

## **La dependencia energética del bienestar: estrategia para la reducción de los residuos radiactivos.**

Manuel Fernández-Ordóñez y Francisco Álvarez Velarde

Doctores en Física Nuclear y especialistas en ciclos de combustible nuclear y reactores subcríticos.

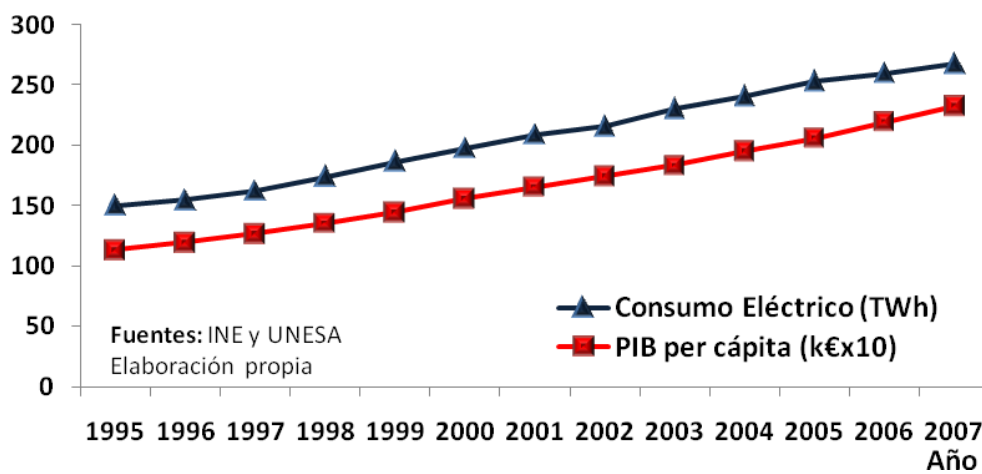
La sociedad europea, en general, se halla inmersa actualmente en un cambio de tendencia en lo concerniente a la energía nuclear, virando paulatina y ligeramente a posiciones favorables a la misma. En España, del mismo modo, el estancamiento social en posiciones antinucleares está comenzando a evolucionar hacia posturas más racionales como claramente demuestran los datos tanto de los últimos eurobarómetros como de los medios de comunicación e incluso nuestra propia percepción social. Esto no hace sino corroborar la sospecha de que la sociedad española no tenía una posición claramente antinuclear, sino más bien una posición de indiferencia que, dada la actual realidad social, económica y energética está comenzando a abandonar.

Podríamos describir la realidad, de una manera en absoluto irrealista, como sigue: la era del petróleo barato ha terminado, si bien el precio del crudo ha descendido en los últimos meses, la escalada de precios del mismo no indica sino los primeros síntomas en su escasez. La energía será cada vez más cara, con las consecuencias que ello implica. España, en particular, importa el 85% de la energía que consume, dependiendo de países como Argelia o Arabia Saudí. Este hecho hará que la industria española sea cada vez menos competitiva con respecto a aquellos países con menor dependencia exterior (como Francia), lo cual a su vez se traducirá en precios cada vez más altos (aumento de la inflación), en un incremento de la tasa de desempleo y un descenso de la capacidad de producción, es decir, del PIB, que se traduce directamente en un decrecimiento de nivel de bienestar social. Todos estos factores son las desencadenantes del panorama económico mundial al que estamos asistiendo y que no ha hecho más que comenzar.

Hay un hecho incuestionable y fundamental, necesitamos energía para vivir. Nuestra sociedad necesita energía para funcionar, para crear empleo y riqueza. Necesita energía para ser dotada del dinamismo necesario que la haga competitiva en los mercados. Pero hay otro hecho empírico que, si cabe, tiene una mayor relevancia, podría incluso considerarse un principio: *“El nivel de bienestar de una sociedad depende directamente de la cantidad de energía que consume”*. Esto ha sido así a lo largo de la Historia (especialmente desde la Revolución Industrial) y después de la II Guerra Mundial ha marcado la pauta de los países industrializados hasta tal punto que no conocemos ningún país que haya sido capaz de desarrollarse sin consumir grandes cantidades de energía.

Este hecho, cuestionado por la práctica totalidad de asociaciones ecologistas –que proclaman que el crecimiento no está ligado al consumo energético- puede demostrarse de forma trivial analizando los datos macroeconómicos de España, mostrados en la figura 1. En esta gráfica se muestra la evolución del PIB per cápita español en el periodo 1995-2007, así como la evolución

del consumo de energía eléctrica en el mismo periodo. Los datos han sido extraídos del Instituto Nacional de Estadística (INE) y la Asociación Española de la Industria Eléctrica (UNESA). Hay un gran acuerdo entre los economistas en considerar el PIB per cápita como un indicador del nivel de crecimiento y bienestar de una economía y, en la figura 1, podemos observar cómo la evolución del mismo está estrechamente relacionada con la cantidad de energía que consumimos. Estos datos son, dentro de la racionalidad, irrefutables e indican que, en un sistema económico estable, no se puede crecer sin consumir energía. Cualquier afirmación en la dirección contraria o bien no se fundamenta en ningún tipo de dato mensurable o bien se mueve en el terreno de la irracionalidad, estando ambas posibilidades lejos de merecer cualquier atención. La gráfica permite la siguiente lectura: *“No consumimos energía porque somos ricos, sino que somos ricos porque consumimos energía”*. Análisis similares pueden hacerse para cualquier país industrializado, siendo especialmente remarcable el caso de China.

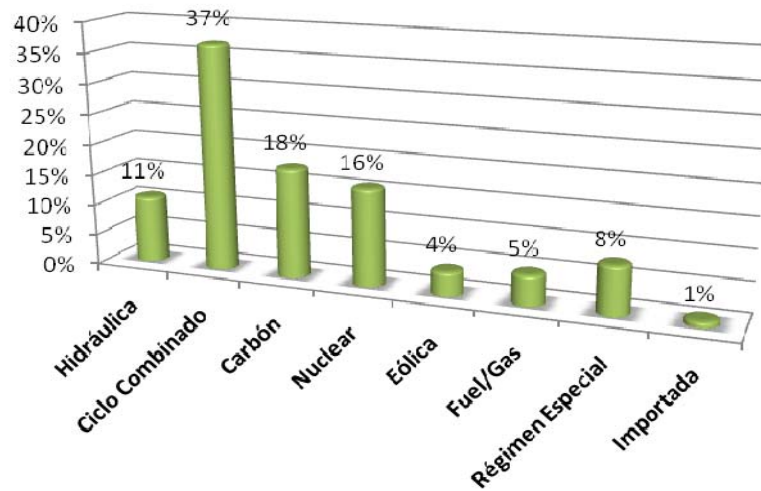


**Figura 1:** Evolución histórica del consumo de energía eléctrica y del producto interior bruto per cápita españoles en el periodo 1995-2007. Fuentes: Asociación Española de la Industria Eléctrica (UNESA) e Instituto Nacional de Estadística (INE).

Ha quedado por tanto establecida la necesidad de energía para mantener nuestro actual nivel de bienestar, pero no cualquier fuente de energía es válida. Tiene que cumplir ciertas características que la hagan atractiva, ha de ser competitiva económicamente, respetuosa con el medio ambiente y estar siempre disponible. La competitividad de las industrias, el cumplimiento del protocolo de Kioto y la seguridad de suministro son las piedras angulares de cualquier forma de producción energética.

Cuando se trata del sistema económico y del bienestar social, el pragmatismo debe tener un porcentaje elevado en la toma de decisiones. Es importante aclarar que ninguna fuente energética compite con las demás ya que tienen distintos ámbitos de operación y todas las convencionales son absolutamente necesarias. La clave está en una cartera energética diversa y equilibrada, capaz de responder a las necesidades del sistema en todo momento. Conviene huir, por tanto, de debates estériles y enfrentamientos al uso entre defensores y detractores de los distintos tipos de energía. Prescindir de cualquier fuente de energía disponible nos parece una frivolidad que no podemos permitirnos en modo alguno. Tomemos como ejemplo el día de máxima demanda eléctrica del pasado año, el 17 de diciembre de 2007 entre las 19 y

las 20 horas. ¿Qué fuentes de energía estaban abasteciendo la demanda española en ese momento? Observemos la figura 2.



**Figura 2:** Porcentaje en la producción de energía eléctrica para cada una de las fuentes el día de máxima demanda del año 2007, el 17 de diciembre, entre las 19 y las 20 horas.

A la vista de estos datos, ¿alguien piensa que podemos en realidad prescindir de la generación eléctrica con gas, carbón o nucleares? ¿Alguien cree seriamente que podemos basar el sistema eléctrico español únicamente en energías renovables? Eso no significa, en absoluto, que debamos prescindir de dichas fuentes de energía, ya que habrá momentos en los que proporcionen cantidades apreciables de electricidad. Simplemente significa que estas fuentes dependen de factores climatológicos y no aseguran la demanda del sistema en todo momento siendo, por tanto, poco fiables. Las demás fuentes de energía tienen también sus problemas, como la emisión de gases de efecto invernadero penalizada por el protocolo de Kioto en el caso del carbón y los ciclos combinados, la dependencia exterior del gas natural o el tratamiento de los residuos radiactivos y el futuro agotamiento del uranio por parte de la energía nuclear.

En el caso particular de la energía nuclear, el camino hacia su sostenibilidad pasa por dos hitos fundamentales: conseguir un mejor aprovechamiento de los recursos naturales de combustible y el tratamiento de los residuos radiactivos. Del primero de ellos ya hablamos en un artículo anterior en el cual se describieron los reactores rápidos, que son capaces de utilizar la totalidad del uranio natural y no únicamente el isótopo  $^{235}\text{U}$ , cuya abundancia relativa es del 0.7%. El uso de estos reactores aseguraría el abastecimiento de uranio para los próximos 3000-4000 años. Es obvio mencionar que cuatro mil años es un periodo más que razonable para considerar una fuente de energía como sostenible.

En lo concerniente al tratamiento de los residuos radiactivos, la comunidad científica internacional lleva años haciendo grandes esfuerzos que comienzan a cristalizar en colaboraciones internacionales como los proyectos de investigación en almacenamientos geológicos profundos (AGP), en reactores de IV generación o en reactores subcríticos asistidos por acelerador (ADS). Estos proyectos, que serán realidad en un futuro próximo, cuentan ya con algunos prototipos en construcción. Tenemos por delante, sin duda, un futuro

esperanzador. Sin embargo, no es necesario esperar al futuro para comenzar a tratar los residuos radiactivos de que ya disponemos en nuestras centrales nucleares. Podemos hacerlo mediante procesos que son ya una realidad y están en uso en otros países.

### **Nuevos tipos de combustible: el MOX.**

Las centrales nucleares convencionales (como las que tenemos en España) utilizan como combustible óxido de uranio ( $\text{UO}_2$ ) enriquecido aproximadamente al 3.5% en  $^{235}\text{U}$ . Este isótopo del uranio, que es el verdadero combustible del reactor permitiendo a éste mantener la reacción de fisión en cadena, se encuentra en el uranio natural que se extrae de las minas en una concentración del 0.7%. Es necesario, por tanto, efectuar un proceso de enriquecimiento donde se pasa del 0.7% al 3.5% de concentración.

Una vez quemado en el reactor nuclear, el combustible se saca del mismo y, en el caso de España, se deja en las piscinas de combustible de las propias centrales nucleares hasta que los responsables políticos españoles decidan finalmente cuál es la gestión adecuada para el combustible gastado. Otros países, sin embargo, han optado por estrategias ligeramente más inteligentes -honestamente, casi cualquier cosa es más inteligente que no hacer nada-. Así, diversos vecinos como Francia o Alemania han optado por utilizar parte del potencial energético que tiene el combustible gastado. Aquí se llama residuo radiactivo, allí se llama materia prima, como veremos a continuación.

Un reactor nuclear se carga con unas 80 toneladas de óxido de uranio. Este combustible se “quema” durante cuatro años dentro del reactor al cabo de los cuales se han generado aproximadamente 0.6 toneladas de plutonio. El plutonio, desde el punto de vista energético, tiene unas propiedades muy parecidas a las del  $^{235}\text{U}$  y podría, por tanto, plantearse la posibilidad de fabricar combustible de óxido de uranio y plutonio enriquecido en plutonio en lugar de  $^{235}\text{U}$ . Este combustible se conoce como MOX (Mixture plutonium uranium OXide) y se viene usando desde hace muchos años en Francia, Alemania, Bélgica, Suiza y se planea utilizar en otros países de la Unión Europea. El uso de este combustible tiene una doble finalidad: por un lado no es necesario seguir utilizando el  $^{235}\text{U}$  que escaseará en el futuro y, por otro lado, se van utilizando las existencias de plutonio. Es decir, somos capaces de ir consumiendo lo que en la actualidad se consideran residuos radiactivos (en España) a la vez que producimos electricidad con ellos.

### **Nuevos tipos de reactores de III generación: el EPR.**

Si bien es técnicamente viable que las centrales españolas actuales, con ligeras modificaciones, utilicen MOX como combustible (así lo hacen las centrales de agua ligera a presión PWR de varios países europeos), existe un nuevo tipo de reactor en el mercado optimizado para el uso de combustible MOX: el reactor EPR.

Se trata de un reactor de agua a presión de 1600 MW eléctricos de construcción francesa. Tiene un coste aproximado de 3500-4000 millones de euros y actualmente existen dos unidades en construcción, Olkiluoto-3 en Finlandia y Flamanville-3 en Francia. Otros dos reactores de este tipo están ya contratados para su construcción en Taishan 1 y 2 en China y

en EEUU se han presentado dos solicitudes de construcción ante el Departamento de Energía y otras cinco están en trámite.

Este nuevo reactor posee unos avances claros con respecto a los actuales de II generación, que provienen precisamente de la experiencia adquirida en la explotación de los mismos:

- Cuatro lazos de refrigeración del núcleo del reactor, siendo cada uno de ellos capaz de refrigerar el núcleo por sí mismo. Es decir, una redundancia en seguridad del 300%.
- La vasija del reactor tiene un segundo contenedor refrigerado en caso de que, ante una improbable fusión de núcleo (probabilidad de  $10^{-7}$ ), se consiga traspasar la vasija (lo que sucedió en TMI-2 en 1979).
- El edificio de contención tiene una doble capa de hormigón de 2.6 m de espesor diseñado para resistir el impacto de un avión comercial.

La construcción del primero de estos reactores en Finlandia está sufriendo retrasos significativos propios de la construcción de un prototipo que siempre tienen lugar en cualquier tipo de industria. La experiencia de construcción asegurará un cumplimiento de los plazos de tiempo en futuros proyectos, que se estiman en torno a los 5 años.

### **Caso español: ampliación de vida de las centrales y construcción de reactores EPR de III generación.**

Las centrales nucleares tienen una licencia de explotación de 40 años. Este límite temporal no tiene relación alguna con la seguridad de las mismas ni con las limitaciones de la tecnología nuclear, sino que se estableció en los años 60 por motivos puramente económicos relacionados con el plazo de amortización de los préstamos necesarios para la construcción de las centrales. En principio, no existe ninguna limitación técnica que impida a las centrales nucleares seguir operando de forma segura más allá de los 40 años y, de hecho, en EEUU se han otorgado renovaciones de licencia por 20 años adicionales a la mitad de los 104 reactores nucleares que poseen, mientras que existen otras 12 solicitudes en proceso de evaluación.

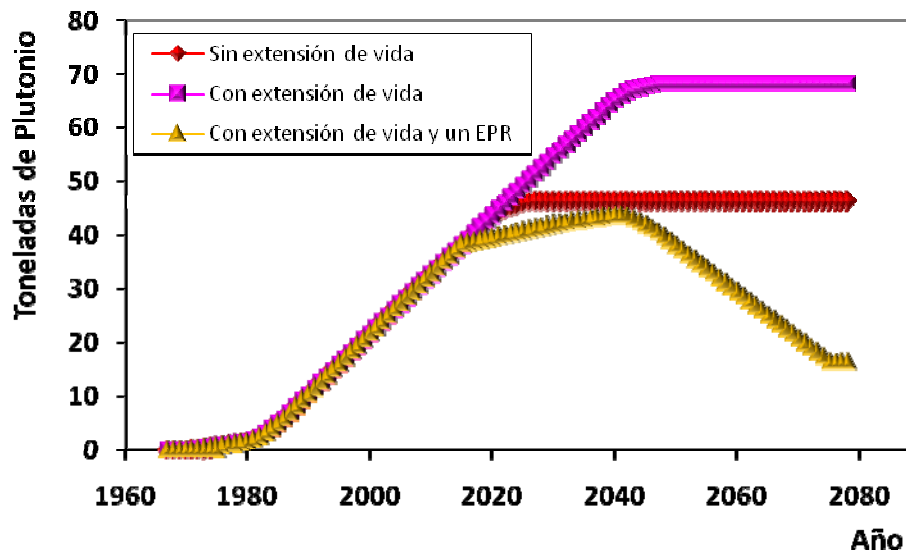
En la tabla 1 podemos ver una relación de la potencia eléctrica de los distintos reactores nucleares españoles, junto con la fecha del final de sus permisos iniciales de explotación de 40 años. Podemos observar que el grueso de los reactores nucleares de nuestro parque concluirá su ciclo inicial de 40 años en los años 20 de este siglo. En base a los datos de operación de las centrales, hemos realizado unos modelos de simulación que pretenden estimar, de forma aproximada, cuál será la cantidad de plutonio presente en el parque español después del cierre del último de nuestros reactores y algunas de sus posibles formas de gestión. Los cálculos de este modelo se han realizado teniendo en cuenta los factores de carga aproximados de cada reactor y las propiedades de quemado del combustible nuclear. Hemos utilizado para ello códigos específicos comúnmente empleados por los especialistas para predecir el inventario de actínidos en reactores nucleares de agua ligera.

Reactor	Potencia (MWe)	Año de Cierre
Vandellós I	500	1989
José Cabrera	150	2006
S <sup>a</sup> M <sup>a</sup> de Garoña	466	2010
Almaraz I	977	2020
Ascó I	1032	2020
Ascó II	1027	2022
Almaraz II	980	2022
Cofrentes	1095	2023
Vandellós II	1087	2026
Trillo	1066	2027

**Tabla 1:** *Potencia de los reactores nucleares españoles y año en el que expira su licencia de explotación. La central de Vandellós I fue clausurada en 1989 debido a un incendio en la sala de turbinas, mientras que la de José Cabrera fue clausurada en 2006 al alcanzar los 40 años de vida.*

Los resultados de estas simulaciones pueden verse gráficamente en la figura 3. En rojo podemos ver la evolución de la cantidad de plutonio en una estrategia como la que tenemos en la actualidad, es decir, con una vida de las centrales nucleares de 40 años y nada previsto para la gestión de los residuos. Como podemos observar, a día de hoy, existen aproximadamente 30 toneladas de plutonio almacenadas en las piscinas de combustible de las centrales. Estimamos que después del cierre de la central nuclear de Trillo, en el año 2027, la cantidad de plutonio disponible será del orden de 45 toneladas. Dado que el plutonio tiene una vida media de unos 24.000 años, después del año 2027 la cantidad de plutonio permanecerá relativamente constante (aunque esto no es estrictamente correcto dado que alguno de los isótopos del Pu tienen vidas medias más cortas).

La tendencia mundial actual se dirige hacia la extensión de vida de las centrales ya existentes. Esta extensión de vida pasa, sin duda, por el cumplimiento de una serie de requisitos imprescindibles como mantener el nivel de seguridad de las plantas y el altísimo nivel de su fiabilidad. Partiendo de esas bases, un escenario de extensión de vida únicamente rendirá beneficios a la sociedad en su conjunto. Una extensión de vida de 20 años supondría, en el caso español, evitar la emisión de unas 1000 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> y la producción durante 20 años de electricidad a unos costes de producción aproximadamente el 40% más baratos que otras fuentes de energía. Evidentemente, optar por la explotación de nuestras centrales nucleares durante 20 años adicionales implica que se originen cantidades adicionales de residuos y, en el caso específico que nos ocupa del plutonio, su evolución puede verse en el conjunto de datos de color violeta de la figura 3. Tal y como se observa, después del hipotético cierre de la central nuclear de Trillo en 2047 tendremos algo menos de 70 toneladas de plutonio.



**Figura 3:** Evolución histórica de la cantidad de plutonio en el parque nuclear español en tres escenarios diferentes: estrategia actual de 40 años de vida útil para cada reactor (rojo), estrategia con extensión de vida de 20 años para cada reactor (violeta) y estrategia con implantación de dos reactores EPR con un 50% de combustible MOX (amarillo).

En la actualidad es ya posible optar por una estrategia diferente, otro posible escenario de uso de la energía nuclear mucho más interesante desde el punto de vista del aprovechamiento de los recursos y la sostenibilidad. Esta estrategia consiste en la utilización de los reactores EPR que describimos con anterioridad. En estos reactores, un alto porcentaje de su combustible puede estar constituido por óxidos mixtos de uranio y plutonio (MOX), de tal modo que no sólo sería un reactor productor de energía, sino que al mismo tiempo sería capaz de ir quemando las reservas de plutonio generadas por los reactores convencionales instalados en nuestro parque nuclear.

Aplicado al caso español, hemos hecho cálculos para estimar la evolución en el inventario de plutonio suponiendo la entrada en operación de un reactor EPR en el año 2015 y en un escenario con extensión de vida de 20 años de las centrales actuales. Los resultados se muestran en la figura 3 mediante el conjunto de datos de color amarillo. Los resultados son asombrosos, mediante esta estrategia conseguimos una disminución en las reservas de plutonio de casi el 80% al cierre del reactor EPR en el año 2075. Un escenario como éste nos permite seguir utilizando durante 20 años más las centrales existentes, con las ventajas medioambientales, sociales y económicas que eso conlleva y, simultáneamente, reducir drásticamente el inventario de residuos radiactivos mediante su transmutación (reciclaje) en otros elementos con menor o nula radiotoxicidad.

Existen, por tanto, estrategias que se pueden tomar en el momento actual encaminadas a reducir la cantidad de residuos radiactivos generados hasta el momento por nuestras centrales nucleares. En este trabajo hemos mostrado únicamente el caso relativo al plutonio, pero es posible realizar análisis parecidos en relación con otros elementos transuránicos como pueden ser el neptunio, el americio o el curio. Estos isótopos, dadas sus especiales características, tienen que ser transmutados en otros tipo de reactores que ya presentamos en un trabajo previo, los reactores rápidos y los reactores subcríticos. Los primeros están disponibles desde

los años 60 del siglo pasado, mientras que los segundos están en fase de desarrollo y se espera su disponibilidad comercial dentro de unos 25 años.

Toda actividad humana genera residuos y la energía nuclear es plenamente consciente de este hecho. Los residuos radiactivos son la consecuencia del uso generalizado de la energía nuclear, el precio que hubo que pagar por disponer de una energía competitiva, fiable y abundante. Pero este problema tiene soluciones técnicas como las que hemos propuesto aquí. Isaac Asimov escribió: *“A veces la Ciencia crea monstruos y, para deshacerse de ellos, hace falta más Ciencia”*. La tecnología nuclear ha encontrado la forma (y ha sido la única que lo ha hecho) de consumir sus propios residuos y, además, puede hacerlo utilizándolos como materia prima para la generación de electricidad. La sociedad española debe ser consciente de nuestra indigencia energética, la clase política (en representación de todos nosotros) debe marcar el camino a seguir y la industria y los científicos debemos estar preparados para llevar a cabo las empresas que la sociedad en su conjunto nos reclame. Es un grave problema social en el que todos debemos intervenir, están en juego la estabilidad de nuestra economía y de nuestro bienestar. Afortunadamente la tecnología y la Ciencia están de nuestra parte.