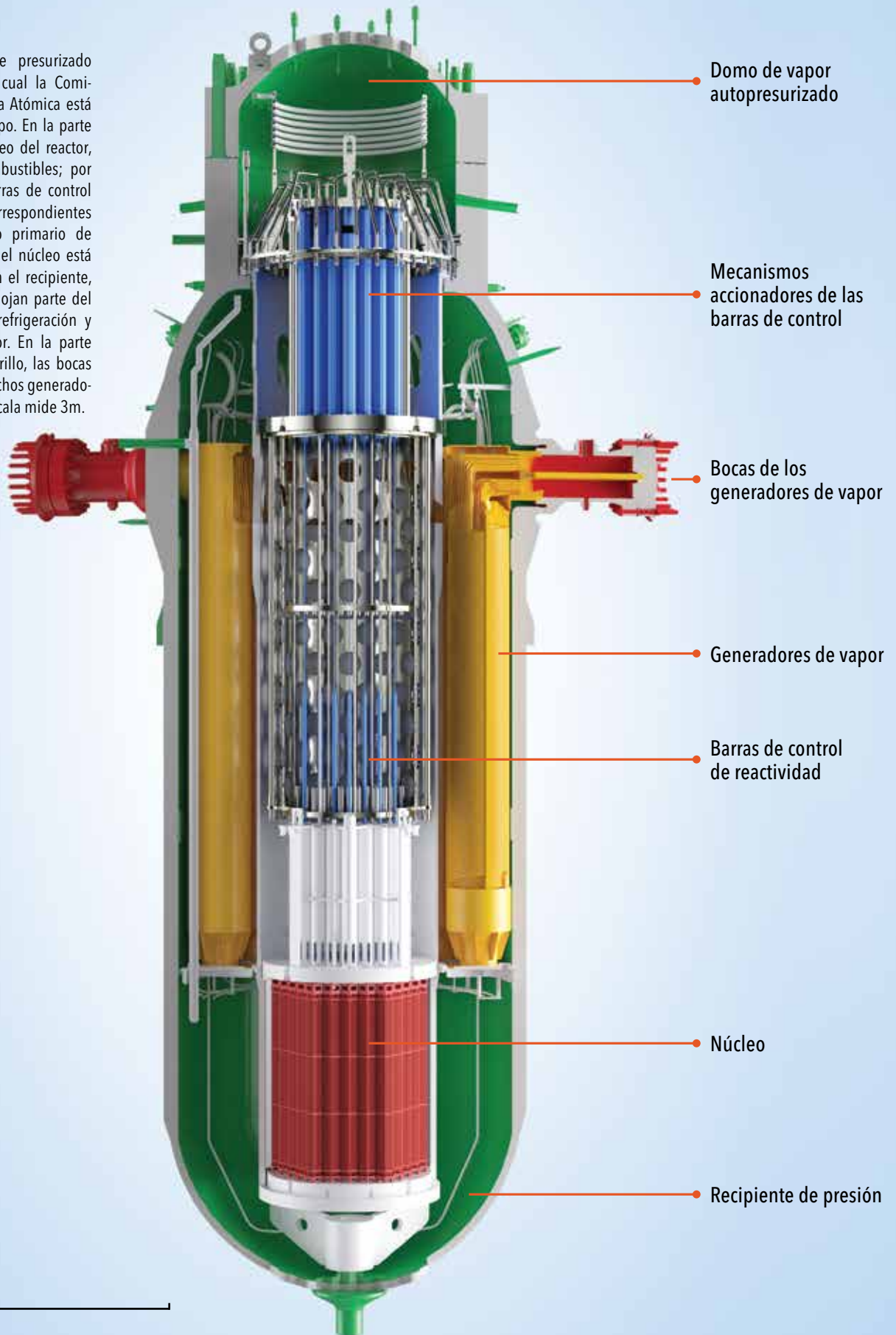


Esquema del recipiente presurizado del reactor Carem, del cual la Comisión Nacional de Energía Atómica está construyendo un prototipo. En la parte inferior se ubica el núcleo del reactor, con sus elementos combustibles; por encima, en azul, las barras de control y seguridad con sus correspondientes mecanismos. El circuito primario de refrigeración por agua del núcleo está totalmente contenido en el recipiente, en el cual también se alojan parte del circuito secundario de refrigeración y los generadores de calor. En la parte media superior, en amarillo, las bocas de entrada y salida de dichos generadores. La barra que da la escala mide 3m.



Carla Notari

Instituto de Tecnología Nuclear Dan Beninson
(IDB), UNSAM-CNEA

Centrales nucleares. Presente y futuro

El número 147 de *CIENCIA HOY*, de enero-febrero de 2016, estuvo enteramente dedicado a la energía en la Argentina. Si bien incluyó once artículos y un glosario, hubo temas que quedaron afuera. El siguiente artículo suple una de esas deficiencias. Para ponerlo mejor en contexto, se recomienda referirse al citado número, y también leer el editorial 'Electricidad y cuidado del ambiente', del número anterior a este de la revista.

La generación nuclear satisface hoy el 11% de la demanda de energía eléctrica mundial, con 440 reactores en funcionamiento en 30 países, un valor porcentual que hoy tiende a decrecer, a pesar de que se siguen instalando centrales nuevas y prolongando el uso de las que van llegando al final de su ciclo de vida de diseño. Esto se debe a la creciente utilización de combustibles fósiles, especialmente carbón, para satisfacer una demanda también creciente de electricidad.

La energía nucleoelectrica es, junto a la eólica y la hidroeléctrica, una de las tecnologías que posibilitan

generar electricidad con menos emisiones de carbono. Proporciona el 30% de la energía eléctrica producida con bajas emisiones. Debido principalmente a que el insumo básico, el uranio, permite obtener grandes cantidades de energía a partir de pequeños volúmenes de material, para igual cantidad de electricidad producida la generación nuclear requiere considerablemente menos minería, procesamiento y transporte, lo cual implica más reducida contaminación y un volumen significativamente menor de residuos a disponer. Estos factores, en síntesis, reducen su impacto ambiental. Además, el uranio, a diferencia del petróleo o del gas, es un material

¿DE QUÉ SE TRATA?

El problemático presente y las perspectivas futuras de la generación nuclear.

más uniformemente distribuido en la corteza terrestre, lo cual mejora la seguridad energética debido a la mayor cantidad de proveedores de la materia prima.

De lo señalado en los párrafos anteriores derivan algunas de las mayores ventajas de las centrales nucleares. Sin embargo, la generación nucleoelectrica tiene aspectos controvertidos que inspiran rechazo en amplios sectores. El costo inicial por unidad de potencia es uno de ellos: el de la generación nuclear es más alto si se lo compara con carbón y gas, aunque más reducido que el de las fuentes renovables. La toxicidad, extendida en el tiempo, de los residuos nucleares es otro aspecto controvertido. El parque nucleoelectrico mundial trabaja almacenando transitoriamente el combustible gastado que se extrae del reactor, a la espera de su disposición final enterrado en repositorios profundos. Ese residuo es altamente radiactivo y debe mantenerse aislado durante miles de años.

Un tercer inconveniente es la posibilidad de desvío de material fisible para fabricar explosivos nucleares. Sin embargo, la producción con fines militares no se realiza en reactores comerciales como las centrales nucleares, y las potencias con armamento nuclear ya poseen un considerable inventario de uranio de alto enriquecimiento y de plutonio. Por otro lado, hasta el momento nunca se

registró la apropiación de material por parte de organizaciones terroristas. El Organismo Internacional de Energía Atómica posee un sistema de control estricto y efectivo de inventario de los materiales físi les que circulan en las plantas comerciales.

Finalmente está el aspecto que más efecto tiene en la opinión pública: la posibilidad de que se produzcan accidentes, en especial del tipo de los dos que alcanzaron la mayor categoría de desastre en la clasificación especializada sobre accidentes en instalaciones nucleares, el de Chernobyl, en Ucrania (1986), y el más reciente y espectacular, causado por un sismo y su posterior tsunami, el de Fukushima Dai-ichi, en Japón (2011).

Las consecuencias del desastre natural en la planta japonesa fueron calamitosas. Esto se debió a la fusión de combustible en tres de los reactores y la liberación de material radiactivo a la atmósfera como consecuencia de la falla de la contención que los cubre, la que constituye la última de las numerosas barreras al escape de material radiactivo. El accidente nuclear en sí fue solo una parte de la catástrofe producida por este fenómeno natural, que destruyó toda la infraestructura de la región: viviendas, puentes, caminos, puertos, diques, etcétera. El resultado más terrible del evento fue un saldo estimado de 18.000



Centrales Atucha I (derecha), en funcionamiento desde 1974, y Atucha II, en funcionamiento desde 2014. Hacia la derecha y fuera del cuadro se construye actualmente un prototipo del reactor modular Carem, como se ve en la ilustración de la página 32. La fotografía fue tomada en 2010. Wikimedia Commons



Central Embalse Río Tercero, en funcionamiento desde 1984. La fotografía fue tomada en 2012. Wikimedia Commons

muerdos y 6000 desaparecidos, que se debieron al tsunami y no al accidente nuclear. Esto no oculta las consecuencias del último: la evacuación de alrededor de 100.000 personas de las zonas afectadas y la acumulación en tanques especiales de grandes cantidades de agua contaminada. El líquido se debió usar para refrigerar los reactores ante la pérdida total del suministro eléctrico que impidió el funcionamiento de los sistemas destinados justamente a esa tarea. Las consecuencias en la salud humana están siendo estudiadas exhaustivamente en toda la población afectada; los resultados no muestran un aumento significativo en la probabilidad de contraer cáncer, pero sí una grave perturbación psicológica, asociada a todas las catástrofes de esta magnitud.

Cambios en el ciclo del combustible nuclear y en el diseño de los reactores

El ciclo del combustible nuclear requiere un conjunto de procesos e instalaciones para llevar el uranio desde la

mina hasta la disposición final de sus residuos. Hay dos tipos de ciclo: el abierto y el cerrado. En el primero, usado hoy en todo el mundo, el combustible gastado se trata como residuo sin uso posterior y se le debe encontrar un destino definitivo. Es un material más tóxico que el uranio original extraído de la mina. La dificultad en establecer repositorios profundos para su disposición final es un problema más de opinión pública que tecnológico, y ha resultado en un aumento del inventario de combustible gastado en almacenamiento transitorio. De hecho, el almacenamiento transitorio inicialmente planificado para durar alrededor de cincuenta años se extenderá por un lapso más cercano a los cien años.

El ciclo cerrado incluye el procesamiento del combustible gastado para separar sus componentes útiles (uranio, plutonio y otros elementos radiactivos o actínidos menores) de los productos de fisión, que son una fracción mínima del volumen total y se los considera residuo. Este residuo solo contiene trazas de actínidos y puede disponerse en forma definitiva en matrices de vidrio, pues la toxicidad de sus radiaciones no supera, después de unos trescientos años de vida, la del uranio natural. De este modo se aliviaría en forma marcada el problema de la disposición final. Uranio, plutonio y ac-



Núcleo del reactor de la central nuclear Atucha 2 en proceso de montaje. Los círculos blancos corresponden a los tapones protegidos de los canales combustibles.

tínidos menores recuperados pueden utilizarse para fabricar nuevos elementos combustibles y reintroducirse en el reactor.

Los reactores óptimos para utilizar en los ciclos cerrados son los reactores rápidos, un tipo que no está hoy en uso comercial, pero del que se dispone de una importante experiencia operativa en varios países (Francia, Rusia y Japón). Su característica fundamental es que la población de neutrones libres que se encuentra en su núcleo tiene energías promedio más altas que en los actuales reactores térmicos. Esto permite utilizarlos como reactores reproductores, que producen más material fisible que el que consumen. Además, son más aptos para fisurar en forma eficiente plutonio y actínidos menores, que son hoy lo más acuciante para la disposición final de los residuos. Con la intensa actividad de investigación y desarrollo que hoy tiene lugar en el mundo, tanto sobre diseño de reactores como sobre las técnicas de reprocesamiento, se puede prever que los reactores rápidos podrían difundirse hacia mediados de este siglo, con el consiguiente ahorro de materia prima nuclear y reducción del lapso de peligro radiactivo de los residuos de unos cuantos miles a unos pocos cientos de años.

El futuro

La gran mayoría de las centrales nucleares actuales fueron diseñadas en las décadas de 1980 y 1990 y paulatinamente mejoradas para incorporar sistemas de seguridad pasiva, es decir, sistemas que no necesitan suministro eléctrico sino que se basan en fenómenos físicos como la gravedad o la circulación natural del agua. Otros cambios han apuntado a reducir los tiempos de construcción y por ende los costos de inversión por acumulación de intereses.

Varios fenómenos pueden señalarse en relación con la evolución próxima de las centrales nucleares. La prolongación de la vida útil de las plantas actuales se fundamenta en la comprobación de que estas instalaciones pueden durar mucho más que los 30-40 años para los cuales fueron diseñados. Esta extensión de vida se realiza renovando aquellos elementos clave de la instalación que sufren mayor desgaste, como los generadores de vapor y, en el caso de los reactores de uranio natural CANDU (como los de la central de Embalse Río Tercero), los canales combustibles. Si bien la inversión necesaria es importante, la extensión de la vida útil esperada, unos 30 años adicionales, tiene un efecto muy favorable en los costos de generación.

En los próximos veinte años se verán los resultados de este proceso en gran cantidad de centrales de distintos países. En los Estados Unidos aproximadamente la mitad de las plantas nucleares operativas ha obtenido el permiso del ente regulador para extender su vida y la otra mitad se prepara para gestionarlo. En Europa, el 40% de las que funcionan llegará al final de su vida de diseño en los próximos diez años. En la de Embalse Río Tercero se está trabajando activamente en esta dirección.

El cierre del ciclo de combustible nuclear utilizando reactores rápidos se está analizando en todo el mundo. Tres de los seis diseños de reactores avanzados en estudio en la actualidad –llamados reactores de cuarta generación– son de este tipo. Aun en los Estados Unidos, que por razones de proliferación han abogado sostenidamente por el ciclo abierto, se analiza la conveniencia de sustituirlo por el cerrado, cuya introducción requerirá un riguroso régimen de salvaguardas tanto en la etapa de procesamiento del combustible usado para separar los residuos como en la de enriquecimiento del combustible recuperado. Por ello en estos momentos se trabaja intensamente en formas de procesamiento novedosas, por ejemplo, separar el plutonio junto con los actínidos menores y adicionarles uranio natural o empobrecido para fabricar el combustible reciclado del reactor rápido.

La construcción de centrales nucleares medianas y pequeñas es otra de las posibilidades futuras consideradas promisorias. La tendencia histórica ha sido hacia módulos de mayor potencia: los más comunes se han caracterizado por una potencia eléctrica de entre 1 y 1,5GW. En este contexto las centrales nucleares argentinas, cuyos módulos tienen potencias eléctricas de 362MW (Atucha I), 648MW (Embalse) y 745MW (Atucha II), pueden considerarse entre pequeñas y medianas. La razón principal de esta tendencia era económica, debido a la preponderante incidencia del costo inicial de inversión en el costo de generación. Sin embargo, hace años se trabaja en el diseño de centrales pequeñas, adecuadas para instalar en países con redes reducidas o en zonas aisladas donde el aprovisionamiento frecuente de combustible es difícil. Estas centrales contraponen la desventaja de un mayor costo por unidad de potencia instalada a la ventaja de una mayor facilidad para establecer sistemas de seguridad pasiva, los que ante una situación de emergencia puedan actuar sin intervención humana y en ausencia de suministro eléctrico. Al mismo tiempo, una vez alcanzado cierto grado de madurez en el mercado de ese tipo de plantas, podrían fabricarse en forma modular de modo de disminuir sensiblemente los tiempos de montaje. Esto aliviaría la desventaja económica de los mayores costos de inversión por unidad de potencia instalada.

Diversos países trabajan en estos momentos en proyectos de centrales pequeñas, de los que dos están en

proceso avanzado de construcción: el prototipo argentino Carem-25 y el ruso KLT-40S, de 27 y 35MW de potencia eléctrica respectivamente. Las tecnologías empleadas en la gran variedad de proyectos son muy diversas, pero características comunes de todos son la limitada potencia (menor que 300MW eléctricos) y el diseño modular, que implica un menor número de estructuras, sistemas y componentes.

Si bien tanto los costos como el mercado para este tipo de reactores son aún inciertos, los fabricantes confían en que los costos de inversión sean menores una vez alcanzada la producción en serie, aunque los costos de operación (incluido el combustible) y mantenimiento serían mayores por un uso menos eficiente del combustible y por la mayor dotación de personal por unidad de potencia en comparación con centrales más grandes.

El prototipo Carem-25 (<http://www.cnea.gov.ar/carem>) se está construyendo en un predio de la Comisión Nacional de Energía Atómica próximo a las centrales Atucha I y II, a orillas del Paraná. Esquemáticamente, emplea el calor originado en la fisión de uranio para producir vapor que mueve una turbina, la cual genera electricidad. El reactor está encerrado en una vasija cilíndrica de 11m de altura y 3,4m de diámetro, construida en acero de 20cm



Vista aérea parcial de la central nuclear de Fukushima Dai-ichi después del accidente. Se observan los edificios semidestruídos de dos de los seis reactores que formaban parte de la central.




Instalaciones en construcción para el prototipo del reactor Carem emplazado en la costa del Paraná. Arriba a la derecha se aprecian las cúpulas de Atucha I y II. Fotografía tomada en 2016, CNEA.

de espesor y revestida en su interior en acero inoxidable; está rodeada por una estructura de hormigón y acero que cumple la función de contención y blindaje.

El núcleo del reactor, diseñado localmente, se compone de 61 elementos combustibles, cada uno con 100 barras con uranio enriquecido (al 1,8% y 3,4%) de 140cm de altura. El recipiente contiene el sistema primario de refrigeración del núcleo, los generadores de vapor (que son 12) y los mecanismos hidráulicos que accionan las barras de control. La refrigeración del núcleo se realiza por convección natural de agua, sin bombas que necesiten electricidad. Los generadores de vapor, minihelicoidales,

se ubican por encima del núcleo, lo cual asegura la convección natural. El recipiente cilíndrico termina en forma de domo en la parte superior, lo cual hace operar al sistema en un ambiente presurizado.

Se prevé que el prototipo se ponga en funcionamiento en 2019. Más allá de las perspectivas económicas del proyecto, que permiten vislumbrar el desarrollo de una actividad industrial de exportación de base tecnológica, su realización constituye un bienvenido aporte a apuntalar el puente que conduce de la investigación científica a la investigación tecnológica y de esta a la aplicación industrial, puente cuya fragilidad es notoria en la Argentina. 

LECTURAS SUGERIDAS

BES D, 1989, 'Cincuenta años de la fisión nuclear', CIENCIA Hoy, 1: 67-68.

CARLINO H, PERCZYK D y RABINOVICH G, 2016, 'Energía y cambio climático', CIENCIA Hoy, 149: 42-47.

DE LA FUENTE ARIAS E et al., 2004, *Manual de tecnología nuclear para periodistas*, Foro de la Industria Nuclear Española, Madrid. Disponible en https://www.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/i18n/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=1058982.

FELIZIA E, 1996, 'Centrales nucleares. La evaluación probabilística de su seguridad', CIENCIA Hoy, 35: 54-64. Incluye un recuadro sobre Chernobyl.

FELIZIA E, 2003, 'Descubrimiento de la fisión nuclear y la generación de energía', CIENCIA Hoy, 73: 56-65.



Carla Notari

Licenciada en física, UBA.
Directora del Instituto de Tecnología Nuclear Dan Beninson, UNSAM-CNEA.
Profesora titular, UNSAM.
Asesora del Organismo Internacional de Energía Atómica.