

Opciones de combustible MOX para hoy y mañana

T. Gain e I. Leboucher

El combustible MOX está siendo utilizado en la actualidad por varios países en el mundo, especialmente en países europeos como Francia, Alemania o Suiza, para alimentar sus reactores nucleares de agua ligera. El hecho de que ya exista una tecnología capaz de reciclar los materiales procedentes del combustible nuclear cuyo potencial energético sigue intacto (U y Pu) permite una implantación segura del uso de este tipo de combustibles en países que estén dispuestos a utilizarlo así como los que ya lo usan actualmente. Además también garantiza la producción de combustible a largo plazo. Este artículo muestra las ventajas del reciclado de combustible nuclear así como la gestión de Pu y sus opciones a futuro.

MOX fuel assemblies are currently being loaded in light water nuclear reactor cores in several countries in the World, especially European ones like France, Germany, Switzerland, etc. The fact that the technology to recycle the materials coming from nuclear fuel whose energetic potential is still intact (U and Pu), is already available, allows a smooth deployment of this fuel use both for countries eager to experience it and currently experiencing it. It also guarantees fuel production in the long term. This article shows the benefits of recycling of nuclear fuel as well as the Pu management and its options for the future.



THIBAUT GAIN

es licenciado en Ingeniería Naval, en Ingeniería Nuclear y Físico Nuclear. Actualmente es desde hace dos años experto internacional y director técnico del ciclo nuclear (Combustibles, reactores, reprocesado, residuos y repositorio final).



ISABELLE LEBOUCHER

es licenciada en Ciencias Químicas por la Universidad de Toulouse y Máster por la Universidad de Manchester. En la actualidad se encarga del desarrollo de negocio de la unidad de reciclado para la promoción de las diferentes opciones de tratamiento de combustible usado y las oportunidades de uso de combustible MOX a través de ofertas innovadoras.

INTRODUCCIÓN

El combustible usado, incluso tras haber sido descargado del núcleo del reactor, todavía posee un alto potencial energético. Éste es un punto esencial que ha sido enfatizado con el reciclaje de forma que el resultado es la separación de los materiales con valor energético, uranio y plutonio, de los productos de fusión.

Este artículo se va a centrar en el plutonio acerca de:

- Los principios de la generación de plutonio desde el uranio presente en el núcleo del reactor y el balance de plutonio cuando es reciclado en la forma de MOX (Óxidos Mixtos).
- Gestión de plutonio de contratos de reciclaje anteriores.
- Proyecto de reciclaje de plutonio, la instalación MFFF (MOX Fuel Fabrication Facility) en los Estados Unidos.
- Opciones para el reciclado de plutonio en el futuro.

BENEFICIOS DEL RECICLAJE

Mediante la separación de los productos de fisión de los materiales reciclables, uranio y plutonio, el reciclaje permite:

- Reducir el nivel de toxicidad en un factor de 10 debido a la ausencia virtual del plutonio altamente radiotóxico de los residuos finales. El combustible usado almacenado sin haber sido tratado contiene un 100 % del plutonio generado, mientras que el residuo final que sería almacenado tras el reciclado contiene menos del 0,1 % de plutonio
- El volumen de los residuos se reduce en un factor de 4 comparado con el almacenamiento directo del combustible usado, como resultado de la concentración de los productos de fisión y la compactación estructural de los elementos combustibles.
- Los residuos pueden considerarse seguros y estables, como resultado del proceso de vitrificación, el cual

encierra los elementos radiactivos en vidrio durante miles de años.

EL BALANCE DE PLUTONIO EN LOS NÚCLEOS DE LOS REACTORES

En el núcleo de un reactor, ocurren multitud de reacciones nucleares. Las mejor conocidas son las fisiones de un isótopo del uranio - ^{235}U - generando productos de fisión que son fragmentos (generalmente dos: uno más pesado y otro más ligero) del núcleo inicial. Sin embargo otras reacciones pueden tener lugar en un núcleo y en especial la captura de neutrones: un núcleo absorbe un neutrón aumentando su tamaño. La figura 1 muestra estas reacciones.

Podemos notar que el ^{238}U es el punto de partida para la producción de Pu. De hecho el ^{238}U representa más del 95% de todos los isótopos de uranio. ¿Cómo se produce el plutonio entonces?

El ^{238}U absorbe un neutrón dando lugar al ^{239}U .

Este se desintegra rápidamente en ^{239}Np por una reacción beta (tiempo de vida media 23,5 min).

Entonces decae en ^{239}Pu por medio de otra reacción beta (tiempo de vida media 2,3 días).

De esta forma se producen todos los isótopos de Pu ya que el ^{239}Pu puede producir fisiones ($\approx 70\%$ de las reacciones del ^{239}Pu) pero también puede absorber un neutrón ($\approx 30\%$ de las reacciones del ^{239}Pu) produciendo ^{240}Pu y entonces todos los otros isótopos del Pu.

Al mismo tiempo, el ^{235}U (que representa entre un 3 y 5% de la masa total de uranio tras el enriquecimiento) puede producir fisiones ($\approx 85\%$ de las reacciones del ^{235}U) pero también puede absorber un neutrón ($\approx 15\%$ de las reacciones) produciendo:

^{236}U , después ^{237}U tras una segunda absorción de un neutrón.

Entonces un decaimiento beta (periodo de vida media = 6,7 días) dando ^{237}Np por la absorción de un neutrón dando ^{238}Np .

Y por fin ^{238}Pu tras un decaimiento beta (periodo de vida media = 2,1 días).

Si se consideran las probabilidades de todas las reacciones, la masa total de Pu producida en un reactor, dependiendo de su irradiación, puede ser evaluada como un 1% de la masa inicial de uranio. Esta cantidad tienen en cuenta la masa de ^{239}Pu que desaparece por su fisión.

El Pu producido en un núcleo de uranio es interesante porque contiene un 70% de isótopos fisionables (^{239}Pu y

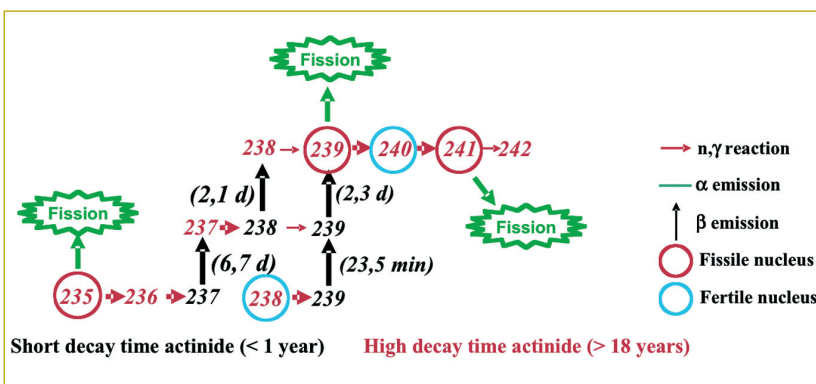


Figura 1.

^{241}Pu) que resultan nucleidos mejor fisionables que el ^{235}U . Este Pu se extrae en plantas de reprocesado (por ejemplo: la planta de Areva 'La Hague') y se recicla en combustible nuclear MOX, para ser reutilizado en reactores de agua ligera (LWR). El grado de Pu en combustibles MOX es mayor que en combustibles UOX debido a los isótopos pares de Pu que absorben neutrones (normalmente 7 - 10 % para la misma energía equivalente de combustibles enriquecidos de 3 a 5 % en ^{235}U).

Las diferencias entre combustibles UOX y MOX induce diferencias en el consumo de U o de Pu, y además de la neutróica del núcleo. Actualmente núcleos de LWR se cargan como menos del 30 % de combustible MOX incluso si un reactor como el EPR ha sido diseñado para ser cargado hasta con el 100 % de combustibles MOX. Durante la irradiación, cerca del 80 % del ^{235}U ha desaparecido de núcleos cargados con UOX vía fisiones o absorciones de neutrones, mientras que únicamente el 30 % del Pu ha desaparecido de los combustibles MOX. Esto se debe a los isótopos pares del Pu, principalmente ^{240}Pu , que incrementa con absorciones de neutrones del ^{239}Pu que envenena el núcleo. Tras la irradiación en combustibles MOX, el Pu se degrada porque la masa de ^{239}Pu decrece (fisiones) mientras que la masa de los isótopos pares (principalmente ^{240}Pu y ^{238}Pu).

GESTIÓN DE PLUTONIO DE CONTRATOS DE RECICLAJE RECIENTES

En los últimos 40 años, Areva ha tratado más de 25 000 toneladas de combustible usado y ha fabricado más de 5000 elementos de combustible MOX. Esta experiencia demuestra la flexibilidad entre el tratamiento y el reciclado de plutonio y una constante optimización de plutonio usado en un reactor.

La experiencia en MOX son a medida de cada cliente, como:

- El porcentaje de MOX en un núcleo varía desde un pequeño porcentaje al 40 %.
- El tiempo entre las operaciones de tratamiento y la fabricación del MOX varía desde un año hasta varias décadas.
- El quemado del combustible varía entre 30 a más de 60GWd/t.
- La composición isotópica del plutonio reciclado con plutonio procedente de UO_2 de bajo quemado y de combustible MOX.
- Parte del MOX usado ha sido reciclado para un segundo uso en el reactor.

Así que el combustible MOX puede ser usado de acuerdo a varios estándares y su uso encaja con una gestión optimizada de la flota de reactores de una empresa eléctrica.

CONSTRUCCIÓN DE LA FÁBRICA DE FABRICACIÓN DE MOX

Agosto de 2007 marca el comienzo de la construcción de la Instalación de Fabricación de Combustible MOX (MOX Fuel Fabrication Facility ó MFFF) para convertir el óxido de plutonio proveniente de los excesos de stock de plutonio de uso armamentístico en combustible MOX capaz de ser utilizado y quemado en reactores nucleares comerciales de Estados Unidos.

En mayo de 2008, Shaw Areva MOX Services, LLC y el Departamento de Energía de U.S. (DOE) firmaron un acuerdo de implantación de la construcción de la Instalación para la Fabricación de Combustible MOX en el emplazamiento de Savannah River, situado en Aiken, Carolina del Sur. Mediante este acuerdo, el DOE ejecuta su opción de construcción que había sido incluida en el contrato de la MFFF firmado en 1999 entre Areva y el DOE.



Figura 2.

La Administración Nacional de Seguridad Nuclear (NNSA) del DOE inició la construcción de la instalación, la cual convertirá al menos 34 Tm (unas 75 000 libras) de exceso de plutonio americano. La conversión de este plutonio ayudará a llevar a cabo el acuerdo de no proliferación del año 2000 entre Estados Unidos y Rusia, por el cual ambos países se comprometieron a eliminar 34 Tm (68 Tm en total) de exceso de plutonio de grado armamentístico. El contratista de la NNSA, Shaw Areva MOX Services, está construyendo la instalación de acuerdo a las tecnologías de reciclado y tratamiento del Grupo Areva.

El MOX en reactores de agua ligera también tiene la capacidad de reciclar el plutonio de grado armamentístico como se ha hecho con el Uranio Altamente Enriquecido (*Highly Enriched uranium - HEU*).

OPCIONES PARA EL RECICLADO DE PLUTONIO EN EL FUTURO

Evolución técnica del producto

El uso de plutonio y uranio en núcleos atómicos depende profundamente de la gestión del combustible durante su proceso de irradiación y el diseño del reactor. Hasta ahora la optimización del núcleo era evaluada considerando el quemado, y en particular el aumento de quemado. El énfasis se ha puesto siempre en el consumo de combustible en vez del reciclado de Pu y U.

Por lo tanto los núcleos se han gestionado maximizando el uso de la energía en el combustible, dando lugar a fuertes irradiaciones. El enriquecimiento inicial en ^{235}U se incrementaba y del mismo modo au-

mentaba el contenido de ^{236}U en los combustibles irradiados. La consecuencia fue un importante potencial de ^{238}Pu (ver la figura 1) en uranio reprocesado, un isótopo muy importante en el reproceso de combustibles de ERU irradiado. Además el plutonio en aquellos combustibles es más rico en nucleidos pares (absorbente = veneno de neutrones) y más pobre en el nucleido ^{239}Pu : el reciclado de este Pu en combustibles MOX requiere una mayor pureza (alto quemado en Pu) pero tras la irradiación, el Pu de MOX usados es difícilmente reciclable en reactores de agua ligera: a menos que se mezcle con Pu con un mejor contenido isotópico. Por esta razón la opción preferida para el Pu procedente de MOX usados es reciclar en reactores reproductores rápidos, la única tecnología capaz de quemar todos los nucleidos del Pu (isótopos pares e impares).

Areva con la experiencia adquirida tras más de 10 000 toneladas de combustibles reprocesados en los últimos 40 años, considera varias posibilidades para limitar o evitar la producción de nucleidos más desfavorables durante la irradiación. Este objetivo es múltiple:

- Menos ^{236}U en combustibles ERU tan limitantes en la producción de ^{238}Pu durante la irradiación.
- Menos ^{241}Am dando lugar a menos producción de ^{238}Pu en los combustibles MOX.
- Menos ^{240}Pu tras irradiación de MOX.
- Más quemado de Pu en reactores de agua ligera.
- Tecnologías combinadas de reactores para mejorar la calidad del Pu...

El resultado de estos análisis fue el diseño de combustibles innovadores, nuevas formas de reproceso y reciclaje, incluyendo el multi-reciclaje de MOX y ERU en los combustibles finales.

Esta aproximación amplía las oportunidades de reciclaje en los reactores de agua ligera y en los reproductores rápidos dedicados a usar plutonio de menor calidad.

Evolución del Mercado de MOX

Se identifican pocas tendencias: en la parte de suministro más instalaciones de fabricación de combustibles MOX.

Además de la planta francesa de Melox y las plantas MFFF, el Reino Unido podría proponer una significativa contribución al suministro de MOX según uno de los escenarios propuestos por un estudio de Oxford "A low carbon nuclear future" en marzo de 2011, que promueve la construcción de una instalación de suministro de 100 t/y de combustible MOX.

Y en la parte de demanda una concentración en unos pocos países así como una optimización en el uso de MOX en una nueva generación de reactores que haría posible reutilizar la energía del plutonio a mayor rapidez.

Varios escenarios para el uso de MOX son posibles en los próximos años:

- Uso en reactores existentes con niveles de hasta el 40 % de MOX en el núcleo (ya licenciado para MOX o con estudios para licenciamiento en nuevos reactores existentes).
- Uso en nuevos reactores con licencia para un bajo porcentaje de MOX.
- Uso en nuevos reactores dedicados a MOX, como el EPR con la opción de 100% MOX.

CONCLUSIÓN

La optimización de los recursos de plutonio separado del combustible usado en el reciclaje es fundamental para el desarrollo nuclear así como la gestión del combustible gastado.

Una mejor comprensión del comportamiento de ambos combustibles UO_2 y MOX en los núcleos mediante numerosas experiencias de clientes de Areva, ayuda notablemente en la optimización de las flotas de reactores de las generaciones presente y futura. ■

La energía nuclear en Brasil

A. Tranjan Filho

Este artículo recuerda que el desarrollo sostenible requiere del uso de todas las formas de energía primaria disponibles para la producción de electricidad, particularmente de aquellas que son respetuosas con el medio ambiente, como es el caso de la nuclear. Cualquier estrategia para contrarrestar el efecto invernadero significa reducir el uso de los combustibles fósiles y, en ese sentido, la tecnología nuclear, única que logra aislar de forma segura sus residuos, es una alternativa viable para proteger el medio ambiente.

En la actualidad, la energía hidroeléctrica es la principal fuente de generación de electricidad en Brasil pero, de acuerdo con el aumento previsto de la demanda hasta el año 2030, necesitará del complemento de centrales térmicas, que de hecho son actualmente necesarias para compensar las fluctuaciones de los embalses. En ese escenario, la energía nuclear aparece como una de las opciones más competitivas para la operación en base y además, en el caso de Brasil, la energía nuclear podría apoyarse en importantes reservas de uranio y en el dominio tecnológico de la fabricación de combustible nuclear.

This article deals with the fact that sustainable development requires the use of all forms of primary energy for electricity production and particularly of those which are environmental friendly, as nuclear. Any strategy to counterbalance the greenhouse effect will mean curtailing the use of fossil fuel and in that regard nuclear technology, the only one that manages to isolate safely its wastes, is a feasible alternative to protect the environment.

Currently, hydropower is the major source of electricity generation in Brazil, but according to the expected increase of demand up to 2030, it will need to be complemented by thermal units, that in fact are currently needed to compensate for reservoirs fluctuations. In that scenario, nuclear appears as one of the most competitive options for base-load operation and in the case of Brazil, nuclear energy could have the support of important uranium reserves and technological mastering of the nuclear fuel fabrication.

INTRODUCCIÓN

La energía, y en particular la electricidad, es imprescindible para el desarrollo económico y social y para mejorar la calidad de vida. Sigue creciendo la demanda de electricidad a nivel mundial, especialmente fuera de los países de la OCDE, en los llamados "países en desarrollo". En dichas zonas, se prevé un crecimiento de la electricidad mayor que el de la economía (PIB).

El concepto de desarrollo sostenible utilizado hoy en día en todo el mundo exige la reducción y mitigación de los impactos medioambientales. Se necesitarán todos los tipos de energía primaria para la producción eléctrica si se quiere conseguir el desarrollo sostenible global. En este contexto,

es imprescindible que se aprovechen aquellos recursos que pueden conducir al menor impacto medioambiental. Entre estas opciones, cabe destacar la energía nuclear, que está técnicamente madura y económicamente competitiva, y hay que utilizarla si lo que se pretende es conseguir un desarrollo respetuoso con el medio ambiente.

Actualmente casi las tres cuartas partes del abastecimiento energético mundial provienen de los combustibles fósiles, que representan la mayor fuente de gases de efecto invernadero y de otros contaminantes atmosféricos. Cualquier estrategia responsable en cuanto al efecto invernadero requiere una restricción de la utilización de esta opción.

La energía nuclear es la única tecnología energética en la cual los



ALFREDO TRANJAN FILHO

es Ingeniero Mecánico por la Universidad Católica Pontificia de Río de Janeiro. Empezó su vida profesional en el campo nuclear en la empresa eléctrica Furnas Centrais Elétricas S.A., posteriormente Eletrobrás Termonuclear-Eletronuclear. En esta compañía, fue responsable de los Sistemas de Residuos de las Unidades I y II de la CN Angra y jefe de la División de Sistemas de Centrales Nucleares, alcanzando el puesto de subdirector. En 1991 se incorporó a la Comisión Nacional de Energía Nuclear (CNEN), donde ocupó los puestos de asesor técnico del presidente y coordinador general de Proyectos Especiales, siendo responsable del diseño y construcción de los repositorios de Goiânia. El último puesto que ocupó en la CNEN fue el de director de Investigación y Desarrollo. En mayo de 2007, fue nombrado presidente de Industrias Nucleares do Brasil - INB.

residuos son tratados, gestionados, contenidos y aislados de forma que queda totalmente protegida la salud humana y el medio ambiente, incluyendo no solo los almacenamientos sino también tecnologías como el reciclado y la transmutación

Además, la nuclear es una forma de energía altamente concentrada. Las centrales nucleares no requieren grandes extensiones de terreno, y en ellas también se pueden almacenar grandes cantidades de combustible.

LA SITUACIÓN EN BRASIL

En la actualidad la población de Brasil alcanza los 190 millones de habitantes (censo oficial del año 2010). Aunque se encuentra entre las mayores economías del mundo, Brasil tiene, debido a grandes diferencias económicas regionales, unas cifras muy pobres en lo que respecta al consumo de electricidad per cápita, lo que está direc-

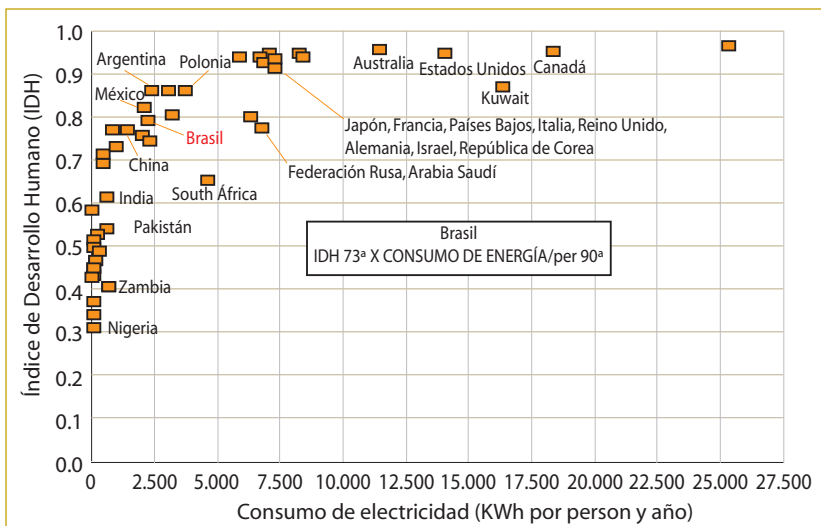


Figura 1.

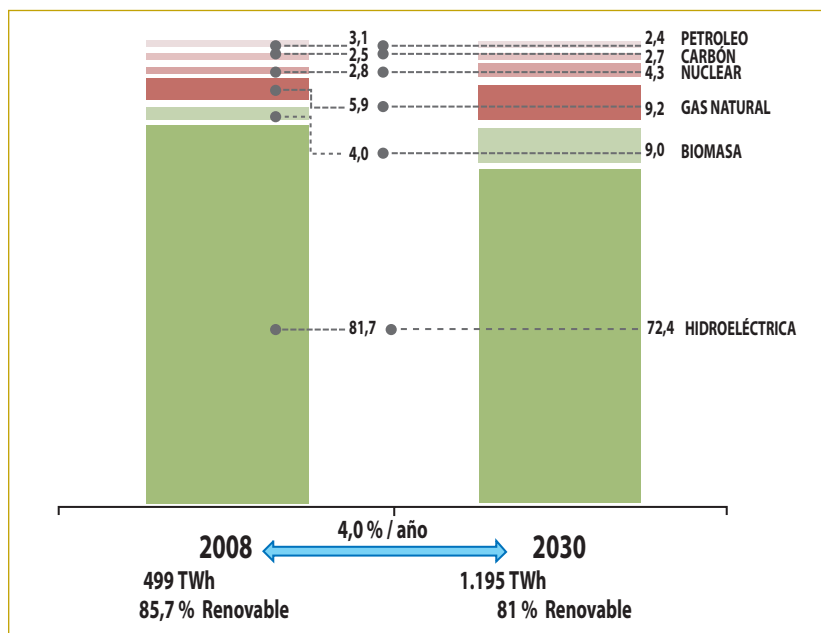


Figura 2.

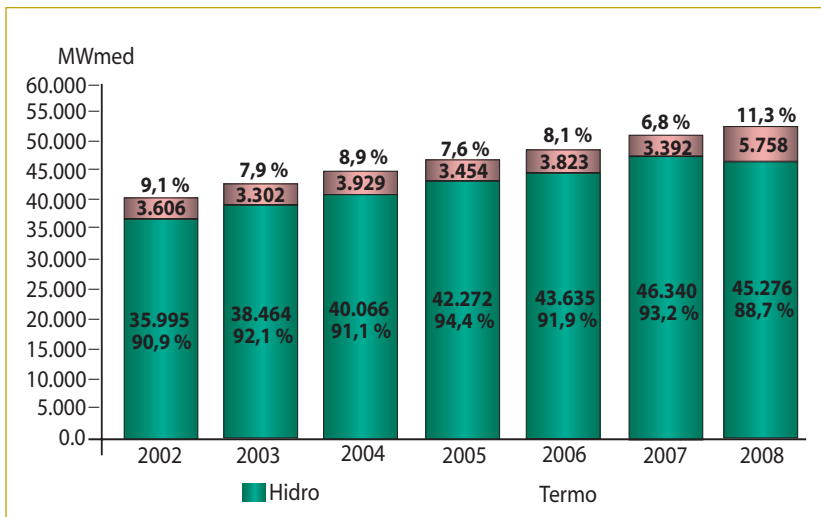


Figura 3.

tamente relacionado con el Índice de Desarrollo Humano (IDH), tal como se muestra en la figura 1.

Teniendo en cuenta las previsiones de expansión de la matriz de generación eléctrica, tal como se muestran en la figura 2, así como la población prevista de 230 millones, el consumo per cápita, que se estima alcanzará los 4000 kW/persona, quedará por debajo del actual (2010) nivel inferior de los países de la C.E.

En este horizonte, se debe aprovechar al máximo la mayor fuente de generación eléctrica, la hidroeléctrica, que representa alrededor de 180 GW. Después del año 2030, está previsto que el suministro para la demanda de energía en Brasil provenga de unidades térmicas, de las cuales la nuclear aparecerá como una de las más competitivas para la operación de carga base, apoyada en las enormes reservas de uranio de Brasil y su dominio tecnológico de la fabricación de combustible nuclear, a pesar de su cuota claramente modesta del 4% de la capacidad instalada.

De hecho, ya es necesaria la complementación térmica para compensar las fluctuaciones de capacidad de los pantanos debido a la pluviosidad, tal como se muestra en la figura 3.

Industrias Nucleares do Brasil (INB) tiene como objetivo, más allá del fin de la presente década, tener instalada la plena capacidad de ciclo de combustible para suministrar las necesidades domésticas, lo que implica construir la unidad de conversión y terminar la unidad de enriquecimiento.

La matriz de energía primaria brasileña está compuesta en más del 40% por las fuentes renovables, y la opción nuclear contribuirá a mantenerla limpia. Los reactores que se encuentran actualmente en operación han evitado la emisión de 15 millones de toneladas de CO₂ por año, frente a una unidad similar de carbón.

El accidente ocurrido recientemente en Japón seguramente tendrá un impacto en el conjunto del ámbito nuclear. Por otro lado, como consecuencia de la cultura nuclear, dicho suceso hará más segura la actividad mediante la puesta en marcha de nuevos procedimientos de seguridad y operación.

Para concluir, estamos seguros de que el programa nuclear brasileño se mantendrá según lo planeado, tal como afirmaron hace poco las autoridades competentes, impidiendo que unas decisiones emocionales o ideológicas priven a la sociedad de esta alternativa.■