

## El difícil reto de la energía nuclear

Guillermo Sánchez ([guillermo@usal.es](mailto:guillermo@usal.es)) .

*La energía nuclear aplicada a usos civiles, casi desde sus orígenes, ha sido objeto de una feroz campaña por parte de grupos antinucleares. Su impopularidad, asumida por gran parte de la prensa y del poder político, dificulta un análisis riguroso del tema. Un accidente con dos muertos, como el ocurrido en el año 2000 en la planta japonesa de conversión de uranio de Toca Himura, habría pasado inadvertido en otro tipo de industria, pero fue noticia mundial durante días.*

La generación neta de electricidad de origen nuclear no ha dejado de crecer, pero la construcción de nuevas centrales ha ido disminuyendo. Los recursos en investigación casi han desaparecido. Es paradigmático el caso español, donde muchos departamentos de tecnología y física nuclear de universidades han visto cómo la carga lectiva de sus asignaturas disminuía drásticamente y han tenido que orientar todas sus investigaciones experimentales casi exclusivamente a medidas de radiactividad. Incluso en alguna universidad se llegó a aprobar en claustro la prohibición de realizar investigaciones en tecnología nuclear. España llegó a tener un centro de investigación con un reconocido prestigio internacional: La Junta de Energía Nuclear (JEN) prácticamente desmantelada como centro de investigación nuclear<sup>1</sup>. En la construcción de las últimas centrales en España la participación de las empresas españolas llegó a ser el 90%. Desde finales de los años 80 del pasado siglo ha asistido a una pérdida progresiva del potencial tecnológico (“know-house”) que tantos años y dinero había llevado conseguir. Científicos y técnicos de un altísimo nivel fueron desaprovechados. Esta situación no es sólo española, se da

en gran parte de la UE. Aunque de menor escala, la situación es similar a la ocurrida con la tecnología espacial de la desaparecida Unión Soviética.

La energía nuclear constituye una de las formas de generación de energía eléctrica (aunque tiene otros posibles usos). La energía eléctrica viene a ser del 20% al 30 % de las necesidades energéticas totales de un país desarrollado. Se estima que en los próximos 20 años el consumo de energía eléctrica en el Mundo aumentará en torno al 50%. Además habrá que hacer frente a la sustitución de instalaciones obsoletas por otras menos contaminantes. Las alarmas han saltado en EE UU y en la Unión Europea cuando se ha comprobado que los problemas de desabastecimiento energético son una realidad que puede verse agravada en un próximo futuro. La cuestión que se plantea es con qué opciones realistas de producción de electricidad se dispone para hacer frente a este reto. En la UE las nuevas instalaciones que se están construyendo suelen ser de gas de ciclo combinado. Es arriesgado confiar en un grado demasiado elevado a esta fuente por varias razones: a) son productoras de CO<sub>2</sub> (0,4 kg por kilowatio-hora), aunque menos que el carbón y el petróleo, en este sentido sustituir centrales de carbón o fuel por gas reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> , b) Las reservas de gas, al igual que el petróleo, está localizada en muy pocos países, c)

---

<sup>1</sup> Historia Nuclear de España. Editor Rafael Caro. Sociedad Nuclear Española.

La UE produce mucho menos gas del que consume, d) Variaciones en el precio del gas, su precio se duplicó en los años 2000 y 2001, afectan directamente al precio del kilowatio-hora. Las energías renovables, en las que tantas esperanzas habían puesto algunos, no es previsible que en la UE lleguen a alcanzar el 15% de producción eléctrica de origen eólico, solar y de biomásas dentro de 15 años. Estos hechos están haciendo que se replantee la conveniencia de seguir considerando esta fuente de energía para el futuro. Así lo recomienda el libro verde de la UE sobre el futuro del abastecimiento energético.

En el Mundo existen unos 440 reactores en funcionamiento y 30 en construcción, la mayoría en Asia. Estas instalaciones se concentran principalmente en países desarrollados. El 34% de la producción eléctrica de la UE es nuclear, aunque entre países fluctúa enormemente: el 80% en Francia, el 28% en España y el 0% en Italia o Austria.

En EE UU y en la UE, con la excepción de Francia, prácticamente no se ha construido ninguna central en los últimos quince años (las últimas autorizaciones de construcción se dieron a finales de los 70, y se construyeron en los 80 del siglo XX). De esto las causas más importantes fueron: a) el crecimiento de la demanda eléctrica fue menor al previsto, b) el precio del petróleo se estabilizó en la década de los 80 y 90, c) el negativo impacto popular del accidente de Harrisburg ocurrido en 1979, el primero importante de la industria civil, y el de Chernobil, d) la presión de los grupos antinucleares (centrales casi acabadas podían ser paralizadas o dilatada su construcción sin razones técnicas para ello) y e) los altos tipos de interés de la época.

Analizado con rigor, las centrales nucleares occidentales se han mostrado

muy seguras: el único accidente importante fue el de Harrisburg, no tuvo ningún efecto sobre la población, aunque inutilizó la central –con el enorme coste que ello supuso- e hizo endurecer en el mundo occidental extraordinariamente los requisitos de seguridad para la instalación de nuevos, incrementando mucho el precio de las centrales. Los reactores occidentales de diseños posteriores se mostraron muy fiables. El accidente en 1986 de Chernobil (Ucrania, ex URSS), fue muchísimo más grave. Se trataba de un diseño de reactor intrínsecamente inseguro: el núcleo del reactor contenía grafito y agua, que si entraba en ebullición podía generar una autentica explosión como ocurrió, además carecía de edificio de contención lo que provocó una liberación a la atmósfera de una parte importante de las sustancias radiactivas del núcleo. Su diseño nada tenía que ver con los reactores occidentales, pero esta distinción no se transmitió al público. Las consecuencias fueron desastrosas, aunque dieciséis años después sus efectos han sido mucho menos de los especulaciones iniciales. El informe publicado sobre el tema por las Naciones Unidas (<http://www.ans.org/pressrelease.htm>), con motivo de los 15 años del accidente, indica que los muertos comprobados son menos de un centenar, y 1800 niños enfermos de cáncer de tiroides, sin evidencias de otros tipos de cánceres. Unas 150 000 personas están sometidas a una vigilancia médica continua sin que se haya observado efectos apreciables.

A pesar de que apenas se hayan construido nuevos reactores en Occidente en los últimos quince años, la producción nuclear no ha dejado de crecer hasta el punto que en este periodo en España la producción nuclear ha aumentado en más del 25%. Una situación similar se ha dado en otros países de la UE y en EE UU.

Este país dispone de 103 reactores, el aumento de energía suministrado por los mismos en los últimos 10 años es equivalente a la instalación de 23 nuevos reactores. Todo esto ha favorecido la competitividad de las centrales nucleares. En España el coste medio del kilowatio-hora en 2001 fue de 3 céntimos y el coste nuclear se estima que es de 2 céntimos, situándola, después de la hidráulica, como la fuente más competitiva. Varias son las razones que han hecho esto posible: a) el combustible nuclear ha mejorado considerablemente (en la actualidad se obtiene por kilo de uranio, que es el combustible utilizado en las centrales nucleares, más del 30% de energía que hace 15 años, lo que origina otra mejora añadida: el volumen de residuo disminuye), b) el ciclo entre recargas –inserción de combustible nuevo en el reactor- se ha alargado y el tiempo en el que se realiza la recarga ha disminuido. Hace quince años las recargas eran anuales, ahora suelen oscilar entre año y medio y dos años. La duración en la que se realiza está operación, en la que el reactor está inoperativo, ha pasado de más de dos meses a menos de tres semanas, c) las paradas imprevistas se han reducido drásticamente (p.j: los reactores de EE UU paraban en 1990 por distintas causas dos veces por reactor y año, ahora es la décima parte), d) se han renovado algunos componentes críticos de la central mejorando el rendimiento y permitiendo aumentos de potencia de hasta el 10%. Estos hechos han originado que en un país como EE UU, que se rige por las leyes del mercado, el precio del kilowatio-hora nuclear que era en media ligeramente más caro que el de carbón (la fuente mas barata en dicho país) haya pasado para la mayoría de las centrales a ser claramente más competitivo.

Las previsiones para los próximos años respecto al uso de la energía nuclear varían según países. Dentro de la UE no existe una política energética unificada. Hay países que directamente declaran que no van a construir nuevas centrales, y ponen una fecha de cierre a las actuales, aunque tan alejadas en el tiempo que las decisiones de cierre las dejan para que las tomen otros gobernantes, y no tienen inconveniente en importar energía nuclear de centrales situadas en sus fronteras. Incluso algunos, como Finlandia, anuncian que relanzaran sus programas en breve. Fuera de la UE algunos países como Japón, Taiwán y China mantienen en la actualidad programas de construcción de nuevas centrales. En EE UU los objetivos inmediatos consisten en mejorar el rendimiento, aumentar la potencia de los existentes en 10 gigawattios (equivale a 10 nuevos reactores), y extender la vida de los reactores existentes hasta 60 años (algunas centrales americanas llevan casi 40 años en operación, que era la vida inicialmente prevista). El plan Bush propone construir 50 nuevos reactores en los próximos 20 años. La decisión final de construir nuevas centrales corresponde a la industria privada que en estos momentos lo estudia. Es muy probable que si en un plazo breve EE UU reinicia la construcción de nuevos reactores gran parte de los países desarrollados le seguirán.

Un tema fundamental en la decisión de relanzar la industria nuclear es las características de los nuevos reactores. Casi todos los reactores nucleares en operación en la actualidad son de los denominados de agua ligera de segunda generación, derivados directos de los diseños que en los años 50 y 60 del siglo XX se hicieron para los submarinos nucleares norteamericanos, que utilizan como combustible el uranio y como

refrigerante agua. Esto fue así pues permitió un trasvase directo de esta tecnología para su aplicación civil con un gasto de investigación relativamente pequeño. Otro reducido número de reactores son del modelo RBMK, construidos en la antigua URSS con el doble fin de generar energía eléctrica y permitir, si se deseaba, obtener plutonio de grado militar. A este modelo correspondía el tristemente celebre reactor de Chernobil. Está claro que estamos en la infancia de una forma de energía. Para los nuevos reactores que se construyan los cambios que se produzcan no serán drásticos. Seguirán basándose en la fisión nuclear utilizando el uranio (elemento abundante, distribuido por muchos países, y sin otros usos importantes conocidos) como combustible. Existe un consenso entre los expertos sobre de cuales deben ser las características de esta nueva generación de reactores.

- a) Aumento de la seguridad basado en el empleo de sistemas de refrigeración pasiva y en diseños más simples.- En los reactores actuales la refrigeración de reactor se consigue, incluso en caso de accidente, mediante el empleo de refrigeración activa con bombas. La idea, incorporada ya en algunos reactores en construcción, consiste en que un reactor llegue a una situación de parada segura refrigerado por convección natural. En el peor de los casos el reactor internamente quedaría inutilizado pero no produciría una dispersión significativa de partículas al exterior.
- b) Mayor rentabilidad mediante la reducción de los periodos de construcción a menos de 5 años, empleo de componentes estandarizados, elevados factores de carga (tiempo de funcionamiento del

reactor a potencia máxima) y del rendimiento.

- c) Reducción del volumen de residuos aumentando el quemado del combustible (obtención de mayor energía por tonelada de uranio). A largo plazo, el reciclado del combustible puede contribuir a la reducción drástica de los residuos considerados más peligrosos.
- d) Aplicación de una normativa común.- La disparidad de las normativas nucleares entre estados, incluso regionales, complica y encarece innecesariamente cualquier proyecto nuclear. Esto ha sido la causa de muchos fracasos económicos en el pasado.

La mayoría de los nuevos diseños se basan en introducir mejoras reactores de agua ligera. Este tipo de reactores ha demostrado una altísima fiabilidad. En esta línea compiten tres tipos de reactores que ya tienen certificación genérica de diseño por parte de la NRC (organismo regulador de EE UU). A estos se ha unido otro proyecto muy interesante, de diseño más radical. Se trata de la construcción, en Sudáfrica, de un reactor modular refrigerado por gas helio de lecho granulado. Estos gránulos consisten en partículas de uranio incrustada en unos bolas de carburo de silicio de unos 10 cm de diámetro que irían mezcladas con bolas de grafito sin uranio. El combustible podrá ser introducido y sacado del reactor de forma continua, evitando paradas para recargar el reactor. El gas alcanzará temperaturas elevadas (900 grados frente a los 300 grados típicos de una central de agua ligera) lo que permitirá rendimientos superiores a los que utilizan agua como refrigerante. En ausencia de refrigeración la temperatura del reactor no sobrepasaría la de fusión del material cerámico que

constituye el combustible y las paredes del núcleo. La central estaría formada por un conjunto de minireactores de 120-140 megawattios (comparable al de Zorita) cada uno. Los primeros estarían disponibles en tres años de construcción. Sucesivos reactores se irían añadiendo al conjunto de la central en función de la demanda. La construcción de un reactor de este tipo la pretende realizar un consorcio formado por una empresa Sudafricana, la inglesa BNFL y otra norteamericana. El objetivo es que el primer prototipo esté operativo en el año 2006.

A un plazo medio se podrán disponer modelos más avanzados, denominados genéricamente de cuarta generación. Algunos incluyen la opción de generar hidrógeno que podría ser utilizado como combustible para otros fines, por ejemplo en pilas combustibles. Los reactores denominados de espectro rápido permitirían un reciclado del combustible. Hay propuestas más atrevidas como la del premio nobel Carlos Rubia que propone utilizar aceleradores de partículas que, además de generar electricidad, permitirían destruir los residuos radiactivos más peligrosos. A más largo plazo se mantiene la opción de la siempre prometida energía de fusión, pero hasta entonces habrá que aprovechar lo que ha demostrado que funciona.

La generación de electricidad empleando combustibles fósiles, además de emitir CO<sub>2</sub>, acabará por quemar en

pocas generaciones lo que a la naturaleza le llevo años fabricar, además estos materiales pueden tener destinos muchos mas provechosos que el ser quemados. Las energías renovables tampoco son la panacea, limitaciones físicas (baja de densidad de energía por superficie, supeditación a las condiciones meteorológicas, etc.) hacen que su potencial de crecimiento sea limitado. En estos momentos realmente no se dispone de una fuente de energía absolutamente limpia y segura que garantiza la demanda energética de los próximos decenios, especialmente, si como es deseable, se produce un crecimiento económico en el 80% de la Humanidad que sólo consume el 20% de la energía. Es un problema que hay que afrontar desde distintos frentes. El uso de energía nuclear es una de los instrumentos para afrontar este reto. Mucho más si reactores más avanzados eliminan o reducen los problemas que tiene esta fuente de energía.

#### **Bibliografía.:**

Una de las mejores fuentes sobre datos energéticos es la web de la British Petroleum (<http://www.bp.com>)

El mejor sitio de partida para obtener información sobre energía nuclear es <http://www.nucleartourist.com/>

La web de la sociedad nuclear española <http://www.sne.es>

Para el ciclo del combustible nuclear puede consultarse: Uranio: Mitos y realidades. Guillermo Sánchez. Mundo Científico nº 223

---



---

**Recuadro I: Los residuos radiactivos**

La crítica que con más fundamento recibe la energía nuclear es que genera residuos radiactivos, en particular los llamados de alta actividad. Para entender el problema hay que dimensionarlo correctamente. Una reactor nuclear de 1000 megawatios (suficiente para abastecer una ciudad de millón y medio de habitantes) produce al año unas 20 toneladas de este tipo de residuos. El conjunto de los reactores españoles menos de 150 toneladas al año. Esto debe compararse con los 300 millones de toneladas que anualmente se emiten, sólo en España, a la atmósfera como CO<sub>2</sub>. Todos los residuos previstos generar en las centrales españolas hasta el 2020 cabrán en un volumen equivalente a una piscina olímpica. En nuestro recibo de la luz pagamos un canon que recibe ENRESA para en el futuro se deshaga de ellos y afronte el desmantelamiento de las centrales que queden obsoletas. El combustible irradiado o gastado, que es lo que en actualidad consideramos como residuos de alta actividad, se mantiene almacenado en piscinas en las propias centrales conservando todavía gran cantidad de energía. De hecho, de las 20 toneladas por reactor y año menos sólo media tonelada es realmente residuo. El resto es recuperable y reutilizable de nuevo como combustible. Esto puede verse en la tabla adjunta. Salvo una pequeña parte (menos de 20 kg por tonelada), el resto del material es reutilizable recuperando el uranio y el plutonio.

**Isótopos mas significativos presentes en 1 t de combustible gastado**

(Enriquecimiento inicial 3,5% y un quemado de 33 000 MWd/tU. Cantidades 3 años después de haber sido sacado del reactor)

Nucleido	Cantidad
----------	----------

Uranio 238	942,8 kg
Uranio 235	9 kg
Uranio 236	4,3 kg
Plutonio 239	5,2 kg
Plutonio 240	2,1 kg
Plutonio 241	1 kg
Neptunio 237	0,48 kg
Americio 241	0,21 kg
Cesio 137	1,1 kg
Estroncio 90	0,51 kg

Algunos países (ej.: Francia, Reino Unido y Japón) ya lo hacen, si bien a los precios actuales es preferible utilizar directamente uranio de mina y enriquecerlo que reciclar el combustible. Pero incluso el reciclado el combustible e introducido de nuevo en el reactor, aún continuará conteniendo transuránidos (plutonio, neptunio y americio). Para este material existe la opción de someterlo a un flujo de neutrones, mediante el empleo de aceleradores de partículas, que lo desintegraría en su mayor parte. Est tecnología está en fase muy primitiva de desarrollo, pero es bastante esperanzadora. Por estas razones no parece urgente la instalación de un almacenamiento subterráneo profundo. En todo caso, el diseño de estos almacenes debe contemplar la posibilidad de recuperar los residuos con el fin de someterlo a las tecnologías que estén disponibles en unas decenas de años. La existencia de los residuos radiactivos no es un problema exclusivo de la industria nuclear civil y militar, aunque la mayoría, con mucho, tiene este origen. También forma parte de numerosas aplicaciones médicas, industriales, etc. Por lo que a la existencia de residuos radiactivos debemos asumirlo como una parte del desarrollo. Lo que hay que procurar es que las cantidades producidas sean mínimas y perfectamente controlada (y esto es válido para cualquier tipo de residuo, y no sólo los radiactivos).

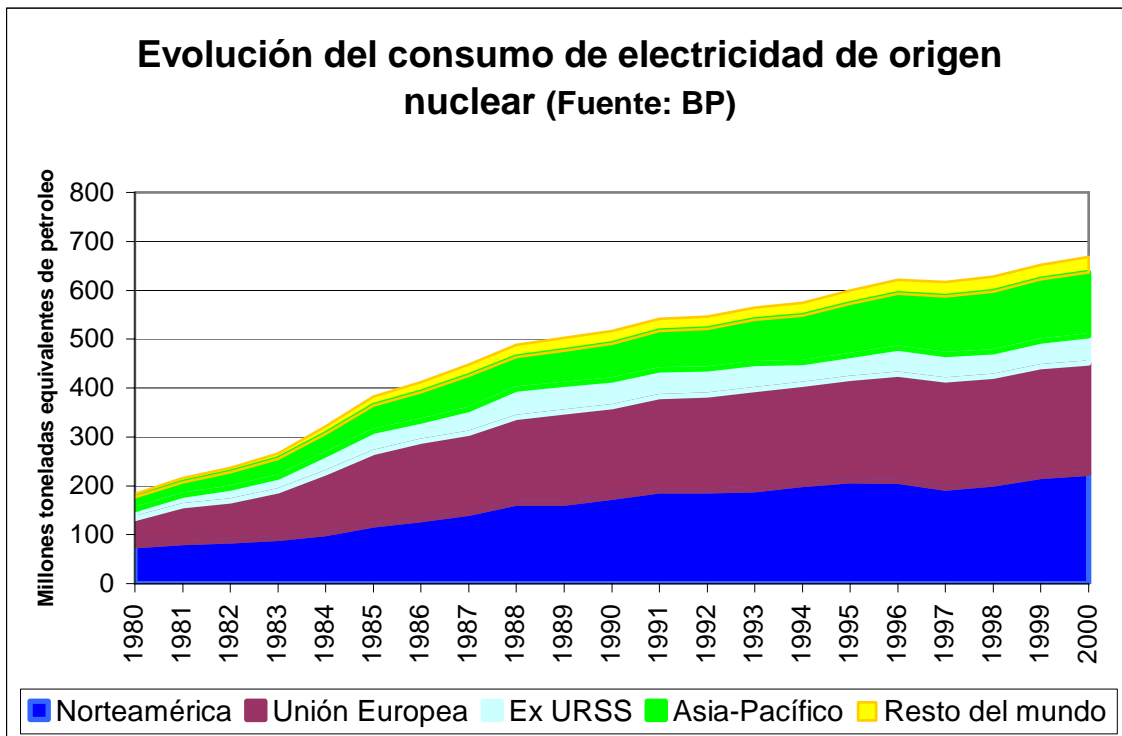
**Recuadro II: Las energías renovables**

Se han puesto muchas esperanzas en las denominadas energías renovables. Se le está prestando un gran apoyo económico (en nuestro recibo de la luz pagamos un sobre coste del 7% con este fin), y a la hora de conectarse a la red eléctrica tienen preferencia a un precio asegurado mucho mayor que las fuentes clásicas. Hay que ser conscientes de sus limitaciones. Además del coste presentan el grave inconveniente de depender de las condiciones meteorológicas. No es posible tener una garantía de suministro cuando se depende de la velocidad y dirección con la que sopla el viento o de la nubosidad. Tampoco están libres de causar un impacto ambiental indeseable.

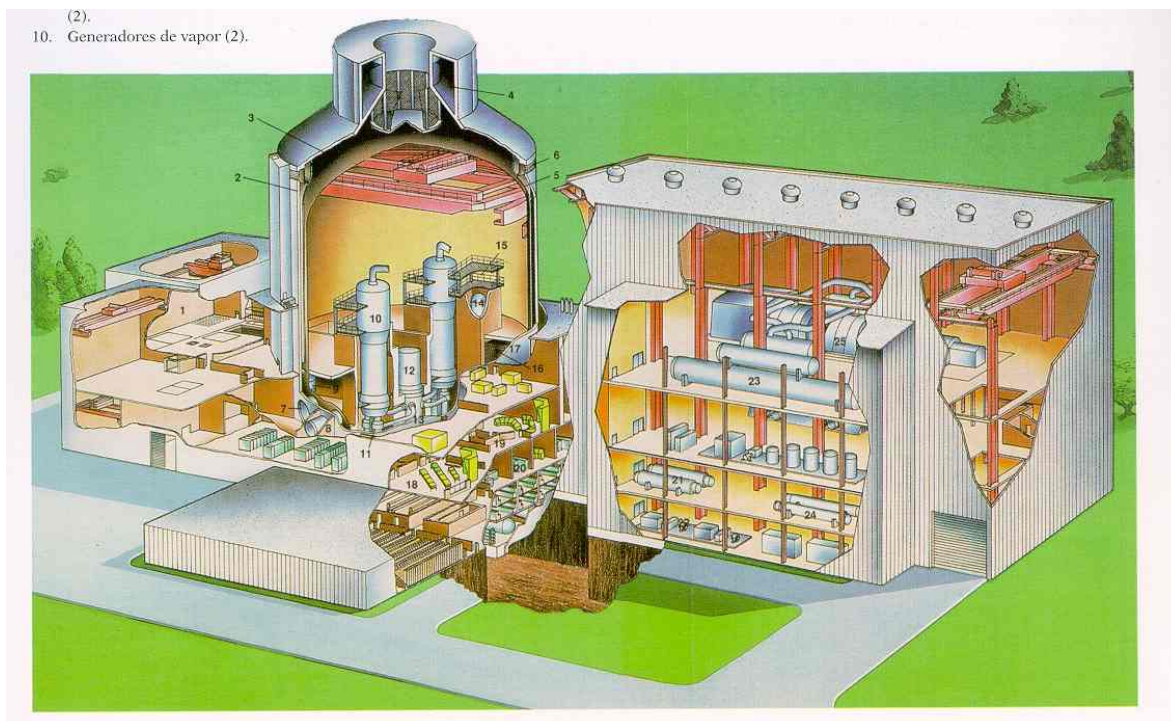
Requiere grandes espacios de terreno (se necesitaría un espacio mayor al ocupado por las tierras cultivadas para toda la energía mundial fuese de origen solar o eólico). Incluso no está claro que la construcción de grandes parques eólicos, carezca de impacto climático (Por ejemplo: al pasar el viento a través de un aerogenerador su velocidad se ve frenada a la tercera parte. Para un número no muy elevado de generadores esto puede carecer de importancia pero no sabemos que ocurriría con barreras de centenares de kilómetros de ellos). Es razonable considerar a las energías renovables como una fuente complementaria importante en la generación de electricidad pero es difícil imaginar que lleguen a alcanzar un contribución elevada.

Tabla 1.- Isótopos mas significativos presentes en 1 t de combustible gastado (Enriquecimiento inicial 3,5% y un quemado de 33 000 MWd/tU. Cantidades 3 años después de haber sido sacado del reactor)

Isótopo	Cantidad	Isótopo	Cantidad	Isótopo	Cantidad
Uranio 238	942,8 kg	Plutonio 239	5,2 kg	Neptunio 237	0,48 kg
Uranio 235	9 kg	Plutonio 240	2,1 kg	Americio 241	0,21 kg
Uranio 236	4.3 kg	Plutonio 241	1 kg	Cesio 137	1,1 kg
				Estroncio 90	0,51 kg



*El aumento de eficiencia de las centrales nucleares existentes ha hecho que siga creciendo la electricidad de origen nuclear, aunque se construyan muy pocos reactores desde hace años.*



**Central de nueva generación (modelo AP-600), en la que el enfriamiento del núcleo, en caso de accidente, se realiza por convección natural (sin necesidad de refrigeración forzada).**  
**Título: Central de nueva generación (modelo AP-600), en la que el enfriamiento del núcleo, en caso de accidente, se realiza por convección natural (sin necesidad de refrigeración forzada).**

1.- Area de manejo de combustible.	14.- Presionador.
2.- Blindaje de hormigón.	15.- Area del módulo válvula de alivio de presión.
3.- Contención metálica.	16.- Cambiadores pasivos de evaluación del calor residual.
4.- Depósito de agua de refrigeración de la contención pasiva.	17.- Depósito de almacenamiento de agua de recarga.
5.- Placas desviadoras del aire de refrigeración de la contención pasiva.	18.- Centro de apoyo técnico.
6.- Entrada de aire de refrigeración.	19.- Sala de control.
7.- Esclusas de equipos (2).	20.- Cabinas del sistema integrado de protección.
8.- Esclusas de personal (2).	21.- Calentadores de agua de alimentación.
9.- Depósitos de aporte al reactor (2).	22.- Bombas de agua de alimentación.
10.- Generadores de vapor (2).	23.- Desaireador.
11.- Bombas de refrigeración del reactor (4).	24.- Calentadores de agua de alimentación de baja presión.
12.- Tapa integrada del reactor.	25.- Turbogenerador.
13.- Vasija del reactor.	