleo, pero el petróleo como se sabe está llegando a sus límites (se encuentra menos petróleo del que se gasta), lo que quiere decir que ya se ha llegado al máximo de la producción y se va a entrar en la parte baja de esta curva según se predijo hace ya unos cuantos años. Esto lleva consigo a que el precio del petróleo aumente, aunque ahora coyunturalmente por la crisis haya bajado (este verano el precio del barril estaba en 140 dólares). Nos quejamos de su elevado precio, pero somos culpables de su elevado consumo.

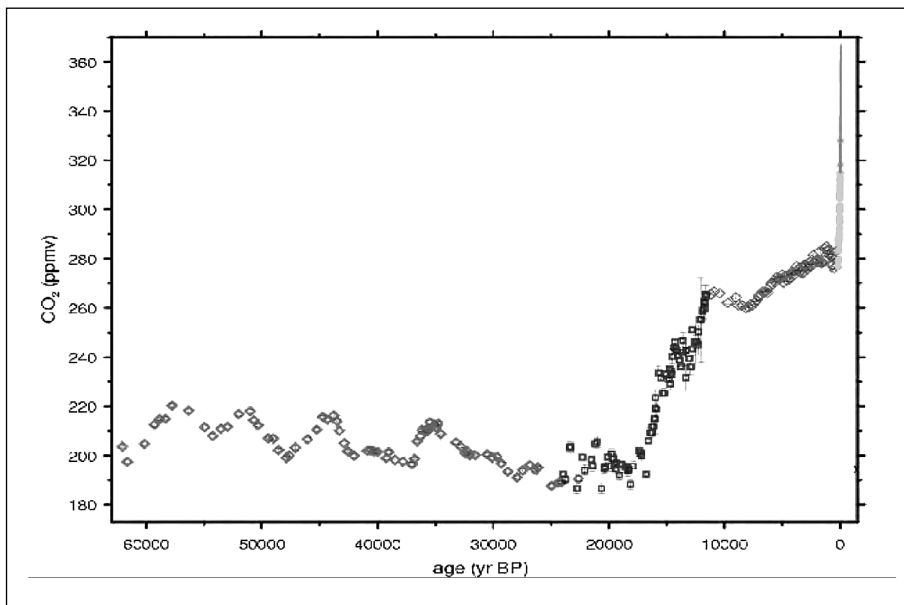
Otra opción es el carbón. Hay muchísimo carbón. Pero es un elemento con un impacto medioambiental tremendo, incluso humano. No hay que olvidar que, por ejemplo en China, mueren del orden de 3.000 personas al año como mínimo como consecuencia directa del minado de las minas de carbón (los datos no son muy conocidos. En el 2008 se declararon 3.200). ¿Se podría imaginar lo que sucedería si la industria nuclear produjera 3000 muertos al año de forma directa? Aquí no sucede nada; simplemente se sigue trabajando en ello.

El impacto medioambiental que supone quemar combustibles fósiles es impresionante. La gráfica X-3 es de la Universidad de Berna. Fueron a la Antártida Figura X-3

En la Antártida, mirar hacia abajo en un glaciar es volver atrás en el tiempo. Se puede saber cuál es el contenido de CO₂ en el aire que queda atrapado en ese hielo desde hace miles de años. En particular la Gráfica X-3 de los últimos 60.000 años, donde se puede ver cómo el contenido de CO₂ se mantuvo de una forma más o menos constante hasta el último gran deshielo (hace aproximadamente 20.000 años). Cuando el CO₂ sube es el momento del deshielo. El nivel del mar aumentó, en este tramo de subida, 120 metros. En los últimos 10.000 años ha mantenido estables estos niveles de CO₂ en torno a 280 partes por millón. Y en las últimas medidas puede apreciarse que se han disparado los valores de CO₂. Esta gráfica indica muy bien cuál es el impacto que se está produciendo en nuestro medio ambiente, de una forma cuantitativa.

De una forma cualitativa se han hecho fotografías de como están reduciéndose los glaciares del estado de Washington, o las nieves perpetuas del

Figura X-3



Fuente: Universidad de Berna

Kilimanjaro (se espera que en 15 años desaparezcan las nieves perpetuas del Kilimanjaro).

Otras opciones que se tienen dentro de las energías renovables son la energía solar y la eólica: mientras se tenga sol, se tendrá energía solar. Pero tiene también sus problemas. Para observar la efectividad de la energía eólica, se puede consultar en la Web de Red Eléctrica de España los consumos de energía en relación con la producción de energía solar o eólica. Esto es una realidad. No se puede asegurar que estas fuentes produzcan la energía necesaria en el momento exacto. Y eso que la eólica es la más importante de las renovables, si se exceptúa la hidroeléctrica. Hay que contar con ellas, pero no más allá de un 20 o 30% de la producción. No se puede confiar en un sistema basado en renovables por su aleatoriedad.

¿Cuáles son las otras opciones? Fisión, naturalmente. La nuclear es una opción que existe, que funciona, como las anteriores, que es la principal diferencia con la siguiente opción que se va a mostrar; la fusión, que todavía no existe a nivel industrial, y se está investigando para su desarrollo.

Sin duda se está en un momento de renacimiento de la energía nuclear. El presidente Sarkozy declaró hace unos días que se iba a construir el 3^{er} EPR en Francia, y están volcados en hacer de esta industria una de las partes importantes de la recuperación económica del país.

Fusión como fuente de energía en el futuro. Principios de la fusión

Una de las ventajas que tiene la fusión es su gran potencia específica, la gran capacidad que tiene de generar energía. Si para producir 210 KW-h se necesitan 40 toneladas de carbón, el combustible de fusión necesario equivale a media bañera (45 litros de agua) y la batería de un ordenador portátil. Con esos dos componentes se obtienen los dos elementos básicos de la fusión, que son el *deuterio* que se obtendrá del agua pesada (un dedal) producida con los 45 litros de agua y el *tritio* que se obtendrá mediante los neutrones que se producen en la fusión dentro de la propia cámara de reacción. Cuando los neutrones reaccionan con el litio producen tritio que se podrá volver a inyectar como se verá a continuación.

Con esos dos componentes (los 45 litros de agua y la batería de litio), en principio se pueden producir 200.000 KW-h, toda la energía que va a consumir un español en 45 años. La capacidad de producción energética que tiene esta futura fuente de energía es increíble. Por eso se habla de una fuente inagotable. Lo es, existe. Eso es lo primero que se tiene que tener en cuenta. Cualquier estrella utiliza los procesos de fusión, funde hidrógeno para producir helio. Es una reacción lenta que en nuestro planeta no tendría una eficiencia adecuada y por lo tanto se han buscado otras posibilidades. La más realista es la de obtener energía de la fusión del deuterio con el tritio, dos isótopos del hidrógeno.

El deuterio no existe en la naturaleza, está en el agua, una de cada 6.500 ó 6.700 de sus moléculas contiene deuterio en lugar de hidrógeno. El tritio no. Es un elemento radioactivo, inestable, con una vida media de 12 años, que no existe prácticamente en la naturaleza. Escasamente, en toda la atmósfera, se tienen unos 10 kilos de tritio debido a los rayos cósmicos que generan tritio en las capas altas de la atmósfera. Por lo tanto, se tiene que producir. Se utilizarán los neutrones que surgen de la fusión del deuterio y una carga inicial de tritio. Ese neutrones, cuando reaccionan con los núcleos de litio, producirán el tritio que se vuelve a inyectar. La reacción deuterio tritio es muy importante. Se producen 14 mega electrón voltios en cada proceso.

¿Cómo? El problema es que para que esta reacción sea eficiente hay que llevarla a temperaturas de 100, 200 millones de grados. Eso significa que la reacción tiene que verificarse, por un lado, aislada, y por otro lado se tiene que invertir energía para llegar a esas temperaturas. Para que el proceso sea aprovechable se tiene que obtener mucha más energía de la que se invierte. *Eso es lo que pretende ITER, que se pueda obtener 10 veces más energía de la que se está invirtiendo.*

¿Cómo se consigue aislar este proceso? Ahora mismo hay varios métodos, fundamentalmente dos: el *método inercial* y el *método de confina-*

miento magnético. El inercial no se va a desarrollar. Sólo decir que está basado en un concepto hasta cierto punto similar a lo que ocurre en el centro del sol, hay que comprimir el combustible a unas densidades muy elevadas.

En el confinamiento magnético se crea una botella magnética que permite aislar la materia a 100 millones de grados del entorno. Un entorno que estará a temperaturas razonables, 1.000 ó 2.000 grados, temperaturas que tecnológicamente no son tan razonables, ya que alguno de los componentes, como se verá, están cercanos al cero absoluto, como son las bobinas superconductoras por las que se hace pasar electricidad que generarán esos campos magnéticos.

En el caso de un *tokamak* (idea que surge en la Unión Soviética en los años 50), mediante la inyección de corriente en unas bobinas toroidales y la inducción de corriente en el propio plasma, se puede combinar un campo toroidal con un campo poloidal, y se genera un campo helicoidal capaz de confinar las partículas (plasma) a esas temperaturas tan elevadas.

Hay otras ideas, como la de los *stellarator* cuya diferencia fundamental con el *tokamak* es, desde el punto de vista conceptual, que todos los campos se generan tecnológicamente mediante bobinas. Mientras que en el *tokamak*, parte del campo lo genera el propio plasma induciendo esa corriente que genera a su vez campos magnéticos, en los *stellarator* todos los campos (toroidales y poloidales) se generan mediante bobinas. Eso tiene sus ventajas y sus inconvenientes.

Ambos son fruto de la guerra fría. En la Unión soviética se desarrolló el *tokamak* y en Estados Unidos, casi simultáneamente, el *stellarator*. El *stellarator* obtiene unos resultados peores, ya que al ser todos los campos generados técnicamente por bobinas, la construcción tiene que ser muy precisa. Cuando se construyó en los años 50 no se hizo con la suficiente precisión. Se ha visto que, cuando se construye con la misma precisión que el *tokamak*, los resultados son iguales o mejores. Y tiene unas ventajas que ahora el autor no puede defender, dado que trabaja con el *tokamak*. El *stellarator* más grande del mundo está en Japón, y hay otro en el CIEMAT, dando unos resultados excelentes.

Cuando se abrió el secreto de la investigación de ambos proyectos, en 1958 (conferencia de Átomos por la Paz en Ginebra), tras comprobar que no tenían aplicaciones militares, se observó que los resultados del *tokamak* eran mejores. Y por ello toda la comunidad científica se orientó hacia el *tokamak*.

Ya sea con un *tokamak* o un *stellarator* (posiblemente para la primera planta productora de energía de fusión se utilice un *tokamak* por tener un concepto mucho más desarrollado y experimentado tanto física como tecnológicamente), lo que se hará será generar un campo electromagnético que confine el plasma.

Se calienta el plasma a temperaturas de 100 ó 200 millones de grados. Se utilizan microondas o pequeños aceleradores, para inyectar partículas a muy alta energía que elevan la temperatura del plasma por medio de choques.

Se eleva la temperatura de las pequeña masas de deuterio y tritio hasta que se puede producir la reacción de la fusión. Si se rodea la cámara de reacción con litio, cuando el neutrón proveniente de la fusión colisione con el litio se producirá tritio y helio. El tritio se extrae y se vuelve a meter en el sistema y el helio se elimina (*ceniza* no radioactiva). En esta máquina se va a introducir originalmente deuterio y tritio (combustibles de fusión al menos en la primera generación de reactores de fusión), y se producirán, como deshechos, helio o cenizas no radioactivas en cantidades mínimas.

Intrínsecamente no se produce ningún desecho radioactivo. Indirectamente sí, ya no se controla el paso del neutrón por todos los materiales estructurales (por ejemplo cuando incida en la cámara de vacío, o la estructura de soporte, las estructuras que soportan las bobinas, etc.). Todos los aceros pueden fragilizarse y convertirse en materiales activados (de hecho se activan). Hay todo un campo de investigación abierto para conseguir que la actividad inducida disminuya significativamente más allá de unos 100 años, pudiendo reciclarse en ese tiempo. Hay promesas basadas en investigaciones y desarrollos ya existentes que indican que eso será posible. En ITER no se utilizan todavía esas tecnologías, sino que de momento se utilizan aceros convencionales, por lo que se produce una activación, pero es mínima debido a la manera en que se trabaja. No es una máquina completa; es una pequeña máquina experimental y no va a estar funcionando 24 horas al día, sino que serán experimentos de 10 minutos, un cuarto de hora, máximo una hora y después se analizarán resultados.

Cuando un neutrón golpee al manto fértil que tiene a su alrededor se va a producir un calentamiento. Si se introduce un sistema de intercambio de calor se aprovechará la energía calorífica generada. No es el único esquema, pero es el que parece más viable y con el que se espera que dentro de poco tiempo se empiece ya a diseñar la primera planta productora de energía de fusión.

¿Qué ventajas tendrá?

Una de ellas es la capacidad de producir energía. Con el litio y el deuterio que existen en el mundo se tienen materia prima para producir fusión para millones de años. Si se piensa que la reacción deuterio-tritio no es la única que se puede producir, sino que la reacción deuterio-deuterio (más exigente desde el punto de vista técnico) también tiene capacidad de apor-

tar energía, se tienen reservas para miles de millones de años a los niveles de consumo imaginables.

¿Qué desventajas?:

El proceso, desde el punto de vista de la seguridad está garantizado intrínsecamente, en condiciones óptimas. Pero cualquier desviación de esas condiciones (temperaturas de 100.000 millones de grados, densidad muy baja, presión límite) produce la parada de la reacción. Es decir, desde este punto de vista *es un sistema cuya inestabilidad es el modelo normal de funcionamiento*, de forma que si esa inestabilidad varía, en un sentido o en el otro, (mayor o menor temperatura, mayor o menor presión), se apaga. Se tiene que trabajar en un margen con condiciones muy específicas, por lo que cualquier desviación hace que el proceso termine.

El calor residual que se genera es pequeño, y proviene de los materiales estructurales indirectamente activados por ese neutrón de gran energía.

El inventario de combustible necesario es pequeño. En cualquier momento, la cantidad que se tiene dentro de la máquina de fusión, ITER, para cada descarga son 0,4 gramos de combustible. En un reactor industrial de fusión habrá probablemente 1 gramo de combustible en cada inyección, es decir el inventario es muy pequeño.

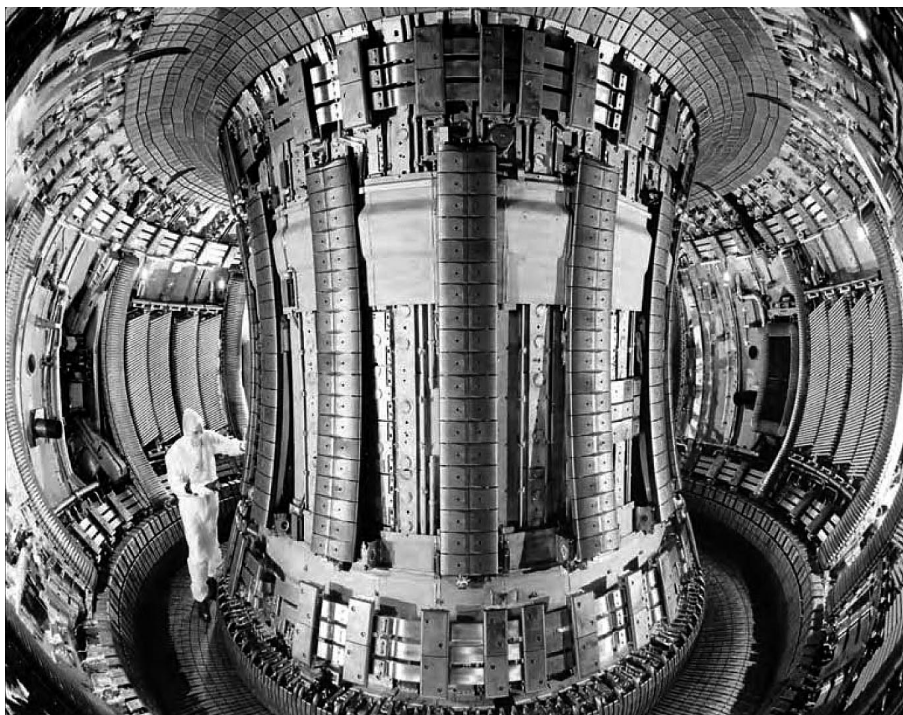
No existe radioactividad inducida de larga vida o alta actividad. No existen materiales relacionados con la proliferación, el tritio no está considerado como tal dentro de la legislación internacional, no se producen emisiones de gases de efecto invernadero (en la fisión nuclear tampoco), y las consecuencias de los posibles accidentes están siempre limitadas al impacto económico para la propia planta (cambiar la cámara de vacío, el divertor...) pero no producirán ningún impacto medioambiental.

El mayor ejemplo que en este momento existe en el mundo, la máquina más importante, donde se han obtenido los resultados mejores es JET (Joint European Torus), en Culham. Es un proyecto europeo que está en Inglaterra. Sus dimensiones son impresionantes.

En la Figura X-IV se ve la cámara de vacío con un hombre dentro. Se llama así porque dentro hay un gran vacío. Aquí es donde se obtuvo en el año 97 del orden de 16 megavatios de potencia térmica, demostrando la viabilidad científica de la fusión. Para conseguir los 16 megavatios se invirtieron 23 megavatios, para llegar a las condiciones especiales requeridas. Pero se quería demostrar la viabilidad desde el punto de vista científico, no energético o tecnológico.

El objetivo del ITER es demostrar que no sólo la fusión es científicamente cierta, sino que también su aprovechamiento energético es posible a nivel industrial.

Figura X-4



Fuente: Elaboración propia

Situación actual

No es un campo fácil, como no lo es cualquier otro campo en el que se requieren unas grandes inversiones. ITER es un hito. En la portada de una edición antigua del New York Times, había un referencia a la primera reunión que tuvieron Reagan y Gorbachev en noviembre de 1985. No se pusieron de acuerdo en nada, excepto en una cosa que aparece remarcada, en la Fusión. Los dos líderes coincidieron en que se debería trabajar en la fusión. De una manera simbólica, la fusión siempre ha sido un elemento de unión entre los dos bloques. En las épocas más duras de la guerra fría se mantenía la colaboración entre la Unión Soviética y el mundo occidental, siendo la manera de romper el hielo y trabajar conjuntamente en un gran proyecto de investigación. A Gorbachev le convencieron los iniciadores del proyecto. Y se inició el proceso de ITER, en el año 85. Se firmó el acuerdo de ITER en el palacio del Eliseo, en París, el 21 de noviembre 2006.

Cuando se habla de que la fusión lleva tanto tiempo, se debe pensar el tiempo que ha costado que el mundo político se ponga de acuerdo para

impulsar el proyecto. Todavía se tardó un año más en ratificar este acuerdo. Hasta octubre del año 2007 realmente no existía como tal el Proyecto ITER. Se estaba como en una especie de nebulosa, pero al final se consiguió la ratificación y el proyecto ITER vio la luz.

Finalmente llega ITER, con una potencia de 500 megavatios. Los parámetros principales de la propia máquina después de una última revisión hace año y medio, son los siguientes: se pretende obtener 500 megavatios introduciendo 50, es decir, un factor de ganancia mínimo de 10, en plasmas que van a estar funcionando del orden de 300-500 segundos de forma inductiva. En una fase posterior se debería poder estar trabajando hasta una hora de manera directa.

LOS ELEMENTOS DE ITER

- Las *bobinas superconductoras* que van a producir el campo magnético, llevando esa conducción al límite de la tecnología;
- Las *bobinas poloidales* (6 uds.), que llegan algunas hasta los 30 metros, son relativamente tradicionales (neobio-titanio);
- Las *bobinas toroidales* utilizan neobio-estaño son mucho más sofisticadas (18 de ellas);
- El solenoide central es el que induce esa corriente dentro del plasma, la combinación del campo magnético que producirán las bobinas toroidales con la inducción de corriente dentro del plasma a temperaturas cercanas al cero absoluto (del orden de 3 grados Kelvin);
- Se necesita *una cámara de vacío aislada* (la cámara y las bobinas) de los neutrones que se van a producir en el interior. Para ello se dispone de un sistema llamado *blanket* que en este momento no son más que unos grandes masas de acero, pero en el futuro se producirá ahí también tritio. Esa es una de las tecnologías que se probarán en ITER pero que no se van a implementar de forma masiva (el tritio se comprará probablemente a Canadá, u otros países que han mostrado interés, como Corea y Rusia. Canadá está dispuesto a venderlo y ya lo hizo en JET).
- Se necesitan unos elementos para poder introducir los sistemas de medida, los sistemas de calentamiento. Y se necesita extraer la energía y extraer las partículas, las impurezas que se van a generar dentro del plasma. Esto se hace a través de unas criobombas.

Todos los números en ITER son impresionantes:

- El peso que tiene la máquina: 23.000 toneladas. El peso del portaaviones francés Charles de Gaulle son 38.000 cuando está lleno;

- La cámara de vacío: 8.000 toneladas, más que la torre Eiffel (7.300 t).
- El peso de las bobinas no pueden tener desviaciones. Exigen un esfuerzo de toda la ingeniería mecánica,
- El sistema de superconducción tiene 48 bobinas, cada una de ellas tiene un peso con la estructura de sujeción de 360 toneladas (10 excavadoras de 5 toneladas cada una);
- El criostato: las dimensiones del Jefferson Memorial son 29 metros de alto: el criostato mide 29 metros de alto por 28 metros de largo.
- El edificio en el que va a estar el *tokamak* mide 166 metros de largo por 81 de ancho. Es casi como dos campos de fútbol. Y tiene una altura de 60 metros.

Es difícil confinar el plasma. Tiene tendencia a expandirse (está muy caliente), aunque tiene un campo magnético que lo está comprimiendo. Eso lleva consigo que algunos de los procesos sean turbulentos, y en particular hay un tipo de fenómenos que se llaman “modos localizados en el borde”, ELMs, que tienden a expulsar energía de forma brusca. Si se concentran demasiado en alguno de los componentes pueden llegar a fundirlos, con lo cual se introducen unos nuevos componentes que son bobinas, que se van a situar en la parte interior de la cámara de vacío para aminorar la violencia de esas descargas: en vez de tener una descarga violenta, tener varias pequeñas descargas que sí pueden ser controladas independientemente por el *divertor*. Este es un elemento que ha tenido que ser introducido en el último diseño (no hay que olvidar que el diseño de ITER parte del 2001, desde entonces no se había revisado, y en este tiempo la tecnología y la ciencia han evolucionado).

Es un desafío saber qué pasa dentro del dispositivo ITER; es una máquina de investigación, una máquina experimental. Para ello se introducen los *elementos de diagnóstico* que en un ambiente neutrónico como el que se va a desarrollar no es en absoluto trivial. Es un trabajo en el que probablemente España va a contribuir a través de la construcción de estos elementos en el CIEMAT dentro del programa de fusión europeo. Es una de las partes más importantes desde el punto de vista científico, no tanto desde el punto de vista tecnológico. Al fin y al cabo cuando se tenga la máquina en funcionamiento, los diagnósticos serán muy pocos. Pero todavía se pretende aprender lo que está sucediendo. Hay que darle flexibilidad y apoyo ya que su presupuesto es elevado. No debería ser así en una máquina que genera energía eléctrica.

El proyecto es una infraestructura, un complejo industrial muy importante y se peleó muchísimo para traerlo a Vandellós, por el impacto tecnológico que puede tener para una región. Recientemente, el presidente Sarcozy hizo una intervención sobre cuáles eran sus objetivos para que

Francia saliera de la crisis en la que todos los países están inmersos, y uno de los elementos que mencionó explícitamente fue ITER (¿tal vez fue optimista?), como una de las mayores inversiones en alta tecnología que el país debía realizar.

Es un proyecto complejo, como se puede ver por el hecho de que haya tantos países integrados en la organización.

La decisión de construirlo en Francia tuvo sus consecuencias, de la misma manera que tuvo sus consecuencias la decisión de que la candidatura europea fuera la francesa, y no la española, en la alternativa final entre Japón y Europa. Se decidió que vendría a Europa, pero que el Director General fuera japonés. Como era japonés, Europa pidió tener un Jefe de Proyecto que fuese europeo, y se decidió también que cada uno de los socios aportaría un Director General Adjunto. El Director Adjunto indio es el responsable del Sistema de Calentamiento y de Diagnósticos y el de Sistema de Gestión de Datos de la Ingeniería Central es coreano. El americano, del Departamento de *Tokamak*; Rusia de Ciencia y Tecnología; Administración, China y Europa es responsable del Departamento de Seguridad, que es donde está el autor del artículo.

Mucho más importante es la parte de las Agencias Domésticas. Precisamente por las características de ITER, España va a ser responsable del 90% de la construcción. La Agencia Doméstica de Europa, está en Barcelona. No es casualidad, sino consecuencia de la discusión que hubo en su momento entre España y Francia por la candidatura europea: de la misma manera que se negoció que el Director General fuera japonés, se decidió que la Agencia Europea con sede en España fuera la responsable del 90% de la construcción de los dispositivos. Y España propuso a Barcelona para hacerlo.

El Staff da otra idea de la complejidad del proyecto: Europa participa con aproximadamente el 45%. Se supone que el resto de los socios pone cada uno un 9%. La contribución de personal debe corresponder a estos números. No es así exactamente. Europa está algo sobrerrepresentada (60%), mientras que hay socios que todavía no llegan a ese 9%. En este momento los españoles tienen una representación superior al porcentaje que le corresponde (13 ó 14 personas en ITER).

Hay un total de 24 nacionalidades (decir que aquello es una Torre de Babel es una afirmación bastante realista). Esto tiene unas consecuencias que, sin duda, se investigarán en las escuelas de negocios (si se tiene éxito): cómo se gestiona un proyecto de estas características. Como muestra: hay reuniones a las dos de la mañana, al menos una al mes: los que organizan la reunión “madre” pueden ser India, China o Japón, y allí son las 8 de la mañana, en Candaras son las 2 de la mañana. Y hay que estar, en la videoconferencia. Si empieza a las 2 de la mañana, al cabo de 6 ho-

ras, se acaba a las 8 de la mañana. Pero es que los colegas Americanos han empezado a las 10 de la noche y están acabando la reunión. a las 4 de la mañana.

En estos dos últimos años ha habido un crecimiento espectacular. Se ha partido prácticamente de cero. En Cadarache en febrero del 2006 había 7 personas; dos años más tarde se esta llegando ya a los 300.

Una de las peculiaridades mayores, uno de los elementos fundamentales para entender por qué se ha conseguido aprobar este proyecto y que se pusieran de acuerdo, todos los participantes y también a la vez, uno de los desafíos que tiene el proyecto es que el 90% de los elementos, de los componentes, lo van a aportar en especie los diferentes socios. Todos los socios están trabajando en todos los componentes. Desde el punto de vista de la ingeniería, es difícil pensar que a un grupo de ingenieros se les ocurriera construir un motor en la que cada válvula se construyera en diferentes países: una China, otra en Rusia, otra Japón y otra Europa.

Parecería mejor que el motor lo construya uno, otro el chasis, etc. La idea es generosa, importante: que cuando se termine el proyecto todos los socios sean capaces de construir esa futura planta demostradora de energía de fusión, que hayan obtenido el conocimiento tecnológico necesario para ello. Para la gestión, desde el punto de vista del equipo central, que sólo controla el 10% del presupuesto, es una tarea difícil., La Unión Europea lleva algo más del 45% del presupuesto, y el resto, 9%. En estos momentos hay otro país intentando entrar, que es Kazajstán.

La construcción

Por un lado se han construido prototipos de prácticamente todos los grandes componentes. Eso da mucha tranquilidad. Hace unos días se inauguró un prototipo de control remoto del divertor en Finlandia, uno de los elementos importantes. La construcción está iniciada. Son del orden de 100 hectáreas las que se están, explanando para comenzar la excavación de la cimentación del *tokamak* a mediados de este año, para poder comenzar con la cimentación y construcción de los edificios. El país anfitrión, organiza y aporta el territorio y estudia el itinerario que tienen que seguir los grandes componentes desde donde son construidos hasta Cadarache (dificultad de transportar grandes piezas en vehículos especiales). El edificio en el que en un futuro estará instalado se empezará a construir, como se ha dicho, este año.

Además de la obra civil; ya se están firmando acuerdos con las diferentes Agencias Domésticas para la construcción de los componentes de alta tecnología, en particular todos aquellos que tienen los plazos de entrega

más largos, como por ejemplo, los superconductores, partes de la cámara de vacío, parte de las bobinas, etc., etc.,. Ya se han firmado parte de los contratos, y otros se firmarán en breve plazo.

Este es el camino de la fusión. ITER es el camino, pero no es, sin duda, el final. Es un camino que hay que recorrer, que va desde la ciencia, hasta la integración de la ciencia con la tecnología, y en un futuro de la ciencia, la tecnología y la economía.

El salto cualitativo es el que hay entre las máquinas que existen hasta ahora (tipo JET) y ITER. Es un salto mayor que entre ITER y la futura máquina demo que demostrará la economía del proyecto. Por dar un ejemplo, en la tecnología de las bobinas: mientras que JET era una tecnología en la que se tenía plasma escasamente por unos pocos segundos, ya en el ITER se da el salto a la tecnología superconductora que es la relevante para el reactor. Cuando se habla de temperaturas, (ya se está en los rangos de la planta de producción de energía eléctrica), la producción de energía de 500 megavatios, cualitativamente no es muy distinta a la de 3.000 megavatios.

En cuanto al tamaño, si JET tenía 100 m³, ITER tendrá casi 1.000 m³, que es un tamaño similar a la planta productora demo. Con lo cual, el salto cualitativo hay que darlo ahora y no en el futuro. Si aquí se tiene éxito, y se está convencido de que así será, no debería ser un grave problema el resto.

Otra de las ventajas que hubo en la difícil fase de discusión organizativa, (España y Francia propusieron un emplazamiento en el año 2001; no se decidió el emplazamiento europeo hasta el 2003 y hasta el 2005 no se consiguió el acuerdo entre Japón y Europa...), fue hacer un programa de forma que todo el mundo ganara: no sólo ITER se desarrollaría, sino que se desarrolle todo aquello necesario para la fusión. Y se puso en marcha, con el presupuesto necesario, lo que se llama el "broader approach", la aproximación para que, a la vez que se construye ITER, se apoya tecnológicamente el desarrollo necesario de todos aquellos materiales necesarios. Por ejemplo, en Japón se está desarrollando un programa (con la colaboración europea en la que España tiene un papel importante a través del CIEMAT y empresas participantes), que debería avanzar en paralelo para que los 50 años de desarrollo programados se puedan acortar y en los años 40 se pueda tener funcionando una planta que ya empiece a dar energía eléctrica.

No se está en un momento económico que incite a la euforia, pero realmente estos son los proyectos que hay que impulsar si se quiere cambiar el modelo económico.

Para indicar la importante aportación española al proyecto de fusión, por un lado con el desarrollo y la investigación científica (instalación TJ-II

en el CIEMAT) y por otro lado (un buen experimento en nuestro país), la construcción de una gran máquina científica (5.000 millones de euros en los años 90, actualmente 30.000 de euros) con el apoyo europeo y la colaboración de muchas empresas españolas (fue una opción de riesgo en aquel momento para las empresas. En la actualidad son grandes empresas, que están obteniendo grandes contratos europeos). En los últimos proyectos tecnológicos en fusión que hubo en Europa, el país que más contratos (en valor absoluto) obtuvieron sus empresas fue España, por encima de Alemania, Francia, Reino Unido... por ejemplo, empresas que participaban en la construcción del divertor, ya habían participado en la construcción del TJ-II). La construcción de estas grandes instalaciones es un estímulo para nuestra industria.

Existe una plataforma tecnológica de fusión (se está construyendo un centro para tecnologías de fusión). En Barcelona está el "Fusion for Energy" que es la Agencia que coordina todo el esfuerzo europeo en fusión para ITER, es decir, que coordinan del orden de 2.000 millones de euros.

CONCLUSIONES

Para el problema energético no hay una solución sencilla ni única. Lo que hay que realizar es investigación en energía. La viabilidad científica de la fusión ha sido demostrada de sobra (el mejor ejemplo es JET). ITER se está construyendo. Es un laboratorio mundial. Se está instalando en Europa y Barcelona acoge la Agencia Europea del proyecto. Estos son hechos inusuales para el país. La coordinación del proyecto científico más importante del mundo está en España.

España es una parte importante de esa estrategia y parte de una posición muy buena, que tiene que ser consolidada y apoyada por todas las instituciones.

La fusión puede ser la fuente de energía inagotable, barata y medioambientalmente aceptable en el futuro. Y como se está en un momento económico difícil, también para el proyecto, convendría acabar citando al *Financial Times* del 2004 (periódico conservador y crítico con ITER) en que decía "incluso si ITER se fuera más allá de su presupuesto y llegara a 1.000 millones al año, es un pequeño precio a pagar por una probabilidad de dar al mundo otra opción energética".

CAPÍTULO XI

LA TRANSMUTACIÓN: HACIA UNA ENERGÍA NUCLEAR LIMPIA Y SOSTENIBLE

Juan Antonio Rubio
Director General del CIEMAT

INTRODUCCIÓN

La Fisión Nuclear es el fenómeno físico que más rápidamente ha tenido aplicación práctica en toda la historia. La versión militar se desarrolla en los Estados Unidos con el proyecto Manhattan, no obstante el conocimiento que el alemán Heissemberg ya tenía de sus posibilidades destructivas. La aplicación civil corresponde al desarrollo de los reactores nucleares para la obtención de energía eléctrica para usos pacíficos. La conjunción de estas dos vertientes, la militar y la civil, puede explicar la prevención que aún tiene el ciudadano a la Energía Nuclear.

Los primeros prototipos de reactores corresponden a los años 50, la generación I, (Shippingport, Magnox, etc). Luego vino la generación II, en la que aparecieron los reactores comerciales (agua a presión, agua a ebullición, agua pesada (Candu), refrigerado por gas, etc). En torno al año 2000 vienen los reactores avanzados, como el ABWR (generación III). Estos reactores mejoraron mucho la seguridad. Después, llegará el AP1000, y el EPR europeo que son nuevos reactores todavía con mayores medidas de seguridad.

Con estos nuevos modelos se pretende alcanzar una mayor economía y una mayor seguridad, intrínseca que disminuya la probabilidad de que haya accidentes, Esta probabilidad ya es muy baja en todos los países del mundo, incluido España, donde operan centrales de seguridad probada y existe un sistema regulador eficaz e independiente.

Ahora se espera la eliminación de los residuos radiactivos, fundamentalmente los contenidos en los elementos combustibles retirados de las plantas nucleares, utilizando procesos científicos adecuados. En esta exposición se va a tratar del proceso de eliminación de residuos por **Transmutación**.

La fisión nuclear es un proceso de Transmutación de la materia en el que un elemento químico se convierte en otro u otros por alteración de los constituyentes de su núcleo. La transmutación se ha puesto de nuevo de actualidad, es algo de lo que se habla mucho, pero sin conocer exactamente lo que es. Es un proceso que puede aliviar la preocupación de disponer de forma segura y sostenible de los residuos nucleares. Actualmente existe un proyecto europeo con este fin, llamado EUROTRANS, del que el autor del artículo es director.

Oposición a la energía nuclear

La oposición a la energía nuclear se podría agrupar fundamentalmente en cuatro direcciones: oposición al sistema gobernante establecido o postura ideológica, peligro de proliferación de armas nucleares, seguridad de las instalaciones frente a posibles accidentes y falta de sostenibilidad (escasez de material fisible a largo plazo y pervivencia de los residuos radioactivos)

Con las condiciones de consumo de los reactores actuales, la cantidad de combustible está limitada (quizá 100 años, ó 200). La duración del combustible está ligada al número de reactores que haya. Con la generación IV se utilizarán otros combustibles disponibles (torio y uranio empobrecido), con lo que habría combustible no para centenares de años, sino para millares de años. Con estas previsiones, la diferencia entre renovables y nuclear es puramente anecdótica.

El riesgo de proliferación es relativamente ficticio. Son perfectamente conocidos los países que tienen capacidad para enriquecer uranio, así como los que operan reactores especialmente dedicados a la producción de plutonio. En estos países la oposición a la energía nuclear no es muy significativa. Con los reactores de agua existentes en el mundo occidental y su régimen de operación no se puede producir material fisible adecuado para construir un arma nuclear.

La preocupación por la seguridad de las centrales nucleares se vio acrecentada por el accidente de Chernobyl. La ausencia de accidentes posteriores, junto con el convencimiento de que ni el modelo de reactor ni las condiciones de operación existentes en la Unión Soviética se pueden dar en las plantas de los países de la Unión Europea, han disminuido el temor a la seguridad de estas plantas.

Una de las principales razones de la oposición a las centrales nucleares es la producción de residuos radioactivos. Residuos que duran más 100.000 años. Y eso, a la gente, no le gusta. Sobre todo en zonas más ignorantes, no en zonas muy desarrolladas.

Los residuos nucleares se pueden clasificar en residuos de media y baja actividad, y de alta actividad.

El almacenamiento de los residuos necesita una solución. En España está operativo el almacenamiento de El Cabril, operado por Enresa, para residuos de baja y media actividad, con una vida media de 30 años. Esta instalación, originalmente de la Junta de Energía Nuclear, es modélica en el mundo.

Los residuos de alta actividad, fundamentalmente los elementos combustibles utilizados en las plantas nucleares, son los más problemáticos. En estos momentos se almacenan en piscinas situadas en los edificios de los reactores. Posteriormente se pueden conservar en almacenamientos temporales centralizados, ATC, donde podrían estar en condiciones seguras un centenar o más años. Al cabo de un tiempo disminuye la radiotoxicidad del combustible y es fácilmente tratable por la transmutación. El ciclo completo, óptimo, para los residuos, sería en primer lugar en el almacenamiento en piscinas, después en el ATC y después optativamente su tratamiento por transmutación (actualmente en desarrollo).

En el mundo hay unas 300.000 toneladas de residuos, de larga vida media y de alta toxicidad, de los que aproximadamente un 1% es radioactivo de larga duración. Si se eliminan mediante la transmutación un 1% o un 1%, de estos residuos quedarían 3000 toneladas, ó 30 toneladas. Suponiendo una densidad de 10 g/cm³, las 30 toneladas, podrían ser almacenadas en unas 3000 botellas. A España tendría que almacenar 60 litros (un 2%), en lugar de las 4000 ó 5000 toneladas actualmente existentes. Todo ese ciclo se va a completar para el año 2030 ó 2040 cuando se espera que este operativa la transmutación. En este tiempo, las centrales que están funcionando lo hacen de forma segura en España.

Los residuos radioactivos de alta actividad contenidos en los elementos combustibles irradiados de un reactor nuclear son fundamentalmente **actínidos** (elementos fisionables de una masa superior a la del uranio) y **productos de fisión** de vida media larga. Los actínidos transuránicos representan alrededor del 1,5% del total de los isótopos existentes. Los fragmentos de fisión de larga vida más importantes por su hipotética su incorporación al medio ambiente, son el tecnecio 99, el yodo 129, el cesio 135, el zirconio 93, el escandio 79 y el yodo 126, seis en total. indicados en la Tabla 1

Tabla 1
 Productos de fisión que se consideran importantes
 por tener una vida media superior a varios años

Yodo 129 (1.6×10^7 a)
Tecnecio 99 (2.1×10^5 a)
Cesio 135 (2×10^6 a)
Zirconio 93 (1.5×10^6 a)
Estaño 126 (10^5 a)

¿QUÉ ES LA TRANSMUTACIÓN?

Es la eliminación de los residuos de larga vida por fisión o por captura neutrónica. Los actínidos se fisionan, dando lugar a nuevos productos de fisión. Y por captura neutrónica se pueden transmutar los isótopos en otros de vida media menor, es decir, cada vez con menor actividad e incluso estables. La captura neutrónica es excelente para la eliminación de los residuos.

Para producir la transmutación es necesario un sistema capaz de generar un número muy elevado de neutrones de gran energía, por unidad de tiempo. Los posibles sistemas son los reactores rápidos y los aceleradores de protones, que al incidir sobre un blanco adecuado, *blanco de espalación*, den lugar a los neutrones rápidos necesarios para la transmutación de los actínidos y residuos de vida larga.

¿QUÉ ES UN SISTEMA ASISTIDO POR ACELERADOR?

¿Por qué no se podía hacer una transmutación para eliminar residuos radioactivos en cantidad significativa con uno de los aceleradores existentes hace algunos años? Hasta los años 90 la intensidad del haz de protones de los aceleradores era muy baja o relativamente baja, no era suficiente. Para eliminar un gramo de plutonio había que fisionar 10^{21} núcleos de plutonio. Con las intensidades de haz de los aceleradores que había hasta entonces se tardarían años.

Ahora ya se consiguen intensidades de haz de unos miliamperios es decir del orden de 10^{16} protones por segundo. De manera que si los protones se convierten en neutrones es posible eliminar cantidades muy pequeñas de plutonio o de cualquier otro isótopo, por ejemplo se pueden eliminar algunos gramos de plutonio cada hora,

Actualmente ya se alcanzan intensidades de protones de 10 y 100 miliamperios, con lo que se pueden conseguir más de 10^{18} protones por segundo. Y además cuando esos protones, inciden en blancos de materiales pesados, *blancos de espalación*, se producen varios neutrones por protón incidente. El número depende de la energía del haz, pero para una energía del haz de un giga electrón voltio, que es una energía ya normal, el número de neutrones que se pueden producir es de 40 neutrones por protón incidente. A más alta energía y más alta intensidad, el número de neutrones puede ser aún mayor. De manera que se pueden eliminar cantidades notables de residuos. Y eso se debe al progreso de los aceleradores. Esta es la base del diseño de un *sistema asistido por acelerador*.

El **sistema asistido por acelerador, ADS**, es muy sencillo: está constituido por un acelerador que dirige un haz de protones contra, un blanco donde se produce una *reacción de espalación*. El blanco está, rodeado de un sistema multiplicador de neutrones, por ejemplo un conjunto subcrítico. Como blanco normalmente se utiliza plomo, pero se pueden usar otros materiales pesados, convenientemente refrigerados mediante sistemas especiales. En el blanco de espalación se producen muchos más neutrones rápidos que los protones iniciales que inciden en él. Los neutrones producidos fisionan los elementos fisionables que haya en el combustible que rodea al blanco o transmutan los residuos de alta actividad.

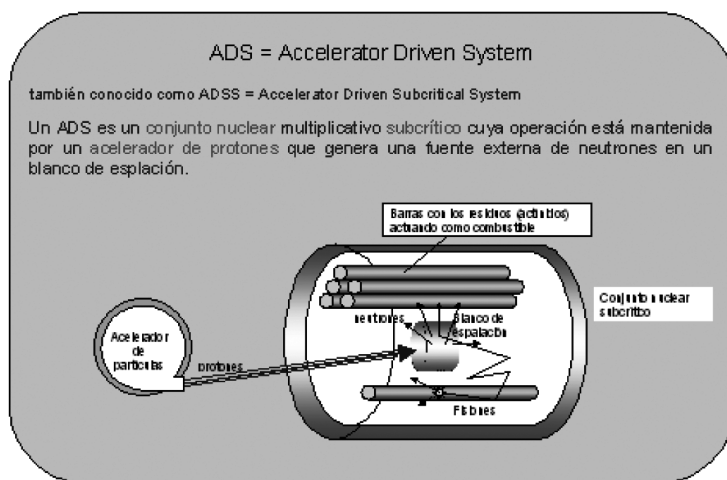
El blanco de espalación se rodea de combustible nuclear con objeto de multiplicar el número de neutrones generados. El combustible no tiene porqué ser de uranio; puede ser uranio mezclado con otros elementos fisionables, o simplemente residuos, productos de fisión directamente. La cantidad y disposición del material combustible que rodea al blanco de espalación tiene que tener una disposición geométrica tal que siempre sea un *sistema subcrítico*, es decir que nunca pueda aumentar su potencia de forma incontrolada. El control de un reactor nuclear se hace utilizando los neutrones retardados que aparecen en la fisión. El número de neutrones retardados que se producen en la fisión de los actínidos, o del plutonio, y que sirven para controlar la criticidad del reactor es menor que con uranio (1/3). Con lo cual, es bueno operar con un conjunto subcrítico, donde el control es absoluto. De hecho, un sistema subcrítico con una criticidad de un 98% es como un reactor parado, y un sistema subcrítico con una criticidad del 95% es la de un almacenamiento de elementos combustibles.

Todos los isótopos contenidos en los elementos combustibles son eliminables por fisión o por captura siempre y cuando haya neutrones rápidos como son los producidos en la espalación. Los neutrones térmicos, es decir lentos, no son adecuados porque la sección eficaz de captura o de fisión, en el caso por ejemplo de los actínidos, es pequeña y no se consigue la eliminación de los isótopos de alta actividad. Por esta razón no se pueden

utilizar los reactores térmicos para la destrucción de residuos radioactivos, pero si los reactores rápidos,

La conjunción de un acelerador de protones, un blanco de espalación y de un conjunto subcrítico, constituye un diseño en el que a partir de la energía de una sola partícula se produzcan aproximadamente 20 veces más energía, utilizando la espalación y la fisión. El sistema se llama *amplificador de energía*, porque efectivamente puede amplificarla. Pero su uso es la eliminación de residuos.

El diseño empleado por el autor (son todos muy parecidos, equivalentes) tenía como medio plomo-bismuto líquido; el haz entraba por una ventana (en la que se había hecho vacío); incidía sobre un blanco de espalación (también de plomo) y ahí se producían los neutrones que daban lugar a fisiones y a su vez daban lugar a captura.



Fuente: Elaboración propia

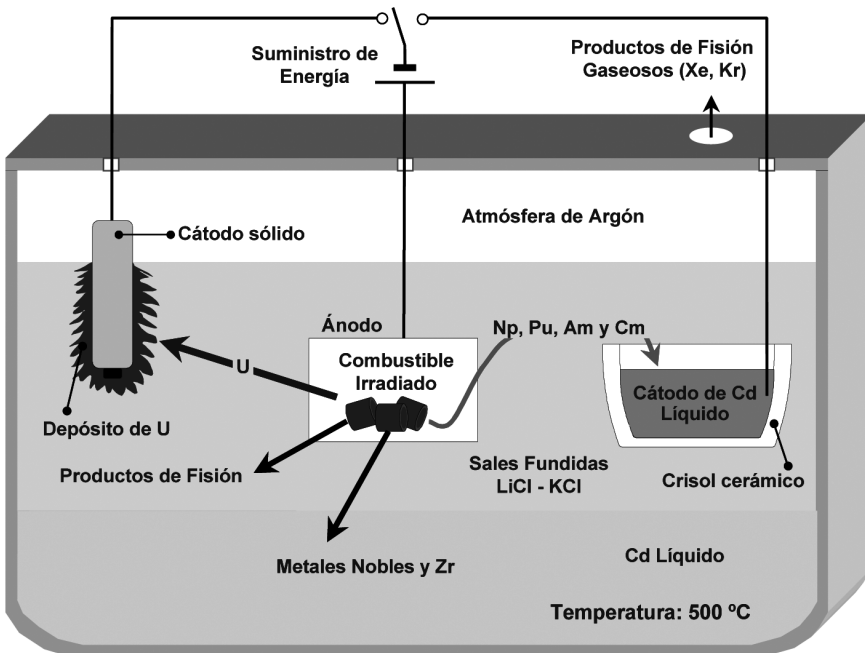
En el caso de los fragmentos de fisión, su sección eficaz de captura presenta unos máximos, resonancias, para energías neutrónicas inferiores a las correspondientes a la espalación. De manera que se puede colocar a cierta distancia del núcleo, donde los neutrones han perdido parte de su energía, y allí podrían desaparecer por captura.

Tras un estudio detallado de todos estos antecedentes, se ha llegado a un prototipo dentro de Eurotrans que se basa en un reactor que tenían en Mol (Bélgica) y que va a servir como prototipo de transmutador de 50 megavatios.

MÉTODOS DE SEPARACIÓN

Clave para la transmutación es la *Separación* de los residuos radioactivos de alta actividad, de los que se ha hablado anteriormente, del material combustible no utilizado. Hay dos métodos de separación distintos: el *hidrometalúrgico* y el *pirometalúrgico*.

El primero, denominado PUREX (plutonium uranium extraction) se utiliza sobre todo para la separación de plutonio y uranio para su utilización posterior. Esencialmente el proceso consiste en disolver los elementos combustibles en ácido nítrico y separar estos dos elementos mediante la extracción con un disolvente orgánico, fosfato tributílico. Ahora se trata de separar no sólo el plutonio, sino de separar también el resto de los actínidos. Es una variante, en la que se han desarrollado moléculas distintas que permiten la separación no solo de los actínidos minoritarios, sino también de los lantánidos (DIAMEX) de los productos de fisión de vida corta. Estos lantánidos hay que separarlos, mediante el método SANEX. De esta forma, por una parte se obtienen los actínidos y por otra los lantánidos, y de manera sintética. Eso de obtener de manera sintética es bueno porque la implica que no se puede utilizar para proliferar.



Fuente: Elaboración propia

La pirometalurgia es otro método de separación que está más retrasado. Es un proceso de electrolisis en el que se utilizan un cátodo y dos ánodos. Puestos a diferentes voltajes, a uno de los cátodos va el uranio y al otro los actínidos minoritarios. Este sistema está bastante menos desarrollado que la hidrometalurgia porque después hay que hacer un electrorefino para recuperar el uranio, el plutonio y el curio de los electrodos.

Todo este proceso se hace en un baño de sales fundidas a temperaturas relativamente elevadas (cloruro de litio mezclado con cloruro potásico) para que el punto de fusión sea lo suficientemente bajo. El problema que tiene el sistema es que las sales fundidas hay que limpiarlas. Y aún no se ha desarrollado un sistema eficaz de limpieza de las sales.

Se prevé que haya un demostrador hidrometalúrgico con las nuevas moléculas para el año 2012. Y otro pirometalúrgico para el año 2015. Y que se pase a la fase industrial dentro de aproximadamente 10 ó 12 años.

La transmutación permite reducir drásticamente la cantidad de residuos de vida larga así como el tiempo en que el riesgo almacenado es mayor de lo deseado. Por ejemplo, la radiotoxicidad disminuye en un factor 100 aproximadamente. O bien, si se quiere, se puede adelantar el proceso radiotóxico en 1000 años.

DESARROLLO DEL SISTEMA ASISTIDO POR ACELERADOR

El primer experimento de sistema asistido por acelerador se realizó en el CERN el año 1993 (FEAT). Fue uno de los experimentos más rápidos que se han hecho en la historia, porque se ocurrió la idea en mayo y en diciembre se habían terminado los ensayos. Se trabajó con un equipo de la Universidad Politécnica de Madrid, que permitió la exportación a Ginebra de un conjunto subcrítico de uranio natural en un tiempo récord. Se demostró la ganancia energética y a partir de ella la ganancia de neutrones. Era un experimento básico. Se utilizó muy poca potencia (1 watio) y poca intensidad del haz de protones (1 nanoamperio) y la ganancia se determinó con termómetros constituidos por dos piecitas de uranio bien aisladas, y una de plomo que servía de referencia. El uranio 235 se fisiona y se calienta, pero el plomo no. Sigue una línea de temperatura hasta el equilibrio. El uranio creció unos 4 cm de alto cada una de las celditas y el aumento de temperatura se estimó en unos 1000 grados. El conjunto subcrítico se encontraba en una vasija con agua, en donde se dispuso el blanco de espalación. El factor de multiplicación del conjunto subcrítico era de 0,92. Trabajar con esas criticidades no representa ningún riesgo.

Poco después se hizo otro experimento, en 1996 (TARC). También se utilizó un haz de protones de muy baja intensidad. Se puso un bloque de

plomo, y dentro del plomo se insertaron muestras de tecnecio y yodo fundamentalmente. Se esperaba que el tecnecio pasase a rutenio y el yodo a xenon por emisión beta después de capturar los neutrones. El sistema era complicado, pero en poco tiempo se pudo demostrar que la hipótesis formulada era buena y que efectivamente tenía lugar la captura

El primer diseño de ingeniería del proyecto europeo Eurotrans fue muy similar al expuesto. El programa Eurotrans ya tuvo sus precedentes en el V y VI Programa Marco. Se desarrollaron diversas experiencias para la determinación de datos nucleares., Por ejemplo las secciones eficaces de fisión y de captura neutronica de los actínidos (salvo la correspondiente algún elemento como el plutonio) y los productos de fisión, no están bien determinadas y es necesario conocerlas para realizar las experiencias de transmutación con los ADS.

En el primer experimento que se hace en el CEN, se utilizan protones. Se pone un blanco a aproximadamente 200 metros, y por el tiempo de vida se sabe su energía con mucha precisión con lo cual se pueden estudiar las secciones eficaces en función de la energía. Se sabe tanto la energía como las secciones de reacción.

Se han hecho muchos experimentos, incluso con reactores. En cuanto a los materiales también. Por ejemplo, si se quiere trabajar con plomo, se sabe que el principal problema es la corrosión a altas temperaturas. Hay que estudiar los materiales adecuados para las diferentes estructuras del ADS y hay que estudiar también otras fuentes de espalación (por ejemplo, *MEGAPIE*, una fuente de espalación de 1 megavatio construida en Suiza).

También ha habido que estudiar diferentes combustibles. El uranio y los combustibles de matriz inerte para los actínidos minoritarios, que son los que se están probando ahora, en esta primera fase. Son combustibles de óxidos de zirconio y otros. El caso es que con estos combustibles inertes pueden eliminarse los actínidos minoritarios. También se tienen en cuenta los reprocessados (*pyrorep*, *partnew* y *calixpart*). Esto ha dado lugar a un solo proyecto dentro del VI Programa.

Es necesario el diseño de uno o varios prototipos que respondan a todos los interrogantes que actualmente existen. En el CIEMAT se ha hecho un pequeño diseño que podría ser un transmutador de solamente 1 megavatio. Se piensa que el demostrador final sea de 50 megavatios. Pero muchos problemas que se presentan en el sistema de 50 MW hay se pueden estudiar en el diseño de 1 MW. Todas estas experiencias tienen la ventaja de que como se realizan con neutrones rápidos, los resultados son utilizables en los reactores de la IV generación. Lo cual quiere decir que se está contribuyendo técnicamente al desarrollo de los reactores de la IV generación.

El dispositivo de 1 MW se va a emplear previsiblemente con un ciclotrón de 200 mega electrón voltios, con una pequeña corriente y al final con ga-

nancias energéticas del orden de 1 MW. La disposición espacial del sistema dispondría de una zona en donde estaría el acelerador, que sería la zona experimental de producción de neutrones y luego una zona de experimentación para física médica, para comprobar diferentes aplicaciones para las que puede tener utilidad.

Se ha estimado que el dispositivo puede tener un coste de 80 ó 90 millones de euros y se está estudiando su financiación ya que se ha finalizado el diseño conceptual.

Se tiene el convencimiento de que el laboratorio de transmutación es una buena instalación porque permite la investigación de los procesos de transmutación. Se piensa que a la larga es importante como paso intermedio entre el almacenamiento geológico del combustible radiado y el almacenamiento geológico del combustible una vez transmutado, con volúmenes mucho más pequeños.

Se conoce el impacto de la transmutación sobre la masa de los residuos (hay un proyecto que se llama *red impact*). Lo que no se sabe es el efecto sobre el volumen del almacenamiento geológico. Se sabe que llegará a alcanzar un factor 50. Es muy importante que se consiga un factor 50 en la reducción del volumen del almacenamiento geológico.

El Laboratorio de transmutación sería un polo de desarrollo tecnológico. Además se creará un centro de formación científica y universitaria con envergadura internacional. Todo esto es muy importante para España, y una referencia para el resto de la UE.

LA ENERGÍA NUCLEAR. DESARROLLO A LARGO PLAZO

Es evidente que hay un crecimiento de la energía nuclear en el mundo, principalmente en Asia. Hay 50 reactores en construcción. En Estados Unidos hay 48 centrales autorizadas a operar hasta 60 años de vida y otras 5 centrales en Europa han sido autorizadas a extender su vida.

Europa ha decidido en su Plan Energético que para el año 2020, la fracción nucleoelectrónica global será la misma (30% global), unos países a más, otros a menos. Actualmente en España, lo mismo que en el mundo, es del 20%.

Hay industrias importantes en España en el sector nuclear con proyección internacional: ENRESA, ENUSA, CSN, Ingenierías, Y centros de investigación como el CIEMAT y algunas Universidades.

Los reactores rápidos de la Generación IV representan el desarrollo a largo plazo. Hay varias opciones en perspectiva: unas utilizando como refrigerantes sodio, otras utilizando líquidos pesados como el plomo, o plomo-bismuto. El plomo tiene el problema de que funde a temperatura

muy alta, y si se solidifica es un gran problema. El plomo-bismuto funde a 125 grados, lo que es más adecuado. Pero con el bismuto se transforma en polonio por captura neutrónica, y hay que tener cuidado.

Todo esto, junto con la gestión completa de los residuos mediante la separación y transmutación, darían lugar a la energía nuclear sostenible en 30 años.

CONCLUSIONES

- La energía nuclear es hoy una fuente que contribuye masivamente al consumo de electricidad.
- Tiene ventajas respecto de otras fuentes pero tiene también oposición popular. Se cuenta con ella en todos los estudios de prospectiva energética.
- En su versión actual no es sostenible.
- Hay desarrollos en curso que pueden amortiguar la oposición popular y convertirla en una fuente masiva y sostenible.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Principios fundamentales de seguridad N° SF-1, OIEA, Viena 2007.
- [2] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Seguridad de las instalaciones nucleares, Colección Seguridad No. 110-F, OIEA, Viena 1993.
- [3] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENRGÍA ATÓMICA, Principios para la gestión de desechos radiactivos, Colección Seguridad No. 111-F, OIEA, Viena 1996.
- [4] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Radiation Protection and the Safety of Radiation Sources, Colección Seguridad No. 120, OIEA, Viena 1996.
- [5] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, Glosario de seguridad del OIEA, Edición 2007, OIEA, Viena 2007.
- [6] CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR, Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes, Real decreto 783/2001, de 6 de julio, BOE nº 178, de 26.
- [7] Accelerator Driven Systems for Energy Production and Waste Incineration. Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics 2002.
- [8] Controlled Release of Thermonuclear Energy. Nature 1958 (primera publicación donde se anuncia la fusión nuclear).

- [9] Trabajar en la Industria Nuclear, Adolfo Garcia Rodríguez Fundación Universidad Empresa, 1987.
- [10] Residuos Radiactivos y su Percepción Pública, Colegio Oficial de Físicos 1999.
- [11] The Nuclear Age, Stockholm International Peace Research Institute 1974.
- [12] Materiales Nucleares, M.Lopez Rodríguez, F.pascual Martinez, Publicaciones de la Junta de Energía Nuclear, 1971.
- [13] Historia Nuclear de España, Sociedad Nuclear Española 1995.
- [14] Fast Reactor Technology: A Path to Long-Term Energy Sustainability – Position Statement, American Nuclear Society November 2005.
- [15]. Nuclear Energy Data 2007, OECD Nuclear Energy Agency.
- [16] Nuclear Engineering International Handbook, 2007.
- [17] Management of Recyclable Fissile and Fertile Materials, Nuclear Energy Agency NEA #6107 (April 2007).
- [18] Management of Reprocessed Uranium – Current Status and Future Prospects, IAEA TECDOC 1529, International Atomic Energy Agency, (2007).
- [19] Uranium and Plutonium: Macro-Economic Study Final Report, Nuclear Decommissioning Authority (June 2007).
- [20] Overview of the Hydrometallurgical and Pyro-metallurgical Processes Studied Worldwide for the Partitioning of High Active Nuclear Wastes, Charles Madic.
NEA/OECD 6th Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Madrid, Spain (11-13 December 2000).
- [21] Pyrochemical Separations Technologies Envisioned for the U.S. Accelerator Transmutation of Waste System, NEA/OECD Workshop on Pyrochemical Separations, Avignon, France (14-15 March 2000).
- [22] Plans for Nuclear Reactor Worldwide. World Nuclear Association March 2009.
- [23] Chernobyl Health Impact, Nuclear Energy Agency 2002.
- [24] Panorama of Energy, Energy statistics to support EU policies, Eurostat 2009.
- [25] NuclearFuel, James Laidler, Platts 15 October 2001 and 31 January 2005.
- [26] Summary of the ITER Final Design Report, July 2001, Presented by the ITER Director.
- [27] Generation IV Nuclear Energy Systems, presented by David J. Diamont, Brookhaven National Lab.

07

BIBLIOTECA
COMILLAS
Ingeniería

La Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas de la Universidad Pontificia Comillas tiene la vocación de servir al debate y la reflexión acerca de la problemática inherente al suministro energético y su sostenibilidad en el medio y largo plazo, así como su solución y la contribución que a ella brindan las Nuevas Tecnologías Energéticas para asegurar el suministro.

El Comité de Energía y Recursos Naturales del Instituto de la Ingeniería de España desde los años 70 ha editado monografías referidas a temas de actualidad y contienen la experiencia de un grupo de profesionales de reconocido prestigio interesados en la energía.

Fruto de estos intereses mutuos nació el Seminario Permanente de Tecnologías Energéticas, como un foro de encuentro de los profesionales y académicos del sector energético en el que reflexionar sobre las posibles soluciones tecnológicas al problema energético. Este volumen, **Energía Nuclear para el siglo XXI**, continúa las publicaciones del Seminario con las que se pretende presentar a la sociedad las soluciones técnicas disponibles para el abastecimiento energético para que ésta pueda formarse un juicio crítico sobre las mismas.

