

Nuevos proyectos nucleares en el mundo. Energía nuclear sostenible

P. T. León

La Energía Nuclear ha experimentado un importante impulso durante estos últimos años, debido principalmente a ser una energía no emisora de CO₂, producir a costes competitivos, e incrementar la garantía de suministro de los países. Las tecnologías utilizadas actualmente siguen teniendo dos aspectos a resolver: el grado de utilización del contenido energético del combustible nuclear, y los residuos. La solución de ambos aspectos supondría incluir a la energía nuclear en la categoría de energía sostenible. En el artículo se detallan los planes nucleares en el mundo, el impacto del accidente de Fukushima en los planes nucleares de diferentes países, y las iniciativas europeas para el desarrollo de la energía nuclear sostenible.

Nuclear power has experienced a major boom in the last few years, primarily because it is a non-CO₂ emitting energy source, it can be produced at competitive costs and it can boost a country's security of supply. There are still two issues to be addressed in relation to the currently used technologies: the degree to which the energy content of nuclear fuel is used, and wastes. A solution to both these aspects would put nuclear power in the category of sustainable energy. The article provides details on current nuclear plans in the world, the impact of the Fukushima accident on different countries' nuclear plans and the European initiatives for sustainable nuclear energy development.



PABLO T. LEÓN

es Ingeniero Industrial por la ETSIIM, especialidad Técnicas Energéticas, y Doctor Ingeniero Industrial por el Departamento de Ingeniería Nuclear de la UPM. Ejerce su actividad profesional desde el año 2000. Entre los años 2000 y 2004, es profesor asociado a tiempo completo en la Unidad Docente de Termotecnia de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Entre los años 2004 y 2005, es profesor titular interino en la misma unidad docente. En el año 2005 logra la oposición como funcionario (investigador titular) en el CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas), trabajando en la División Nuclear. En Septiembre de 2006 empieza a trabajar en Endesa, como Subdirector de Tecnología y Desarrollo, cargo que ocupa en la actualidad. Es Secretario de la plataforma tecnológica CEIDEN, y miembro del Steering Committee del grupo European Utility Requirements (EUR).

INTRODUCCIÓN

La energía nuclear es una fuente energética que contribuye en un 14 % a la producción de electricidad en el mundo. Hay un total de 440 reactores en operación en el mundo, en 30 países, y se están construyendo en la actualidad 61 reactores en 14 países. Todos estos datos confirman un hecho: la energía nuclear es una base importante del suministro energético de muchos países en el mundo, y, una vez superada la incertidumbre generada tras el accidente de Chernobyl, el sector se encuentra inmerso en un renacimiento nuclear a nivel global.

Las razones de este renacimiento son varias, pero se pueden resumir en las tres más importantes:

- La energía nuclear genera electricidad a precio competitivo.
- La energía nuclear es una fuente no emisora de CO₂.
- La energía nuclear contribuye a la garantía de suministro.

Estos tres vectores, bases de energía nuclear como fuente sostenible, y la ausencia tras Chernobyl de accidentes nucleares de gravedad (hasta el accidente de Fukushima), han dado un fuerte impulso a la energía nuclear en el mundo como fuente energética de futuro, dando lugar al desarrollo de importantes programas nucleares en diferentes países del mundo.

El 11 de marzo de 2011, el accidente de la central nuclear de Fukushima Daiichi ha supuesto un cambio en esta tendencia. El terremoto de Japón, y el posterior tsunami, que dejó sin alimentación eléctrica a la planta, y sin posibilidad de refrigeración externa, ha supuesto el accidente nuclear más grave tras el de Chernobyl. Catalogado como un nivel 7 en la Escala INES, aunque con un 10 % de las emisiones radiactivas a las que dio lugar el accidente de Chernobyl, el accidente de Fukushima ha supuesto un nuevo periodo de reflexión a la industria nuclear, y

una reevaluación de los diseños para evitar que lo ocurrido en Fukushima se pueda repetir.

Aún en los tiempos de incertidumbre en los que el sector puede verse envuelto en los próximos meses-años, no se debe olvidar que los motivos por los que la energía nuclear había recibido un nuevo impulso estos últimos años no han desaparecido. Se necesita un abastecimiento de energía a precios competitivos, no emisora de CO₂, y que contribuya a la garantía de suministro de los países. Esa energía es, hoy por hoy, la energía nuclear, en el corto y medio plazo. Es de esperar que, cuando se conozcan los efectos reales del accidente de Fukushima sobre la población y el territorio cercano a la central, fuera del debate sensacionalista de los medios, la energía nuclear recupere la senda marcada por los últimos años.

NUEVOS PROYECTOS NUCLEARES EN EL MUNDO

La tabla 1 incluye los nuevos proyectos nucleares en el mundo, por países, en tres categorías. La primera, centrales en construcción. La segunda, centrales en proceso de autorización. Y la tercera, centrales en estudio.

Actualmente hay 61 unidades en construcción en el mundo (destacando China con 27 centrales, Rusia con 10, e India y Corea del Sur con 5), 156 unidades en proceso de autorización (donde destacan 50 en China, 18 en India y 14 en Rusia), y 322 unidades en estudio (110 en China, 40 en India, 30 en Rusia y 23 en Estados Unidos).

Antes del accidente de Fukushima, los países con una mayor actividad en nuevos proyectos nucleares eran:

En Europa, destacan Finlandia, Francia (ambos países unidades EPR), Rusia y Eslovaquia, que actualmente están construyendo centrales nucleares. Países como Suiza, Italia, Holanda, Rumanía, Bulgaria, República Checa, etc. tenían planes serios de construcción.

En América, destacan los Estados Unidos, donde se habían realizado 23 peticiones de licencia conjunta de construcción y operación (COL) para la construcción de 37 unidades. El proyecto de Vogtle, con la construcción de dos unidades AP1000, será el primero en recibir la licencia de construcción y operación (COL) de la NRC este mismo año (ya se han realizado trabajos previos en el emplazamiento, y se ha comenzado la construcción de los primeros módulos). Países como Brasil, Argentina, México y Chile, han mostrado un gran interés para

País	En operación		En construcción		En autorización		En estudio	
	Num.	MWe	Num.	MWe	Num.	MWe	Num.	MWe
Alemania	17	20.339	0	0	0	0	0	0
Argentina	2	935	1	745	2	773	1	740
Armenia	1	376	0	0	1	1.060	0	0
Bangladesh	0	0	0	0	0	0	2	2.000
Bélgica	7	5.943	0	0	0	0	0	0
Bielorusia	0	0	0	0	2	2.000	2	2.000
Brasil	2	1.901	1	1.405	0	0	4	4.000
Bulgaria	2	1.906	0	0	2	1.900	0	0
Canada	18	12.679	2	1.500	3	3.300	3	3.800
China	13	10.234	27	29.790	50	57.830	110	108.000
Corea del Norte	0	0	0	0	0	0	1	950
Corea del sur	21	18.716	5	5.800	6	8.400	0	0
Egipto	0	0	0	0	1	1.000	1	1.000
Emiratos AU	0	0	0	0	4	5.600	10	14.400
Eslovaquia	4	1.816	2	880	0	0	1	1.200
Eslovenia	1	696	0	0	0	0	1	1.000
España	8	7.448	0	0	0	0	0	0
Estados Unidos	104	101.229	1	1.218	9	11.622	23	34.000
Finlandia	4	2.721	1	1.700	0	0	2	3.000
Francia	58	63.130	1	1.720	1	1.720	1	1.100
Hungría	4	1.880	0	0	0	0	2	2.200
India	20	4.385	5	3.900	18	15.700	40	49.000
Indonesia	0	0	0	0	2	2.000	4	4.000
Iran	0	0	1	1.000	2	2.000	1	300
Israel	0	0	0	0	0	0	1	1.200
Italia	0	0	0	0	0	0	10	17.000
Japón	51	44.642	2	2.756	12	16.532	1	1.300
Jordania	0	0	0	0	1	1.000	0	0
Kazakhstan	0	0	0	0	2	600	2	600
Lituania	0	0	0	0	0	0	1	1.700
Malasia	0	0	0	0	0	0	1	1.200
Méjico	2	1.600	0	0	0	0	2	2.000
Países Bajos	1	485	0	0	0	0	1	1.000
Paquistán	3	725	0	0	2	600	2	2.000
Polonia	0	0	0	0	6	6.000	0	0
Reino Unido	19	10.962	0	0	4	6.680	9	12.000
República Checa	6	3.722	0	0	2	2.400	1	1.200
Rumanía	2	1.310	0	0	2	1.310	1	655
Rusia	32	23.084	10	8.960	14	16.000	30	28.000
Sudafrica	2	1.800	0	0	0	0	6	9.600
Suecia	10	9.399	0	0	0	0	0	0
Suiza	5	3.252	0	0	0	0	3	4.000
Tailandia	0	0	0	0	0	0	5	5.000
Taiwan	6	4.927	2	2.700	0	0	1	1.350
Turquía	0	0	0	0	4	4.800	4	5.600
Ucrania	15	13.168	0	0	2	1.900	20	27.000
Vietnam	0	0	0	0	2	2.000	12	13.000
Total Mundo	440	375.410	61	64.074	156	174.727	322	368.095

Tabla 1. Reactores nucleares en el mundo, y nuevos proyectos (fuente WNA y propia).

la construcción de nuevas unidades (Brasil y Chile están finalizando la construcción de los proyectos de Angra y Atucha).

En Asia, destacan especialmente los países en vías de desarrollo (China e India), y también Corea del Sur y Japón. Hay un gran número de países en Asia que han mostrado interés en lanzar un nuevo proyecto nuclear (Vietnam, etc.)

En África y Oriente Medio, destacan los planes nucleares de los Emiratos Árabes, con un contrato firmado con la empresa coreana KEPSCO para la construcción de cuatro unidades de tecnología coreana, y Sudáfrica, que inició un proceso de selección de tecnología para nuevos proyectos nucleares.

Antes del accidente de Fukushima, la crisis financiera internacional impactó en los planes nucleares de varios de los países mencionados pre-

viamente, lo que ralentizó sus programas. Sin embargo, ha sido la crisis de Fukushima la que realmente ha impactado en los planes nucleares de algunos de ellos. A continuación, se incluye la situación de algunos países de especial relevancia.

- 1. Francia.** EDF está en conversaciones con el organismo regulador ASN acerca de medidas para prevenir accidentes similares al de Fukushima. El gobierno francés ha respaldado el uso de la energía nuclear.
- 2. Alemania.** El gobierno alemán ha ordenado parar siete reactores anteriores a 1980 mientras se lleva a cabo en ellos una revisión de seguridad. En las unidades posteriores a esta fecha, la revisión se hará en operación. EnBW y E.ON han parado dos reactores cada una, mien-



Figura 1. Flammanville 3 (arriba izquierda) y Olkiluoto 3 (arriba derecha), Vogtle 1&2 (abajo izquierda) y Haiyang 1&2 y Sanmen 1&2 (abajo derecha).

tras RWE ha parado uno. Otras dos unidades están paradas desde 2007.

3. **Italia.** Aunque el ministro de Industria anunció tras el accidente de Fukushima la determinación del gobierno de proseguir con su programa nuclear, los planes de desarrollo se han congelado con la presentación de una moratoria nuclear por parte del gobierno, que pretende evitar un referéndum en junio sobre el uso de esta fuente energética.
4. **Suiza.** El gobierno suizo ha suspendido el proceso de licenciamiento de emplazamientos para la sustitución de centrales nucleares, y ha encargado a la Inspección Federal de Seguridad Nuclear que extraiga lecciones de seguridad del incidente de Fukushima antes de reanudar dicho proceso.
5. **Reino Unido.** El gobierno encargó al Inspector Nuclear en Jefe una revisión de seguridad de los reactores británicos. Se espera que esta revisión incluya los diseños EPR y AP1000, que están en proceso de revisión normativa. Esto podría afectar al proceso de aprobación de nuevos emplazamientos. EDF Energy podría retrasar la solicitud de licencia para un EPR en Hinkley Point, prevista para finales de este año.
6. **Estados Unidos.** La NRC aprobó el 24 de marzo que se lleve a cabo una revisión de la seguridad de las centrales nucleares en función de las lecciones aprendidas de Fukushima, tanto a corto como a largo plazo (esta última decidirá posibles cambios normativos permanentes). La Administración de Obama ha declarado que siguen

en marcha los proyectos nucleares en EEUU, necesarios para la lucha contra el cambio climático.

7. **Brasil.** Aunque el gobierno se ha comprometido a realizar pruebas de seguridad en la Central Nuclear Angra, no ve motivos para hacer grandes cambios en su programa nuclear. La construcción de Angra 3 no se va retrasar, y se han desvelado planes para construir nuevos reactores en el nordeste y el sureste del país.
8. **India.** Las autoridades han reafirmado su compromiso de continuar su programa nuclear, y han dado instrucciones a la industria para que acometa una revisión técnica de todos los sistemas de seguridad de las centrales nucleares que confirme su resistencia a terremotos y tsunamis.
9. **China.** El Consejo de Estado ha suspendido la aprobación de nuevos proyectos nucleares hasta que se realicen inspecciones de seguridad de todos los proyectos en construcción. Las autoridades se han comprometido a actualizar las normas de seguridad en función de las lecciones aprendidas de Fukushima.
10. **Japón.** El Primer Ministro Japonés ha declarado que cambiará la

política energética del país, centrándose en el desarrollo de las energías renovables.

LA ENERGÍA NUCLEAR COMO FUENTE ENERGÉTICA SOSTENIBLE DE FUTURO

Existe un convencimiento por parte de la opinión pública en general, de la necesidad de ir a modelos sostenibles en los sistemas energéticos de los diferentes países. Se entiende como modelo sostenible aquel que protege el medio ambiente, es económicamente viable, y ayuda a la garantía de suministro de los países dependientes de energía del exterior.

En el caso de la energía nuclear, se ha recalcado su contribución a la mitigación en la emisión de gases de efecto invernadero, sus costes competitivos, y su contribución a la garantía de suministro, al estar las fuentes de uranio muy diversificadas en el mundo.

Sin embargo, con las tecnologías de las denominadas Generación II y Generación III actualmente en operación o construcción en el mundo, el grado de aprovechamiento del combustible nuclear es muy bajo (menor del 1 % del contenido energético del mismo), y en la operación de las centrales nucleares se generan isótopos radiactivos de larga duración.

Para responder a estos dos retos, y convertir la energía nuclear actual en una fuente energética sostenible, se está en proceso de desarrollar la Generación IV de reactores nucleares. El objetivo de esta Generación IV es optimizar el uso de combustible nuclear (pasando de tener reservas de uranio para 100 años, a tener reservas para miles de años, ampliando la fuente de combustible nuclear al torio), y eliminar en la mayor medida posible los productos radiactivos de vida larga, mediante el uso de reactores rápidos reproductores.

La tecnología de los reactores que permiten la optimización del uso del combustible y la minimización del inventario radiactivo fue descubierta casi al inicio de la energía nuclear, y

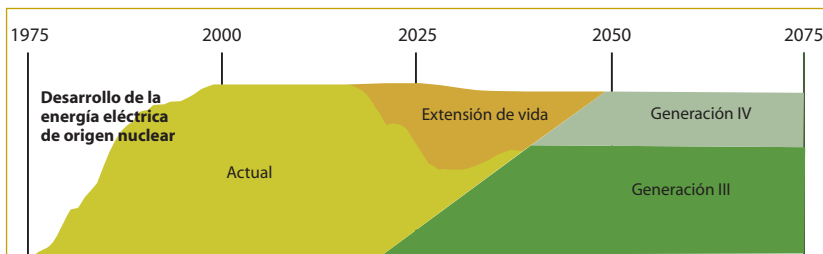


Figura 2. Planes de desarrollo de la Generación III y Generación IV.

objeto de construcción de diferentes prototipos en diferentes países en la década de los años 80 y 90 (Phenix y Superphenix en Francia, Monju en Japón, etc.) Sin embargo, el accidente de Chernobyl, y la paralización de los planes nucleares en muchos países a raíz de este accidente, congelaron los planes de desarrollo de estos diseños.

Estos últimos años, además del lanzamiento de un importante programa nuclear en diferentes países, han surgido diferentes iniciativas para el desarrollo nuclear de la Generación IV de reactores, y en particular los diseños de reactores rápidos. Además de la iniciativa GIF (Generation IV International Forum), donde se escogieron seis diseños de reactores nucleares para su desarrollo, este último año se ha lanzado una iniciativa Europea, denominada ESNII (*European Sustainable Nuclear Industrial Initiative*), en la que nos centraremos en este artículo, por su importancia para el entorno europeo y español.

La iniciativa sostenible ESNII nace en el seno de la plataforma tecnológica Europa de Fisión Nuclear Sostenible (SNE-TP *Sustainable Nuclear Energy Technology Platform*), con el objetivo de definir un consorcio de la industria nuclear europea para el desarrollo de reactores de GIV y las instalaciones necesarias que contribuyan a la sostenibilidad de la energía nuclear. Para ello, son necesarias tecnologías de reactores rápidos, donde se minimice la moderación de la velocidad de los neutrones (caso contrario a los reactores térmicos que forman parte de la Generación II), lo que posibilita un mayor uso del combustible nuclear, y la eliminación de isótopos altamente radiactivos y de vida larga. También será necesario el desarrollo del ciclo de combustible, pasando de ciclos abiertos a ciclos cerrados con reprocesamiento de combustible, para optimizar el uso del mismo, y minimizar el volumen de residuos radiactivos generados.

La iniciativa ESNII la componen entidades industriales europeas, y centros de investigación. ESNII se lanzó oficialmente en la conferencia del SET plan, en Bruselas, el 15-16 de noviembre de 2010. El SET plan indica que las prioridades en investigación nuclear deben ser el aprovechamiento de combustible y la minimización de residuos, para poder incluir la energía nuclear como energía sostenible.

ESNII analizará diferentes tecnologías de reactores rápidos de GIV, junto con las infraestructuras de investigación, instalaciones de combustible y trabajo de Investigación y Desarrollo necesarios.

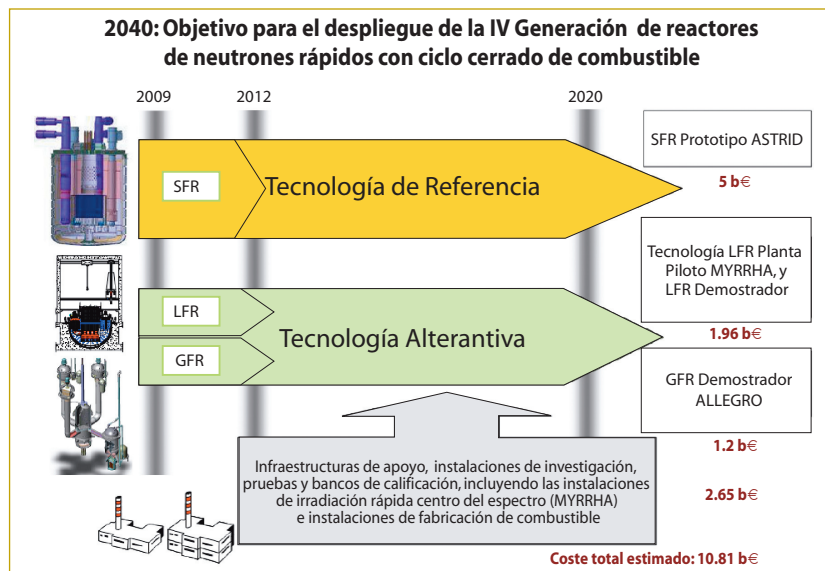


Figura 3. Planes y presupuestos de la iniciativa ESNII. 1b=1.000 millones de euros.

La figura 2 presenta los planes de implantación de las diferentes tecnologías nucleares. Desde el año 2010, se plantea la extensión de vida de las centrales pertenecientes a la Generación II, de 40 hasta 60 años. En paralelo, comienza la operación de los proyectos de Generación III que están actualmente en construcción. En el año 2040, comenzará la operación de las primeras unidades de reactores de GIV, que convivirán en el tiempo con los reactores de Generación III. El parque de Generación IV sería el suficiente para asegurar el suministro de combustible, y minimizar el volumen de residuos del parque nuclear total.

La iniciativa ESNII tiene como objetivo analizar dos tecnologías de reactores rápidos. Para ello define una tecnología de referencia, que es un reactor rápido refrigerado por sodio (ASTRID), y una tecnología alternativa, que puede ser un reactor rápido refrigerado por plomo (planta piloto MYRRHA, y un demostrador ALLEGRO), o bien un reactor rápido refrigerado por gas (ALLEGRO).

Además del desarrollo de estas tecnologías, se necesitará el desarrollo de infraestructuras de apoyo al I+D, instalaciones de lazos de refrigeración de demostración, instalaciones de irradiación, de reprocesamiento y fabricación de combustible, etc.

Los presupuestos estimados para estas iniciativas son (ver figura 3):

- Prototipo de reactor rápido de sodio (ASTRID): 5.000 M€.
- Prototipo de reactor rápido de plomo (MYRRHA y ALLEGRO): 1.960 M€
- Prototipo de reactor rápido de gas (ALLEGRO): 1.200 M€
- Instalaciones soporte: 2.650 M€

El coste total estimado de la iniciativa es de 10.810 M€. La pregunta ahora es de dónde vendrán los fondos para los diferentes diseños.

En el caso del diseño ASTRID (*Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration*), con una potencia de 600 MWe, el gobierno francés liderará el proyecto y la tecnología de sodio (tienen una amplia experiencia en la operación de los reactores Phenix y Superphenix, ambos actualmente en desmantelamiento). El gobierno francés ha puesto 650 M€ para el proyecto, y está abierto a colaboraciones europeas. Actualmente la participación de la industria en este proyecto está liderada por EDF (experiencia en operación de estos reactores) y Areva (que está analizando el paso del diseño pre-conceptual al diseño conceptual en el lazo de producción de vapor). El diseño también está en fase de discusión con el organismo regulador francés.

En el caso del diseño refrigerado por plomo, en el caso de MYRRHA el proyecto está liderado por el gobierno belga. Este proyecto tiene como objetivo el licenciamiento y la construcción de una planta piloto europea (ETPP), en un rango de potencias de 50-100 MWth. El objetivo es que la planta esté en operación en el año 2023. El emplazamiento escogido para este diseño es el Centro de Investigación SCK-CEN en Mol. El gobierno belga ha financiado el proyecto con 60 M€ para los próximos cinco años, y se están buscando colaboradores europeos. En paralelo, y siguiendo con la tecnología de reactor rápido refrigerado por plomo, el proyecto demostrador ALLEGRO (*Advanced Lead*

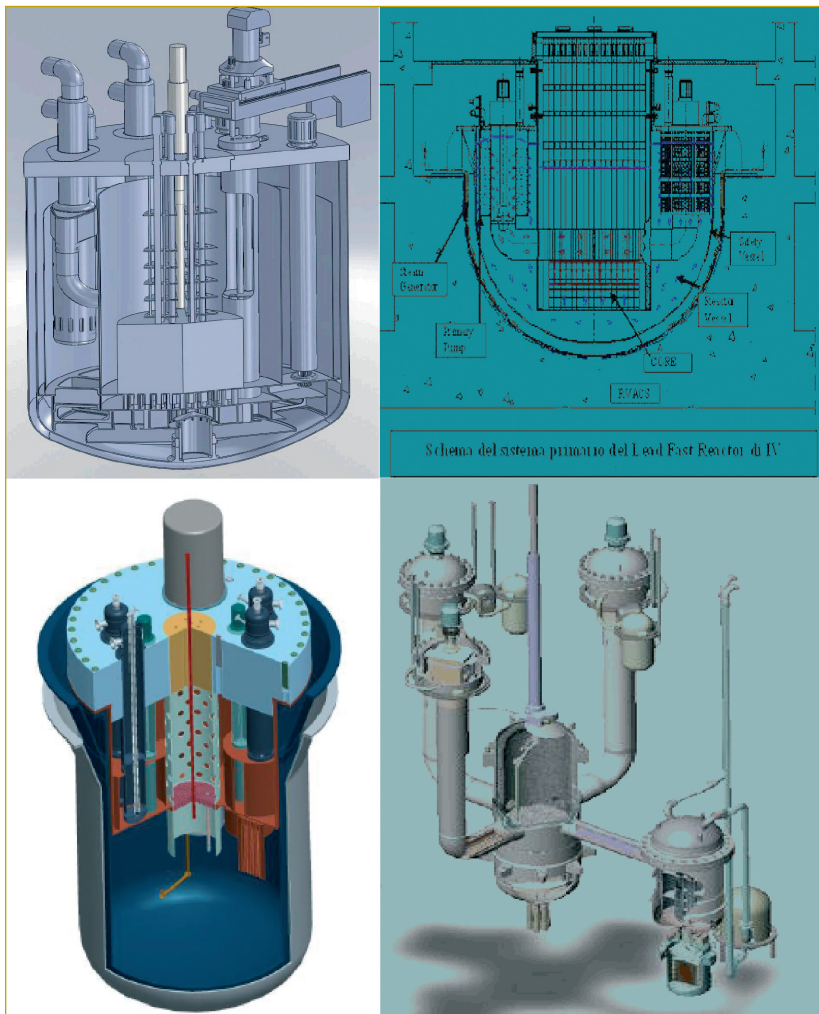


Figura 4. Diseño ASTRID, ALFRED, MYRRHA y ALLEGRO.

Fast Reactor European Demonstrator), que tiene como objetivo obtener la licencia del proyecto y su construcción entre los años 2015 y 2025. La empresa Ansaldo está liderando el proyecto. Ambos proyectos tienen como objetivo demostrar la seguridad y la minimización de residuos para la construcción de un reactor prototipo refrigerado por plomo de 600 MWe para 2025-2030.

En el caso del diseño ALLEGRO, esta es una estrategia a más largo plazo, incluyendo la posibilidad de generación de vapor a alta temperatura para procesos industriales (por ejemplo, producción de H_2). Se tiene como objetivo lanzar el proyecto demostrador con un consorcio de países de la Europa del Este (República Checa, Eslovaquia, y Hungría). En la actualidad se está en proceso de selección de un emplazamiento para el proyecto.

Por último, las infraestructuras de soporte de la I+D de ESNII. Estas infraestructuras deberán contemplar:

- Diseño, construcción, actualización y operación de un conjunto de insta-

laciones de experimentación para el diseño de componentes, desarrollo de sistemas, cualificación y validación de códigos, que son esenciales para el desarrollo de los diseños y los análisis de seguridad de los demostradores del programa ESNII.

- Diseño, construcción y operación de plantas de producción dedicadas a combustible de uranio-plutonio, y de actínidos menores.

El objetivo es tener realizado una identificación de las instalaciones necesarias en el año 2011, y comenzar su construcción en el año 2012.

En España, dentro de la plataforma tecnológica CEIDEN, se ha creado un grupo de trabajo para el seguimiento de las actividades de ESNII, y la posibilidad de crear una propuesta de participación española que incluya los centros de investigación, la universidad y la industria. Los objetivos de este grupo son:

- Identificar intereses y objetivos comunes para la participación en ESNII.

- Optimizar las condiciones de participación en ESNII para cada miembro.
- Coordinar la participación de estas instituciones en ESNII, eventualmente unificando la selección de sistemas ESNII en que participar, la forma y los objetivos de la participación.
- Eventualmente preparar y constituir un consorcio para estructurar la participación unificada.

Los interesados en participar en esta iniciativa pueden obtener información en la página web de la plataforma: www.ceiden.com.

CONCLUSIONES

La energía nuclear contribuye de forma significativa a la producción eléctrica mundial. El ser una fuente no emisora de CO_2 , con costes competitivos, y con una contribución a la garantía de suministro de los diferentes países que operan centrales nucleares, ha supuesto que en los últimos años haya habido un incremento importante en los planes de desarrollo de nueva potencia nuclear en el mundo.

Los esfuerzos de la industria nuclear se centran ahora en el desarrollo de tecnologías que permitan un mayor uso del potencial energético del combustible nuclear, y la minimización del volumen de residuos radiactivos de las plantas en operación. La solución de estos factores, existentes con los ciclos de combustible y diseños de centrales nucleares actuales (Generación II y III), supondría el incluir la energía nuclear como fuente sostenible de energía.

Para ello, se han puesto en marcha programas para el desarrollo tecnológico de diseños de reactores rápidos de GIV, rescatando los trabajos realizados en las décadas de los años 80 y 90, entre los que destaca el programa ESNII, de la plataforma tecnológica europea de fisión nuclear sostenible (SNE-TP). Estas iniciativas permitirán demostrar tecnológicamente que la fisión nuclear es una fuente energética sostenible.

El accidente de Fukushima del pasado marzo supondrá cambios profundos en las estrategias nucleares de diferentes países. Sin embargo, el problema energético acuciante que se tiene en la actualidad seguirá existiendo, y parece difícil vislumbrar un panorama energético que no cuente con la energía nuclear de fisión en el corto y medio plazo.■