

IAEA BULLETIN

ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA

La publicación emblemática del OIEA | Abril de 2023 | www.iaea.org/es/bulletin

CLAUSURA DE INSTALACIONES NUCLEARES



Robots, IA y modelos 3D: la contribución de los avances de alta tecnología a la clausura nuclear, pág. 14

Incorporación de la clausura en el diseño: cómo se diseñan reactores avanzados teniendo en mente la disposición final, pág. 16

La economía circular está transformando la clausura de instalaciones nucleares, pág. 18



EL BOLETÍN DEL OIEA

es una publicación de la
Oficina de Información

al Público y Comunicación (OPIC)

Organismo Internacional de Energía Atómica

Centro Internacional de Viena

PO Box 100, 1400 Viena (Austria)

Teléfono: (43-1) 2600-0

iaeabulletin@iaea.org

Editora: Estelle Marais

Directora editorial: Emma Midgley

Diseño: Ritu Kenn

Infografías: Adriana Vargas Terrones

EL BOLETÍN DEL OIEA puede consultarse en línea en

www.iaea.org/es/bulletin

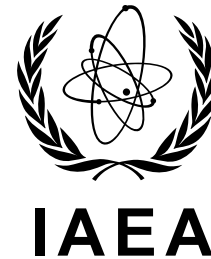
Podrá reproducirse libremente parte del material del OIEA contenido en el *Boletín del OIEA* siempre que se cite su fuente. En caso de que el material que quiera volverse a publicar no sea de la autoría de un miembro del personal del OIEA, deberá solicitarse permiso al autor o a la organización que lo haya redactado, salvo cuando se trate de una reseña.

Las opiniones expresadas en los artículos firmados que figuran en el *Boletín del OIEA* no representan necesariamente las del Organismo Internacional de Energía Atómica y este declina toda responsabilidad al respecto.

Portada:

(OIEA)

Síguenos en:



La misión del Organismo Internacional de Energía Atómica es evitar la proliferación de las armas nucleares y ayudar a todos los países, especialmente del mundo en desarrollo, a sacar provecho de los usos de la ciencia y la tecnología nucleares con fines pacíficos y en condiciones de seguridad tecnológica y física.

El OIEA, creado en 1957 como organismo independiente de las Naciones Unidas, es la única organización del sistema de las Naciones Unidas especializada en tecnología nuclear. Por medio de sus laboratorios especializados, únicos en su clase, transfiere conocimientos y competencias técnicas a sus Estados Miembros en ámbitos como la salud humana, la alimentación, el agua, la industria y el medio ambiente.

Además de proporcionar una plataforma mundial para el fortalecimiento de la seguridad física nuclear, el OIEA ha creado la *Colección de Seguridad Física Nuclear*, cuyas publicaciones, que gozan del consenso internacional, ofrecen orientaciones sobre ese tema. La labor del OIEA se centra igualmente en ayudar a reducir al mínimo el riesgo de que los materiales nucleares y otros materiales radiactivos caigan en manos de terroristas y criminales o de que las instalaciones nucleares sean objeto de actos dolosos.

Las normas de seguridad del OIEA proporcionan un sistema de principios fundamentales de seguridad y reflejan un consenso internacional sobre lo que constituye un alto grado de seguridad para proteger a la población y el medio ambiente contra los efectos nocivos de la radiación ionizante. Estas normas han sido elaboradas pensando en que sean aplicables a cualquier tipo de instalación o actividad nuclear destinada a fines pacíficos, así como a las medidas protectoras encaminadas a reducir los riesgos radiológicos existentes.

Mediante su sistema de inspecciones, el OIEA también verifica que los Estados Miembros utilicen los materiales e instalaciones nucleares exclusivamente con fines pacíficos, conforme a los compromisos contraídos en virtud del Tratado sobre la No Proliferación de las Armas Nucleares y otros acuerdos de no proliferación.

La labor del OIEA es polifacética y se lleva adelante, con participación de muy diversos asociados, a escala nacional, regional e internacional. Los programas y presupuestos del OIEA se establecen mediante decisiones de sus órganos rectores: la Junta de Gobernadores, compuesta por 35 miembros, y la Conferencia General, que reúne a todos los Estados Miembros.

El OIEA tiene su Sede en el Centro Internacional de Viena y cuenta con oficinas sobre el terreno y de enlace en Ginebra, Nueva York, Tokio y Toronto. Además, tiene laboratorios científicos en Mónaco, Seibersdorf y Viena. Por otra parte, proporciona apoyo y financiación al Centro Internacional de Física Teórica "Abdus Salam", en Trieste (Italia).

Abordar los desafíos de la clausura

Rafael Mariano Grossi, Director General del OIEA

A medida que más países adoptan la energía nucleoelectrónica para mejorar la seguridad energética y mitigar el cambio climático, el desafío que entraña clausurar instalaciones nucleares con éxito va a ser cada vez mayor. Un factor crucial para abordar ese desafío es afrontarlo con antelación.

En la actualidad se están construyendo 56 reactores en todo el mundo y muchos países están poniendo en marcha planes para ampliar su parque de centrales nucleares o para establecer su primer programa nucleoelectrónico.

A la hora de abordar el final de la vida útil de un reactor nuclear, la previsión y la innovación desempeñan papeles fundamentales. En el diseño de las nuevas centrales nucleares, incluidas las que tienen reactores modulares pequeños (SMR), se está teniendo en cuenta la clausura. Dicho de otro modo, los diseñadores están planificando, incluso antes del inicio de la construcción, el modo en que se desmantelarán sus reactores nucleares de potencia.

El OIEA desempeña una función mundial única en la tarea de facilitar la adopción de tecnologías nucleares emergentes, acompañadas de una mayor armonización de la reglamentación, a fin de posibilitar una clausura segura y eficiente cuando llegue el momento de proceder a ella.

Se prevé que, de aquí a 2050, casi la mitad de los 423 reactores nucleares de potencia con los que el mundo cuenta en la actualidad están en proceso de clausura. La clausura completa de cada uno de ellos podría prolongarse durante 20 años o más.

El OIEA ayuda a los países a garantizar que la labor de clausura se lleve a cabo conforme a los correspondientes marcos técnicos y reglamentarios, mediante la promoción de normas de seguridad y buenas prácticas internacionales a través de talleres, foros, misiones y publicaciones.

La clausura de instalaciones nucleares refleja una responsabilidad y un compromiso con un ciclo industrial y nuclear de carácter circular. Se está reciclando más material y, al mismo tiempo, se están ahorrando costos y se están reduciendo los plazos. Mientras tanto, nuevas tecnologías como la ciencia de datos, la inteligencia artificial, la robótica y los drones están aportando una mayor eficacia y seguridad a las actividades de clausura.

El OIEA garantiza la puesta en común de las lecciones aprendidas y las innovaciones extraídas de proyectos de clausura exitosos, como, por ejemplo, a través de nuestra Red Internacional de Clausura. También desempeña una función primordial para garantizar la seguridad, incluso en circunstancias complicadas. En el accidente nuclear de Fukushima Daiichi en 2011 se necesitaron innovaciones, como el uso de cartografía de muones de rayos cósmicos para ayudar a localizar el combustible defectuoso y la construcción de un muro subterráneo congelado de modo que las aguas subterráneas no se filtraran hasta el agua contaminada del interior de los edificios del reactor, así como el uso de la robótica para llevar a cabo tareas en zonas con acceso limitado. Estas innovaciones ayudaron a impulsar la eficacia y la eficiencia y, al mismo tiempo, redujeron al mínimo el peligro para los trabajadores, el público general y el medio ambiente de los alrededores.

La seguridad tecnológica es crucial, pero no es la única cuestión que tener en cuenta. Las salvaguardias son fundamentales en el proceso de clausura. Cuando se traslada o se somete a disposición final el combustible gastado, los inspectores del OIEA se encuentran presentes para verificar que el material empleado en las centrales nucleares no se desvíe del uso pacífico.

La cooperación internacional y el intercambio de conocimientos con el apoyo del OIEA son cuestiones primordiales para satisfacer la creciente demanda mundial en materia de clausura de instalaciones nucleares. Es importante no cometer errores con la parte final del ciclo del combustible nuclear, para que la energía nuclear pueda desempeñar un papel pleno y sostenible en la labor de enfrentar los desafíos más acuciantes del mundo, desde mitigar el cambio climático y la contaminación atmosférica hasta ofrecer seguridad energética y proporcionar los servicios de medicina nuclear que se necesitan para combatir el cáncer y las cardiopatías.



(Fotos: OIEA)



1 Abordar los desafíos de la clausura



4 Clausura de instalaciones nucleares Enfrentar el pasado y garantizar el futuro



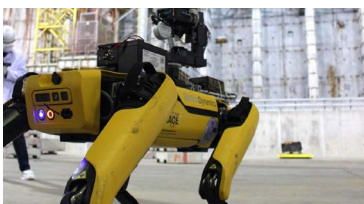
8 Infografía: La clausura de una central nuclear



10 Eslovaquia sirve de ejemplo a nivel mundial en relación con la clausura de centrales nucleares



12 Los instrumentos de nueva generación hacen posible una clausura más rápida y eficaz de los reactores nucleares tras un accidente severo



14 Robots, IA y modelos 3D

La contribución de los avances de alta tecnología
a la clausura nuclear



16 Incorporación de la clausura en el diseño

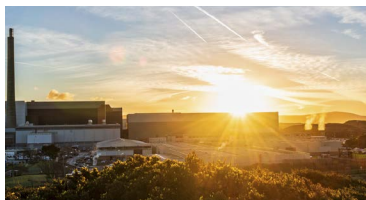
Cómo se diseñan reactores avanzados teniendo en mente
la disposición final



18 La economía circular está transformando la clausura de instalaciones nucleares



20 Infografía: **Gestión de los desechos radiactivos procedentes de la clausura**



24 **El mercado de la clausura de instalaciones nucleares, a punto de despegar**



26 **Aplicación de salvaguardias nucleares durante la clausura**



28 **Preparativos con 60 años de antelación**

La primera central nuclear de los Emiratos Árabes Unidos y los planes para clausurarla



30 **Incentivar a la próxima generación a emprender carreras profesionales en el sector de la clausura**

ENTREVISTA

32 **Opiniones expertas sobre la clausura de la planta de reprocesamiento de combustible gastado de Francia**

PANORAMA MUNDIAL

34 **Un nuevo modelo operativo para la clausura de centrales nucleares**

NOTICIAS DEL OIEA

36 **Noticias del OIEA**

40 **Publicaciones**

Clausura de instalaciones nucleares

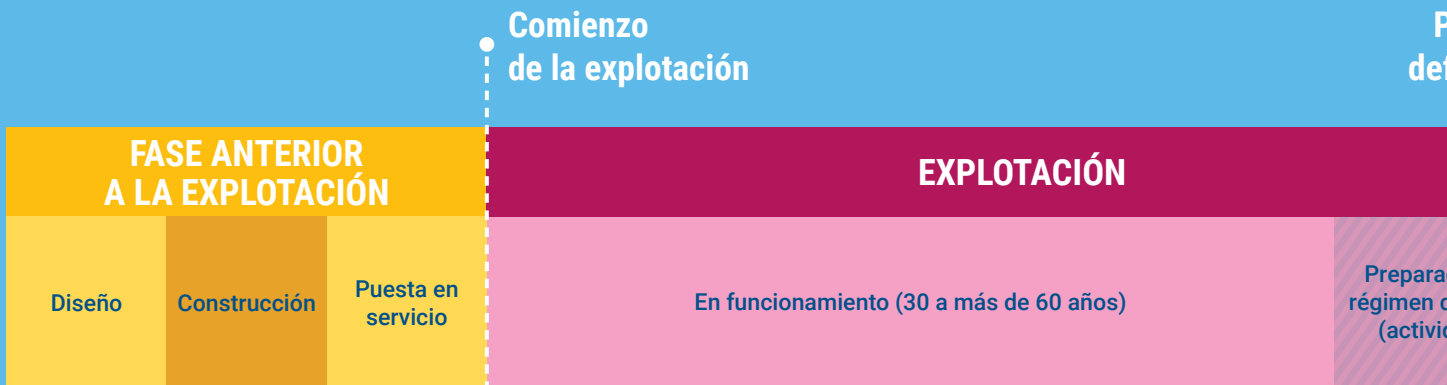
Enfrentar el pasado y garantizar el futuro

Patrick O’Sullivan

Se prevé que, durante los próximos 10 a 20 años, el número de instalaciones nucleares que deban clausurarse aumente considerablemente. No existe una relación sencilla entre la antigüedad de una instalación y el momento de la parada definitiva, dado que esta decisión puede verse afectada por multitud de factores, incluidos motivos de carácter político y económico. El momento también puede depender del mantenimiento, los costos de renovación, las condiciones del mercado de la electricidad entre otras cosas (véanse las páginas 8 y 9). No obstante, en las políticas gubernamentales se promueven, cada vez más, estrategias para el desmantelamiento inmediato en consonancia con los principios de sostenibilidad, de manera que las cargas asociadas con la clausura, como la gestión de los desechos, no se transfieran a las generaciones futuras. La posibilidad de reutilizar los emplazamientos para la construcción de nuevas instalaciones nucleares o para otros propósitos también es una cuestión importante que tener en cuenta.

Plazos y presupuesto

La clausura de una instalación nuclear de grandes dimensiones es una empresa compleja que suele requerir unos plazos y un presupuesto considerables. Por ejemplo, el costo de clausurar un reactor nuclear de potencia, incluidos los costos de gestión de desechos asociados, suele estar entre 500 millones y 2000 millones de dólares; además, clausurar reactores moderados por grafito y refrigerados por gas suele ser considerablemente más caro que cuando se trata de reactores de agua a presión o de agua en ebullición, debido a su tamaño y complejidad mayores. El proceso de clausura suele durar entre 15 y 20 años, aunque este plazo puede variar. El costo que supone clausurar una instalación del ciclo del combustible de grandes dimensiones, como una instalación utilizada para reprocessar combustible gastado, suele ser de unos 4000 millones de dólares, mientras que la clausura de esas instalaciones podría tardar más de 30 años en culminarse. La clausura de un reactor de investigación con una potencia térmica de 10 megavatios puede costar más de 20 millones



de dólares y prolongarse entre 5 y 10 años, si bien el costo depende del tamaño del reactor, su finalidad y su historial de explotación. No obstante, algunos ejemplos de éxito indican que existe la posibilidad de lograr un proceso de clausura más eficiente en términos de tiempo y menos oneroso.

Los mayores desafíos para la industria de la clausura

Debido al aumento previsto de instalaciones nucleares que se someterán a régimen de parada definitiva de aquí a 2050, será necesario contar con una importante cantidad de recursos —tanto humanos como económicos— para ejecutar los programas de clausura necesarios, algunos de los cuales se extenderán hasta el fin de este siglo. En el caso de las instalaciones comerciales, por lo general, durante su explotación se han reservado fondos con miras a cubrir los costos de la clausura. Sin embargo, la clausura de un número importante de instalaciones se financia directa o indirectamente con recursos estatales,

en cuyo caso la disponibilidad de financiación suficiente puede retrasar la ejecución. Además, para la ejecución de futuros programas de clausura también se necesitará una fuerza de trabajo abundante y muy cualificada. Alentar a la juventud a emprender una carrera profesional en la gestión de la clausura y de los desechos radiactivos es uno de los desafíos más importantes a los que actualmente se enfrenta la industria (véase la página 30).

Reciclado y reutilización de materiales de desecho

La clausura genera grandes cantidades de materiales y desechos, la mayoría de los cuales están libres de contaminación radiactiva. Se están desplegando esfuerzos para reciclar o reutilizar una gran parte de estos desechos no contaminados —como metales, restos de hormigón y tierra— siguiendo los principios de la economía circular (véase la página 28). En algunos casos, los escombros de las demoliciones se pueden utilizar para rellenar los espacios



que se crean al retirar estructuras que se encuentran bajo el nivel del terreno. También se está contemplando un mayor aprovechamiento del reciclado de chatarra, incluso para su reutilización en la industria nuclear.

Una gran proporción del material con contaminación radiactiva —normalmente en torno al 5 % del material total generado por la clausura— contiene niveles muy bajos de radiactividad y es apto para su disposición final en repositorios cerca de la superficie. Un pequeño porcentaje del material contaminado (menos del 5 % del material total generado) no es apto para su liberación del control reglamentario ni para su disposición final cerca de la superficie, debido a los altos niveles de actividad y a la presencia de radionucleidos muy activos o de período largo; la disposición final de este material en condiciones de seguridad se realizará en instalaciones subterráneas de disposición final (véanse las páginas 20, 21, 22 y 23).

Satisfacer las necesidades del futuro

Habida cuenta del alcance de las necesidades futuras relacionadas con la clausura y la posibilidad de que aparezcan nuevas tecnologías que mejoren la eficiencia de la clausura, es probable que, en un futuro próximo, se produzcan cambios significativos en la ejecución de los proyectos, una vez que

esas tecnologías se hayan adoptado ampliamente y se haya demostrado la relación costo-eficacia de estas. Entre esos avances cabe mencionar la aplicación de técnicas digitales para respaldar la planificación y optimizar la ejecución de proyectos; el mayor aprovechamiento de instrumentos teledirigidos, incluidos drones y robots para la segmentación de componentes de las plantas, el manejo de materiales, las mediciones y la descontaminación; la mayor automatización de las actividades de gestión de desechos y el uso de inteligencia artificial (véase la página 12).

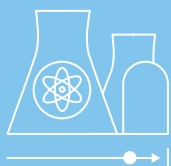
El papel de la cadena de suministro es crucial para garantizar que los futuros proyectos se ejecuten de la forma más eficaz y eficiente posible. Ya existen pruebas de organizaciones de la cadena de suministro que están creando conocimientos especializados para ofrecer una mayor variedad de servicios de clausura en esferas como la investigación y el desarrollo en relación con nuevas tecnologías, la ingeniería, el desmantelamiento y la gestión de desechos radiactivos. Un avance reciente específico para la clausura de centrales nucleares ha sido la aparición de consorcios de clausura que reúnen a empresas especializadas para ejecutar proyectos completos de clausura dentro de un presupuesto fijo, siguiendo enfoques normalizados y asumiendo todos los riesgos conexos del proyecto (véase la página 24).

¿Qué es la clausura de instalaciones nucleares?

En la industria de la energía nuclear, “clausura” es un término genérico bajo el cual se agrupan todas las actividades que posibilitan la parada definitiva, la descontaminación y el desmantelamiento de las instalaciones nucleares, así como su liberación del control reglamentario. La clausura no finaliza hasta que se hayan retirado del emplazamiento los materiales radiactivos y otros materiales peligrosos y hasta que se hayan preparado para nuevos usos los edificios y los terrenos que anteriormente se empleaban como instalaciones nucleares. La última etapa del proceso de clausura comprende la realización de amplios reconocimientos radiológicos a fin de confirmar la ausencia de cantidades importantes de radiactividad en el emplazamiento y autorizar su liberación del control reglamentario.



La clausura de instalaciones nucleares en cifras



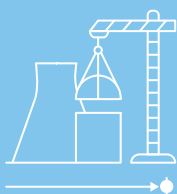
Más de
420
reactores nucleares
de potencia en
funcionamiento en
todo el mundo

En la actualidad hay alrededor de 420 reactores nucleares de potencia en funcionamiento en todo el mundo y la mayoría de ellos se acerca al fin de la vida útil para la que se diseñaron originariamente.



La mitad estará en
régimen de parada
para 2050

Hasta la mitad del actual parque en funcionamiento podría entrar en régimen de parada definitiva de aquí a 2050 y, por lo tanto, será preciso clausurarlo.



≈ **200**
retirados
del servicio

Ya se han retirado del servicio más de 200 reactores nucleares de potencia y 21 de ellos han sido clausurados por completo.

222
reactores
de investigación
en 53 países

353
instalaciones del
ciclo del combustible
en 40 países

Durante este período también es probable que se ponga en régimen de parada definitiva un número considerable de reactores de investigación que actualmente se encuentran en funcionamiento (222 en 53 países) e instalaciones del ciclo del combustible (353 en 40 países).

Es probable que se pongan
en régimen de parada definitiva

≈ **450**
reactores de
investigación

Más de
150
y instalaciones del
ciclo del combustible

Ya se han clausurado por completo en torno a 450 reactores de investigación, así como más de 150 instalaciones del ciclo del combustible.

se han clausurado por completo

Desde el cambio de siglo, se ha adquirido una experiencia considerable en materia de clausura, fundamentalmente en los países que establecieron sus programas nucleares a mediados del siglo XX, como Alemania, los Estados Unidos de América, la Federación de Rusia, Francia, Italia, el Japón y el Reino Unido. Otros —como Bulgaria, el Canadá, Eslovaquia, España, Lituania y Ucrania— también tienen experiencia en este ámbito, si bien se podría prever un número importante de programas durante los próximos 30 años en Bélgica, China, la India, el Pakistán, Corea y Suecia.

La clausura de una central nuclear

Joanne Liou

La clausura es la última etapa del ciclo de vida de una central nuclear. La planificación de la clausura comienza en la etapa de diseño de la central, para garantizar que el desmantelamiento y la gestión de los desechos conexas puedan llevarse a cabo de forma segura y eficaz sin afectar negativamente el medio ambiente. Una vez que una central nuclear entra en régimen de parada definitiva, pasa de ser una instalación con procesos operativos que tienen como fin la producción de electricidad a una cuyas actividades están asociadas a la preparación y la ejecución de la clausura, comprendidos los cambios en la organización y en los sistemas de seguridad de la central. Cuando se difiere el desmantelamiento, la instalación se coloca en una condición estable

1 PREPARACIÓN

La clave del éxito de la clausura está en **planificar y analizar atentamente todos los aspectos del proyecto** desde la fase de diseño, sin olvidar la financiación, la transformación de la organización y las aprobaciones reglamentarias.

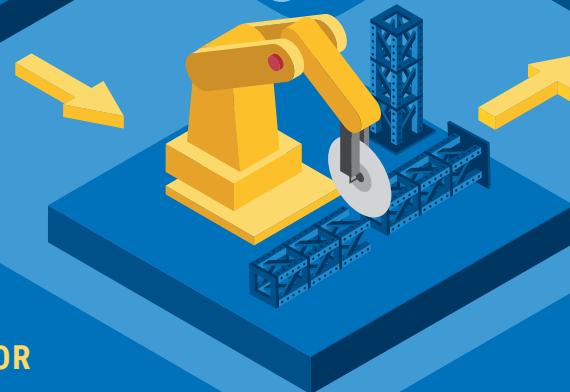
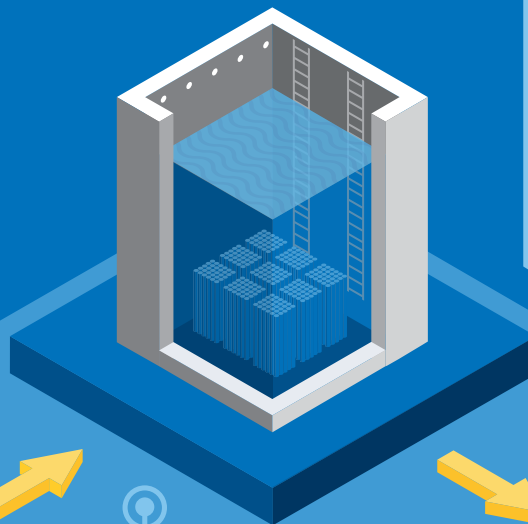


2 ETAPA POSTERIOR A LA PARADA

Se extrae el combustible del núcleo del reactor y se traslada a una instalación de almacenamiento de combustible gastado. **Se adaptan los sistemas de seguridad y de gestión de desechos de la instalación** y se determinan las características de la instalación relacionadas con la clausura y los niveles de radiación que se prevé encontrar.

3 DESCONTAMINACIÓN Y DESMANTELAMIENTO

Los componentes radiactivos se descontaminan, se cortan para reducir su tamaño y se colocan en bultos de desechos, o se retiran de la instalación para su ulterior procesamiento.



hasta que este se lleve a cabo, mientras los niveles de radiactividad decaen de forma natural. El tiempo que transcurre entre la parada definitiva de una central nuclear y la finalización de la clausura varía de un país a otro y puede ser desde un decenio, aproximadamente, hasta 70 años o más.

Tras la clausura, el emplazamiento se habilita para otros fines sociales o económicos. El proceso de clausura consta de las siguientes actividades principales:

5 LIMPIEZA Y PREPARACIÓN PARA LA REUTILIZACIÓN

Se prepara el emplazamiento para su reutilización en el futuro retirando la tierra u otros materiales contaminados para su disposición final. Se rellenan los pozos que quedan en el suelo tras la retirada de las estructuras.



4 DEMOLICIÓN

Todos los edificios, estructuras y componentes no radiactivos se dividen en partes, se organizan y se reciclan en la mayor medida posible. **Los desechos radiactivos se tratan por separado y se envían para su almacenamiento o disposición final.**

6 RECONOCIMIENTO FINAL Y FIN DEL CONTROL REGLAMENTARIO

Un reconocimiento detallado del emplazamiento garantiza al órgano regulador que **se han alcanzado los niveles de limpieza** acordados, lo que permite darle fin al control reglamentario del emplazamiento y **reutilizarlo para otros fines.**

Eslovaquia sirve de ejemplo a nivel mundial en relación con la clausura de centrales nucleares

Michael Amdi Madsen

Cuando Eslovaquia ingresó en la Unión Europea (UE) en 2004, lo hizo con una importante condición relacionada con la seguridad nuclear: el país tendría que poner en régimen de parada sus reactores V1 de la central nuclear de Bohunice y clausurarlos. Estos eran reactores de la era soviética y se consideraba que ya no cumplían las normas de seguridad nuclear pertinentes del momento. El Gobierno del país se comprometió a clausurar los reactores y, en el proceso, sentó un precedente en relación con la clausura de una central nuclear de forma segura, eficiente y eficaz. Con el apoyo del OIEA y la Comisión Europea, Eslovaquia ahora divulga lo aprendido con miras a beneficiar a otros países.

Un poco más de la mitad de la electricidad que genera Eslovaquia proviene de la energía nuclear. Los cuatro reactores del emplazamiento de Bohunice han sido de gran importancia en este sentido. La primera unidad de la central nuclear Bohunice V1, que se puso en funcionamiento en 1978, fue el primer reactor de agua a presión del emplazamiento, con un diseño de reactor de potencia refrigerado y moderado por agua (WWER-440) modelo V230. Fue una de las primeras versiones de los “reactores de potencia refrigerados y moderados por agua” concebidos por la Unión Soviética. Sin embargo, el diseño del edificio de contención presentaba algunos desafíos, puesto que tenía un mayor riesgo de rotura de las grandes tuberías en comparación con edificios que se construyeron posteriormente con diseños mejorados.

Olena Mykolaichuk, Directora de la División del Ciclo del Combustible Nuclear y de Tecnología de los Desechos del OIEA, ha trabajado en estrecha colaboración con expertos de la Empresa de Actividades Nucleares y de

Clausura (JAVYS) de Eslovaquia, entidad de titularidad pública, a medida que ha avanzado el proyecto de clausura de la central nuclear Bohunice V1. “Durante la clausura, la empresa recurrió a herramientas digitales innovadoras para garantizar que el proceso fuera seguro y eficiente. Proyectos de clausura de todo el mundo están adoptando estas herramientas”, señala la Sra. Mykolaichuk.

Entre las herramientas que empleó JAVYS, se encuentran la modelización virtual y la simulación. Mediante simulaciones, los ingenieros elaboraron procedimientos para extraer la vasija del reactor, que estaba en el pozo de cemento del reactor, y proceder a moverla y sumergirla en piscinas de agua donde se pudiera seccionar transversalmente de forma segura utilizando sierras para un mayor embalaje que permitiera un almacenamiento seguro.

Eva Hrasnova, gestora de proyectos de JAVYS, explica que el proyecto demostró que las herramientas de corte mecánicas, como las sierras de cinta y circulares utilizadas bajo el agua, permitieron fragmentar los componentes radiactivos del circuito primario de los reactores WWER-440 de forma segura y productiva. Asimismo, dice que la experiencia demostró que fue crucial utilizar una combinación de métodos de descontaminación — químicos, electroquímicos y ultrasónicos, así como métodos mecánicos, por ejemplo, el granallado y la rectificación— para una gestión de seguimiento eficaz de los desechos.

“La clausura de la central Bohunice V1 aportó una gran cantidad de conocimientos prácticos para los responsables de clausuras —señala la Sra. Mykolaichuk—.



Desde determinar formas de ahorrar espacio y dinero reutilizando edificios para el almacenamiento, hasta reciclar un alto porcentaje de acero, metales y hormigón para apoyar los principios de la economía circular”.

La clausura de la central Bohunice V1 está en curso y se espera que continúe hasta 2027. Con el apoyo financiero de la UE y el Banco Europeo de Reconstrucción y Desarrollo, se espera que el costo final del proyecto alcance los 1239 millones de euros.

Teniendo en cuenta los logros alcanzados por JAVYS en relación con la clausura de la central nuclear Bohunice V1, y con el fin de seguir reforzando la ejecución de proyectos similares en todo el mundo, la empresa fue designada centro colaborador del OIEA en marzo de 2021. Por consiguiente, como centro colaborador para la clausura de instalaciones nucleares y la gestión de desechos radiactivos, JAVYS ha podido compartir sus experiencias, en coordinación con el OIEA.

“En Bohunice podemos demostrar eficazmente los avances técnicos y la seguridad en la caracterización física y radiológica, la descontaminación, el desmantelamiento, la demolición y la gestión de los desechos conexas —afirmó Pavol Štuller, Director General de JAVYS, en la ceremonia de designación del centro colaborador, que se celebró en Viena (Austria)—. Nuestra cooperación con el OIEA se centra en los trabajos realizados y previstos, y se reforzará a medida que el centro colaborador avance en los próximos años”.

La asociación entre el OIEA y JAVYS ya está dando sus frutos, y el OIEA celebró en Trnava (Eslovaquia), en mayo de 2022, el taller internacional sobre las enseñanzas extraídas de la ejecución de proyectos de clausura de reactores de potencia refrigerados y moderados por agua. En el taller, expertos de JAVYS compartieron los conocimientos de la empresa en materia de clausura con expertos de Armenia, Bélgica, Bulgaria, China, Finlandia, Hungría, Italia, Noruega, la República Checa, Türkiye y Uzbekistán, así como representantes del BERD y la CE.

“Algunos de estos países actualmente operan reactores WWER y se encuentran en la etapa de planificación de su clausura, mientras que otros están iniciando programas nucleoelectrónicos o construyendo instalaciones nucleares y desde ya tienen en cuenta los correspondientes requisitos de clausura a largo plazo — señala la Sra. Mykolaichuk—. Estamos asistiendo a la aparición de actividades nucleares más responsables y con visión de futuro, en las que la clausura y sus desafíos se tienen en cuenta desde el principio. Estas actividades se ven reforzadas por las enseñanzas extraídas de la labor llevada a cabo por JAVYS en la central nuclear Bohunice V1”.

Visita científica en grupo a Trnava y la central nuclear de Bohunice en Eslovaquia en la que participó personal experto de Eslovenia, Georgia, Grecia, Hungría, Lituania, Rusia y Ucrania. 11 a 14 de octubre de 2011.

(Fotografía: D. Calma/OIEA)



Los instrumentos de nueva generación hacen posible una clausura más rápida y eficaz de los reactores nucleares tras un accidente severo

Nayana Jayarajan

Pocos días después de que el terremoto más violento de la historia del país asolará el Japón, estaba claro que las unidades 1 a 4 de la central nuclear de Fukushima Daiichi iban a ser paradas definitivamente. El 11 de marzo de 2011, las gigantescas olas del tsunami causado por el terremoto rompieron las defensas costeras del Japón, incluido el perímetro de la central nuclear, y causaron daños de gran magnitud. Las inundaciones dejaron fuera de servicio los generadores de emergencia, lo que provocó el recalentamiento del combustible nuclear y la fusión parcial del núcleo de tres unidades de reactor. En la central nuclear también se produjeron varias explosiones de hidrógeno que dañaron los edificios y causaron emisiones de material radiactivo. Más de 150 000 personas fueron evacuadas de la prefectura de Fukushima y las autoridades establecieron una zona de exclusión. Sin embargo, aun después de que la crisis inmediatamente posterior al tsunami quedara en gran medida resuelta, los problemas ligados a la clausura de una instalación tan dañada no hacían más que empeorar.

Clausurar una instalación nuclear tras un accidente severo es una empresa compleja que, a diferencia de la clausura tras una parada programada, suele exigir soluciones, técnicas y prácticas específicas, lo que hace que resulte muy difícil garantizar la seguridad radiológica mientras se llevan a cabo todas las operaciones. Por ejemplo, una de las tareas más delicadas en el proceso de clausura de un reactor que ha sufrido desperfectos es la retirada del combustible gastado y dañado.

En el caso del accidente nuclear de Fukushima Daiichi, parte del combustible nuclear se había fundido y había ido a parar a las secciones de contención inferiores de las unidades de reactor 1, 2 y 3. Los elevados niveles de radiación que había dentro de los edificios de contención limitaban el acceso de los trabajadores a la zona próxima al reactor. Los operadores se enfrentaban a un grave problema: ¿cómo iban a retirar el combustible dañado si desconocían su ubicación exacta?

La respuesta vino de la mano de la cartografía de muones procedentes de rayos cósmicos, una técnica empleada por primera vez hace más de 60 años y que desde entonces se viene utilizando en aplicaciones que van desde la cartografía del interior de volcanes y antiguas pirámides egipcias hasta la detección de material nuclear en contenedores de transporte. Los dispositivos de rastreo de muones detectan estas partículas subatómicas naturales de alta energía y siguen su trayectoria cuando, al atravesar un material, cambian de trayectoria,

cambios que después se utilizan para determinar la densidad del material en cuestión. Los materiales nucleares como el uranio o el plutonio son muy densos, por lo que resulta relativamente fácil detectar su presencia con esta técnica.

La cartografía de muones de rayos cósmicos fue utilizada en la central nuclear de Fukushima Daiichi para determinar la ubicación y el estado de los restos de combustible presentes en el núcleo de los reactores. En 2015, especialistas japoneses desarrollaron una técnica modificada que permitía detectar restos de tan solo 30 centímetros y que después fue utilizada para determinar el estado del combustible dañado del reactor de la unidad 1 de Fukushima Daiichi, paso previo fundamental para poder proceder a la clausura.

Este es solo uno de los muchos ejemplos que ilustran el uso de innovaciones tecnológicas para solucionar los problemas singulares e imprevistos que se plantean en el proceso de clausura y recuperación tras un accidente.

“Las consecuencias de un accidente siempre son imprevisibles, y entra dentro de lo posible que la infraestructura organizativa y técnica existente y la tecnología disponible no sean adecuadas o suficientes para responder a las necesidades que surgen después de un accidente. Cuando se clausuran instalaciones nucleares dañadas, lo que suele hacerse es concebir herramientas y soluciones tecnológicas adaptadas específicamente a cada caso —explica Vladimir Michal, experto en clausura del OIEA que codirigió un proyecto para documentar y analizar la clausura y la rehabilitación de instalaciones nucleares dañadas (el Proyecto Internacional sobre la Gestión de la Clausura y la Rehabilitación de Instalaciones Nucleares Dañadas o proyecto DAROD)—. Muchas veces, como sucedió con la cartografía de muones de rayos cósmicos, acaba dándose a estas tecnologías un uso más amplio en las labores de clausura o incluso en otros sectores”.

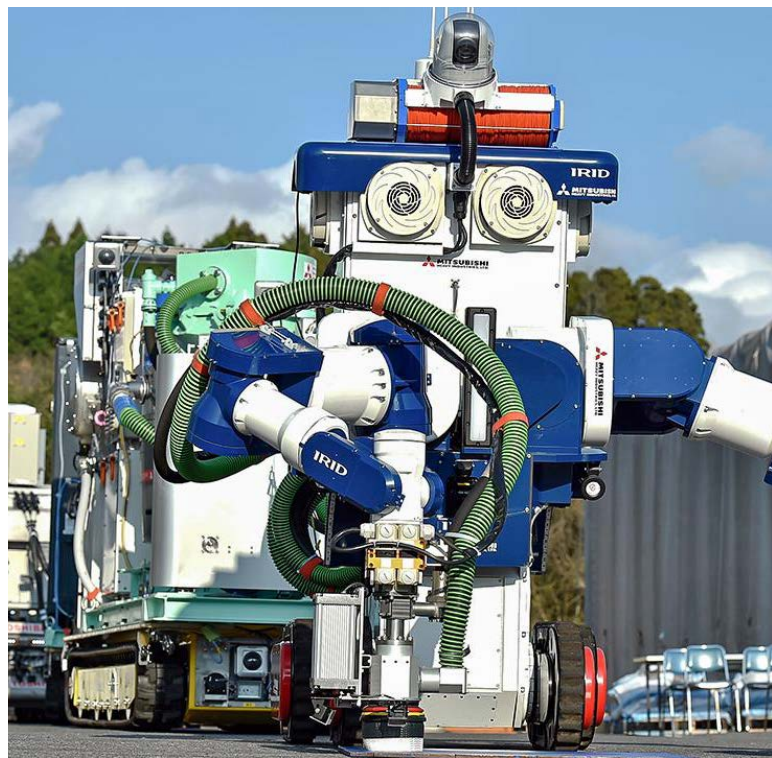
Otro ejemplo destacado es el de la construcción, entre 2016 y 2019, de un nuevo “blindaje” de confinamiento seguro que recubre el edificio del reactor de la unidad 4 de la central nuclear de Chornóbil (Ucrania). Erigido para sustituir el sarcófago provisional que se construyó tras el desastre de 1986, se trata de la mayor estructura móvil terrestre del mundo, diseñada para durar un siglo y para resistir a tornados de gran intensidad. En el proceso de construcción y posterior colocación de la nueva estructura de confinamiento, que fue levantada a unos 180 metros al oeste de la unidad 4 dañada, se utilizaron técnicas punteras de ingeniería civil.

“El nuevo confinamiento seguro no solo impide que haya emisiones de material radiactivo, sino que en el futuro será de ayuda para la clausura”, afirma Valeriy Seyda, Director General Interino de la empresa estatal especializada que se ocupa de la central nuclear de Chornóbil. La estructura de confinamiento seguro está diseñada para evitar la emisión de contaminantes radiactivos, proteger las estructuras internas del reactor y facilitar la clausura. Para este último fin, consta de dos grúas teledirigidas de última generación suspendidas justo por debajo del techo que, llegado el momento, permitirán clausurar la unidad 4 protegiendo al mismo tiempo a los trabajadores y el medio ambiente.

En la central nuclear de Fukushima Daiichi se empleó una técnica de ingeniería ya contrastada, que consiste en construir una barrera subterránea de suelo congelado para impedir la afluencia al emplazamiento de aguas subterráneas y que estas puedan mezclarse con el agua ya contaminada del interior de los edificios del reactor. Para establecer esa barrera de 1500 metros se congeló el suelo, a fin de impermeabilizarlo e impedir la entrada de aguas freáticas, lo cual reduce la cantidad total de aguas contaminadas que hay que tratar.

Hoy en día, el uso de tecnologías avanzadas de robótica y de trabajo a distancia permiten llevar a cabo labores de clausura en zonas con elevados niveles de radiación. En la central nuclear de Fukushima Daiichi, por ejemplo, se utilizan robots para efectuar labores de monitorización y medición, prospección, descontaminación y preparación de la retirada de restos de combustible.

“Los robots teledirigidos provistos de instrumental de visualización y medición de la radiación son un ámbito prioritario de investigación y desarrollo, ya que ayudan a reducir al mínimo la exposición a la radiación de los trabajadores del emplazamiento y a avanzar sin pausa hacia la clausura de Fukushima Daiichi”, explica Kentaro Funaki, Director Ejecutivo del Organismo de Energía Atómica del Japón. También destaca que los proyectos internacionales conjuntos constituyen un ámbito de trabajo fundamental dentro de las muy diversas iniciativas de investigación y desarrollo financiadas con fondos gubernamentales. “Se está llevando a cabo una enorme labor para visualizar en tres dimensiones los puntos de intensa radiactividad que se encuentran cerca de las unidades 1 y 2 de Fukushima Daiichi. El hecho de poner en común y combinar los resultados de la investigación nacional y la investigación internacional conjunta ha deparado grandes frutos. Es algo que seguiremos haciendo en el futuro”, afirma.



Robot descontaminador desplegado en Fukushima Daiichi para apoyar las actividades de clausura

(Fotografía: Instituto Internacional de Investigación sobre la Clausura de Centrales Nucleares, Japón)

El uso de tecnologías no nucleares en entornos nucleares plantea numerosos problemas, entre ellos los elevados costos de desarrollo, que se explican sobre todo por la presencia de radiación y por la incertidumbre respecto a las condiciones exactas en las que va a operar el instrumental. Con todo, gracias a los avances en los sistemas de cableado y otros componentes esenciales, aunados a la creación de equipo resistente a la radiación, ahora es posible emplear tecnologías robóticas de forma segura y eficaz en estos entornos difíciles. Además, el uso de tecnologías láser en estos lugares permite escanear los espacios interiores, a menudo inaccesibles para el ser humano, protegiendo con ello la salud y la seguridad de los trabajadores. “Estos avances aumentan sobremanera las posibilidades de dismantelar de forma segura y eficaz instalaciones en las que se haya producido un accidente nuclear severo, incluso en situaciones de extrema dificultad”, concluye el Sr. Michal.

Robots, IA y modelos 3D

La contribución de los avances de alta tecnología a la clausura nuclear

Jeffrey Donovan

Los robots, los drones, la inteligencia artificial (IA) y otras tecnologías digitales emergentes ya están favoreciendo el avance de proyectos de clausura nuclear en todo el mundo, y están llamados a desempeñar un papel cada vez más esencial en el sector, a medida que más y más países optan por el desmantelamiento inmediato de sus instalaciones nucleares retiradas.

Para ayudar a ejecutar esta tarea de manera eficiente y reducir riesgos (por ejemplo, financieros y radiológicos), los países están recurriendo a instrumentos de alta tecnología como la realidad virtual y la simulación en 3D, una tendencia que, según parece, se intensificará en los próximos años, conforme se vayan retirando progresivamente varias centrales nucleares y otras instalaciones nucleares obsoletas.

“Ya sea con robots capaces de desafiar las radiaciones en emplazamientos donde se han producido accidentes, como es el caso de Fukushima Daiichi en el Japón, o con la modelización tridimensional para planificar mejor el desmantelamiento de centrales retiradas, lo cierto es que el sector de la clausura nuclear se encuentra cada vez más a la vanguardia de la innovación tecnológica —señala Mikhail Chudakov, Director General Adjunto del OIEA y Jefe del Departamento de Energía Nuclear—. Estas tecnologías aportan conocimientos vitales para la planificación y ejecución de proyectos, especialmente en situaciones que podrían entrañar riesgos para las personas, y contribuyen así a garantizar que estas labores se llevan a cabo de manera segura y eficaz”.

Desde cualquier parte de Europa hasta Asia y las Américas, abundan ejemplos en los que la tecnología vanguardista ha servido para superar singulares desafíos y hacer avanzar los proyectos de clausura. Al frente de esta tendencia se encuentra el Instituto de Tecnología de la Energía (IFE) de Noruega, una organización que en 2019 pasó a ser centro colaborador del OIEA y, ante todo, presta apoyo a las actividades del OIEA y a los Estados Miembros en la digitalización de la gestión del conocimiento en el ámbito de la clausura nuclear. El IFE ha sido pionero en el uso de sistemas de realidad virtual para apoyar el mantenimiento y la clausura en entornos nucleares.

“Esas tecnologías se utilizan al impartir capacitación a los trabajadores, por ejemplo, sobre visualización de las radiaciones, para que comprendan las condiciones radiológicas —cuenta István Szöke, responsable de investigación en el IFE—. Los conocimientos especializados del IFE se centran en la integración de modelos digitales 3D de activos nucleares con modelos físicos y de IA, incluidos modelos físicos de la

radiación en tiempo real. Esto quiere decir que la visualización de la radiación se fundamenta en la física pura, y con los modelos de transporte de radiación se pueden calcular, por ejemplo, los niveles de radiación presentes en el entorno circundante al equipo que va a desmantelarse, que se visualiza con fines de planificación y capacitación”. Esta práctica es cada vez más habitual en los programas de clausura, también para reactores de potencia y de investigación, así como en el desmantelamiento de instalaciones del ciclo del combustible.

Hace poco, el IFE ha apoyado una iniciativa de colaboración internacional destinada a establecer sistemas modulares integrados de gestión de la información que puedan usarse en todo el proceso de clausura. Esto entraña la construcción de un sistema integrado basado en el barrido tridimensional y el diseño asistido por computadora (CAD) o la producción de modelos de gestión de la información relativa a la construcción que incorporen datos radiológicos en 3D y de otra índole. Un modelo o diseño de ese tipo gestiona toda la información, se integra con modelos físicos radiológicos y otros sistemas, y los aúna en un sistema que apoya el principio de reducir el riesgo radiológico al “valor más bajo que pueda razonablemente alcanzarse” (ALARA).

Las simulaciones digitales y la modelización tridimensional también se han utilizado con éxito en proyectos de clausura en Eslovaquia e Italia. Sogin, la compañía estatal italiana de clausura y gestión de desechos radiactivos, ha utilizado modelos y simulaciones en 3D para ayudar a preparar el desmantelamiento de reactores y gestionar los flujos de desechos generados. La Empresa de Actividades Nucleares y de Clausura (JAVYS) de Eslovaquia ha empleado modelos y simulaciones en 3D en el desmantelamiento de componentes de reactores de potencia en las centrales nucleares Bohunice A1 y V1, ambas situadas en el país. Al igual que el IFE, Sogin y JAVYS dan a conocer a la comunidad nuclear mundial sus conocimientos y experiencia, como centros colaboradores del OIEA en materia de clausura y gestión de desechos radiactivos.

Una tendencia que cabe señalar en ese sentido es el creciente uso de la robótica, con la que es posible reducir el riesgo para el personal, en la medida en que le permite trabajar lejos de las herramientas desplegadas para manipular los componentes, y se incrementa la eficiencia, ya que los robots autónomos y teledirigidos tienen mayor facilidad para acceder a zonas de difícil acceso y trabajar en ellas. Los robots móviles con sensores y sistemas 3D se utilizan cada vez más para realizar un barrido de las instalaciones y recopilar datos que puedan

emplearse para construir modelos 3D del emplazamiento. “Un objetivo muy apremiante para el sector en estos momentos es averiguar cómo utilizar la IA para convertir el barrido tridimensional, que ahora es muy fácil de producir, en modelos inteligentes de gestión de la información relativa a la construcción —afirma el Sr. Szóke—. Esto guarda una estrecha relación con el desarrollo de “gemelos digitales” de las instalaciones, que pueden utilizarse para apoyar la clausura de sistemas complejos, pero también para organizar el conocimiento de la instalación en todo su ciclo de vida”.

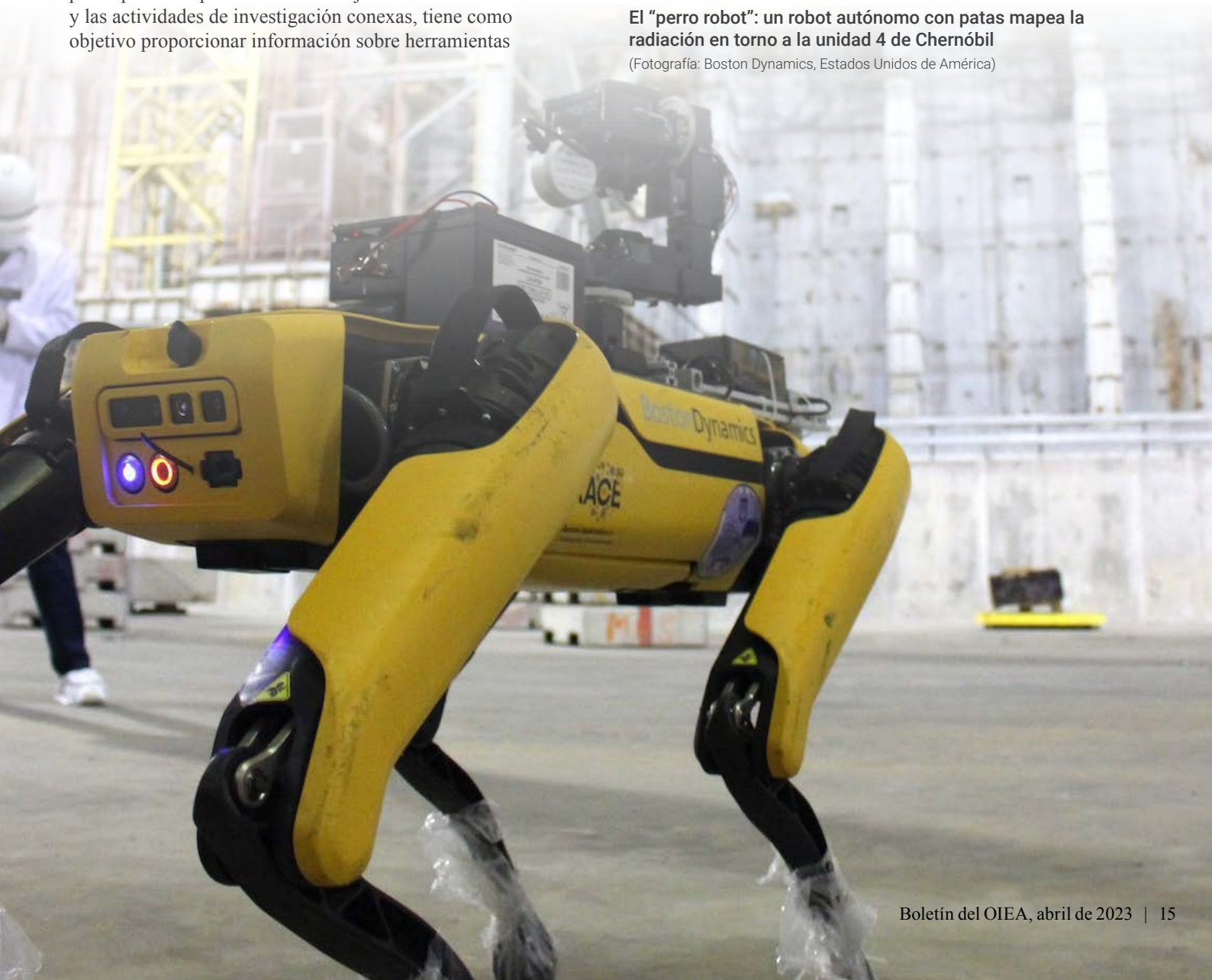
En 2022, el OIEA presentó una iniciativa mundial destinada a impulsar el papel de las tecnologías nuevas y emergentes en la clausura de instalaciones nucleares. Esta iniciativa, que es un proyecto colaborativo de organizaciones que participan en la planificación o la ejecución de la clausura y las actividades de investigación conexas, tiene como objetivo proporcionar información sobre herramientas

y tecnologías digitales nuevas y emergentes utilizadas en la gestión de datos, la planificación, la concesión de licencias y la ejecución de procesos de clausura.

“El objetivo del proyecto es aprovechar los conocimientos especializados de una amplia gama de organizaciones dedicadas a la clausura para sacar el máximo partido posible a las tecnologías nuevas y emergentes”, declara Olena Mykolaichuk, Jefa de la División del Ciclo del Combustible Nuclear y de Tecnología de los Desechos del OIEA. El OIEA reunirá las conclusiones del proyecto en un informe que verá la luz en 2025 y en el que figurará información sobre las experiencias adquiridas en varios países, con el objetivo de seguir apoyando proyectos de clausura en todo el mundo para que se lleven a cabo con éxito.

El “perro robot”: un robot autónomo con patas mapea la radiación en torno a la unidad 4 de Chernóbil

(Fotografía: Boston Dynamics, Estados Unidos de América)



Incorporación de la clausura en el diseño

Cómo se diseñan reactores avanzados teniendo en mente la disposición final

Joanne Liou

Quizá planificar desde buen comienzo el final de la vida no resulte algo especialmente atractivo o prioritario. Sin embargo, tratándose del ciclo de vida de una instalación nuclear, la utilidad de tener en cuenta el término de este ciclo está llevando a los diseñadores, proveedores y órganos reguladores a pensar anticipadamente en la clausura. Esta lógica proactiva, denominada “incorporación de la clausura en el diseño”, es tributaria de las prácticas óptimas y las lecciones extraídas de la experiencia del pasado y recoge el concepto de “incorporación en el diseño” que también se aplica en los ámbitos de la seguridad tecnológica, la seguridad física y las salvaguardias. Si piensan en la clausura desde buen principio, los desarrolladores de una instalación pueden tomar decisiones relativas al diseño que, llegado el momento, hagan más segura, eficiente y económica la clausura.

“Teniendo en cuenta la clausura desde la fase de diseño de una instalación nuclear es posible optimizar su fase final, la clausura, que es obligatoria en el ciclo de vida de un reactor”, señala Helena Mrazova, Especialista en Tecnologías de Clausura del OIEA. Al diseñar las primeras generaciones de centrales nucleares se prestaba atención sobre todo a su comportamiento operacional, dejando para más adelante la cuestión de la clausura. El diseño de algunos reactores de grafito refrigerados por gas construidos en Francia en la década de 1970, por ejemplo, no incorporaba procedimiento alguno para su desmantelamiento, cosa que ahora está resultando difícil llevar a cabo.

“Tenemos instalaciones de más de 60 metros de altura y 30 metros de diámetro, con paredes de hormigón de más de 5 metros de espesor que albergan toneladas de grafito en el núcleo del reactor. El desmantelamiento de estos reactores está resultando muy complicado sencillamente porque no fueron diseñados para ser clausurados. La compañía eléctrica francesa EDF (Électricité de France) creó hace poco un centro de demostración sobre la clausura de reactores de grafito (que ha pasado a ser también centro colaborador del OIEA) para ensayar, mejorar y optimizar innovadoras herramientas y tecnologías de manipulación a distancia con modelos a escala real y modelos digitales en 3D que permiten comprobar la viabilidad de las hipótesis de clausura y optimizar el proceso en estos reactores”, explica la Sra. Mrazova.

Grandes esperanzas y posibilidades

La incorporación de la clausura en el diseño persigue varios objetivos: planificar mejor la secuencia de las actividades de clausura, reducir la eventual exposición de los trabajadores a la radiación y rebajar la cantidad de desechos radiactivos, aligerando con ello la carga impuesta a las instalaciones de tratamiento de desechos y también a las generaciones futuras. “La incorporación de la clausura en el diseño tiene que ver no solo con las características de diseño físicas, sino también con el modo en que están organizadas las empresas para planificar y llevar a cabo las actividades de clausura,” dice Marcel Devos, Director de Asuntos Reglamentarios de Prodigy Clean Energy, empresa que se dedica a la creación de centrales nucleares transportables marinas (en plataforma flotante) o terrestres. Según explica el Sr. Devos, exdirector del programa de examen de diseños de proveedores (*Vendor Design Review*, VDR) de la Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear (CCSN): “para que el proceso del final de su vida útil discorra satisfactoriamente es indispensable determinar los mecanismos de financiación y definir las responsabilidades ligadas a la clausura”.

Aunque la incorporación de la clausura en el diseño no ha sido adoptada por todos los países, el Canadá es uno de los países que han dado pasos para integrar esta previsora práctica. En el análisis que efectúa de los proveedores de reactores, la CCSN tiene en cuenta la cuestión de la incorporación de la clausura en el diseño, para lo cual aplica las enseñanzas extraídas de la experiencia que van recogiendo tanto el OIEA como la Agencia para la Energía Nuclear de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos. “Los futuros propietarios y explotadores de centrales nucleares del Canadá esperan cada vez más de los proveedores que superen el proceso VDR y dispongan de un plan para subsanar las deficiencias que se hayan detectado. El sector empieza a ser consciente de que las consideraciones relativas al final de la vida útil son una de las prioridades en los procesos de concesión de licencia y evaluación del impacto ambiental”, explica el Sr. Devos.

Existe un creciente interés por los reactores modulares pequeños (SMR), que son un tipo de reactor nuclear avanzado con menor capacidad nucleoelectrónica (de hasta 300 MW(e))

por reactor, generalmente). “Los creadores de la nueva generación de centrales nucleares, incluidos los SMR, tienen una magnífica oportunidad para abordar, a través del proceso de diseño y despliegue, los interrogantes sociales que se plantean en relación con el final de la vida útil de una instalación nuclear, a la vez que aceleran la clausura y reducen la carga que supone la gestión de los desechos para las futuras generaciones”, señala el Sr. Devos.

Clausura de los SMR

Hay en todo el mundo más de 80 diseños y conceptos de SMR que se encuentran en diferentes fases de desarrollo. Dado que los distintos tipos y modelos de SMR difieren en tamaño, material y tecnología utilizada, también será distinta la lógica que rija la clausura de estos reactores avanzados. “El proceso de clausura dependerá del diseño y la accesibilidad de la instalación, de cuán compacta sea esta y también de los planes y la praxis del país en cuanto a gestión del combustible gastado y de los desechos radiactivos”, señala la Sra. Mrazova.

El carácter modular y la diversidad de modelos de despliegue de los SMR podrían traer consigo una redefinición de los procedimientos convencionales de clausura. Algunos SMR más pequeños, habitualmente llamados microrreactores, están diseñados para ser ensamblados en la propia fábrica y transportados como una sola unidad hasta el lugar donde serán instalados. Al final de su vida útil, el módulo sería devuelto a la fábrica de origen para que esta proceda a la recarga de combustible o lo lleve a una instalación de clausura. “Semejante solución podría reducir el costo y la escala de las actividades que tienen lugar en el emplazamiento de la central nuclear, reforzar la seguridad nuclear y radiológica e inducir mayores niveles de aceptación del despliegue de SMR”, dice la Sra. Mrazova. “También hay posibilidades de normalizar algunas de las actividades de clausura, como la descontaminación o el desmantelamiento del equipo primario”. Tal planteamiento, sin embargo, deja ciertas tareas desatendidas, como la creación de equipo de manipulación a distancia y herramientas que se destinen específicamente al desmantelamiento.



Muchos SMR están diseñados con un tamaño lo suficientemente pequeño para poder ser trasladados en camión o contenedores de transporte.

(Fotografía: Laboratorio Nacional de Oak Ridge, Departamento de Energía de los Estados Unidos)

El conocimiento de los materiales utilizados, como el tipo de acero, y de las normas que deben cumplir los productores de acero, entre ellas la de que haya un nivel ínfimo de impurezas para reducir al mínimo la activación, influiría positivamente en la gestión de los desechos resultantes de la clausura. El hecho de incorporar la clausura en el diseño permitiría limitar los niveles de impureza y su consiguiente influencia en el costo del desmantelamiento al final de la vida útil, pues se habría tenido en cuenta de antemano la composición de los materiales.

“La regla general que rige para la clausura de instalaciones nucleares, incluidos los SMR, es que su diseño facilite la clausura y, sobre todo, que esta sea tenida en cuenta desde las fases iniciales”, observa la Sra. Mrazova. “Las características distintivas de los SMR, como su diseño modular y los materiales utilizados en ellos, deberían deparar un proceso de clausura más eficaz y menos costoso y reducir la tasa de dosis diaria recibida por trabajadores de todo el mundo que intervienen en la clausura”.

El OIEA está preparando una publicación dedicada a los aspectos de diseño de los SMR, que en principio ha de ver la luz en 2024.

La economía circular está transformando la clausura de instalaciones nucleares

Artem Vlasov

El modelo económico lineal tradicional —que consiste en extraer materiales, transformarlos en productos manufacturados y desecharlos una vez utilizados— suele ser objeto de críticas debido a la gran cantidad de residuos y contaminación que genera y al hecho de que contribuye al cambio climático y a la pérdida de biodiversidad. Según el Panel Internacional de Recursos del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, la extracción y el procesamiento de los recursos naturales son responsables de aproximadamente la mitad de las emisiones totales de gases de efecto invernadero a escala mundial.

Una alternativa a este modelo, conocida como economía circular, ofrece una forma de reducir los residuos y la contaminación asociada a ellos. Se trata de un modelo de producción y consumo que procura hacer un uso eficaz de los recursos durante el mayor tiempo posible reduciendo su consumo, reutilizándolos y reciclándolos.

La adopción de principios de economía circular en el proceso de clausura de las instalaciones nucleares puede reportar múltiples beneficios. La clausura es un proceso multidisciplinar que dura por lo general diez años o más y durante el cual se descontaminan, desmantelan y derriban las instalaciones nucleares con el objetivo de levantar el control reglamentario del emplazamiento y de dar a este un nuevo uso. Si durante este proceso se reciclan los materiales, se reduce la cantidad de desechos generados. Esto, además, tiene la ventaja de reducir el costo de la clausura y de disminuir el riesgo de que se produzcan retrasos.

En la ciudad francesa de Grenoble había seis instalaciones nucleares. El emplazamiento, que ya ha sido clausurado, es en la actualidad un centro de investigación y desarrollo en el ámbito de la energía renovable.

(Fotografía: Unsplash)

“Al aplicar los principios de economía circular a la clausura, podemos reducir la cantidad de desechos radiactivos y no radiactivos que hay que eliminar y, al mismo tiempo, la cantidad de materia prima que es necesario extraer del suelo, —explica Arne Larsson, Director de Tecnología de Desechos Radiactivos y de Clausura en Cyclife Sweden—. De esta forma, podemos reutilizar los materiales y equipos de las instalaciones, los edificios y las estructuras existentes, y promover la readaptación del emplazamiento para otros fines útiles”.

En todo el mundo hay más de 200 reactores nucleares de potencia en régimen de parada para su clausura, y se prevé que en los próximos decenios se sometan a régimen de parada y se clausuren cientos de reactores que actualmente están en funcionamiento. En la actualidad, las instalaciones nucleares se diseñan de tal forma que no se pone la primera piedra hasta que no haya un plan de gestión de los desechos. Por el contrario, en el diseño de los reactores nucleares construidos en las décadas de 1960 y 1970 no se tuvieron en cuenta los principios de circularidad.

No obstante, incluso en el caso de instalaciones antiguas es posible llevar a cabo una clausura eficaz aplicando los principios de circularidad: hasta el 90 % de los materiales no radiactivos de una central nuclear, como metales, hormigón e incluso la ropa de trabajo, pueden reutilizarse o reciclarse. Solo en torno a un 3 % de los materiales, principalmente el combustible gastado, son muy radiactivos y, aun así, más del 95 % de este combustible puede reprocesarse para fabricar combustible nuevo y subproductos.



“La adopción de los principios de economía circular puede ser un factor que impulse considerablemente la reducción al mínimo de los desechos, el aumento de la eficiencia y la mejora de la sostenibilidad —explica Vladimir Michal, Jefe Interino de la Sección de Clausura y Rehabilitación Ambiental del OIEA—. Al clausurar instalaciones nucleares se generan grandes cantidades de materiales que se pueden reciclar y reutilizar para otros fines”.

De seis instalaciones nucleares a un centro de energías renovables

En los trabajos de clausura ya está generalizada la práctica del reciclado. Una vez desmantelada la instalación, pueden fundirse los componentes metálicos de gran tamaño y transformarse en metal “nuevo” para devolverlo a la economía. Las piezas de los equipos pueden reutilizarse en otras instalaciones nucleares en funcionamiento, y los materiales de los edificios derribados, como el hormigón, pueden emplearse como material de relleno para la rehabilitación del emplazamiento o en otros proyectos de construcción, como viviendas y carreteras. Por ejemplo, cuando en 2009 se clausuró el reactor de investigación australiano MOATA, situado en Sydney, más del 85 % de los materiales se reutilizaron o reciclaron.

El resto de los materiales que no es posible descontaminar y limpiar para su reutilización o reciclado tras la clausura se eliminan como desechos radiactivos en repositorios de diferentes tipos hasta que dejan de representar un riesgo para las personas o el medio ambiente (véase la página 22).

Hay varios ejemplos de emplazamientos nucleares destinados a nuevos fines, como centrales nucleares, reactores de investigación y otras instalaciones utilizadas en medicina o en la industria. Los emplazamientos de las

centrales nucleares pueden transformarse en instalaciones de procesamiento y almacenamiento de desechos o en centros de investigación para impartir capacitación al personal de operación. Pueden convertirse en polígonos industriales en los que se da una nueva vida a los edificios reutilizándolos para otras industrias convencionales, lo que atrae a las empresas y genera nuevos puestos de trabajo.

En la ciudad francesa de Grenoble se descontaminaron y desmantelaron en 2012 seis instalaciones nucleares: tres reactores de investigación, un laboratorio y dos instalaciones de almacenamiento de desechos radiactivos. El emplazamiento se utiliza actualmente como centro de investigación y desarrollo de tecnologías de la energía verde y fuentes de energía renovables, en particular, vehículos eléctricos, baterías e hidrógeno.

El OIEA ofrece un espacio para que países, organizaciones y particulares cooperen y pongan en común conocimientos y tecnología en el ámbito de la clausura. La plataforma de aprendizaje virtual del OIEA contiene conferencias sobre la clausura, la rehabilitación ambiental, y la gestión de desechos radiactivos y de combustible gastado.

La Red Internacional de Clausura (IDN) del OIEA se creó en 2007 para ofrecer un foro en el que profesionales del ámbito de la clausura pudieran colaborar e interactuar. Además, el OIEA apoya la creación de capacidad en los Estados Miembros y facilita misiones de expertos, servicios de examen por homólogos y de asesoramiento para programas de clausura y otras actividades conexas, como la gestión de desechos radiactivos y de combustible gastado.

“La economía circular ofrece un enfoque prometedor para adaptar la industria a la sostenibilidad y la circularidad, reduciendo el impacto ambiental y conservando los recursos para las generaciones futuras”, concluye el Sr. Michal.

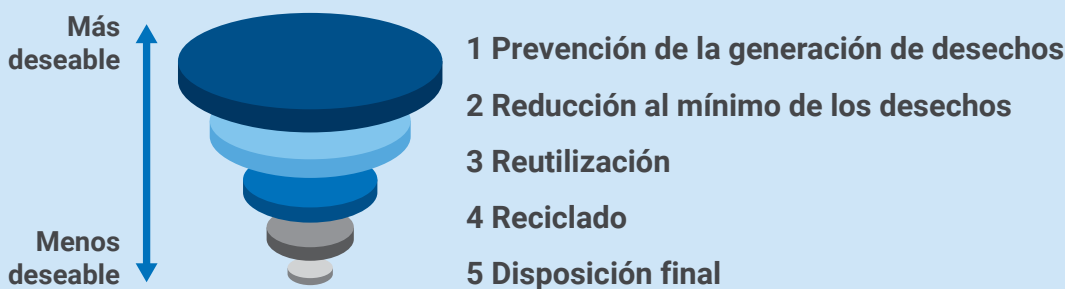


Gestión de los desechos radiactivos procedentes de la clausura



Durante una clausura, los materiales radiactivos y los objetos contaminados con radiactividad —ya sea ropa de protección o partes de un reactor— se caracterizan y clasifican para propiciar la prevención de la generación de desechos, así como su minimización, reutilización y reciclado. Los materiales y objetos radiactivos están sujetos a control reglamentario. Sin embargo, la mayor parte del material procedente de la clausura está dispensada del control reglamentario, debido a su muy bajo nivel de radiactividad. Los materiales radiactivos que no son aptos para su reciclado se clasifican y se embalan para su almacenamiento temporal, antes de su disposición final, en instalaciones construidas a tal efecto. Este es el último paso en la gestión de los desechos radiactivos.

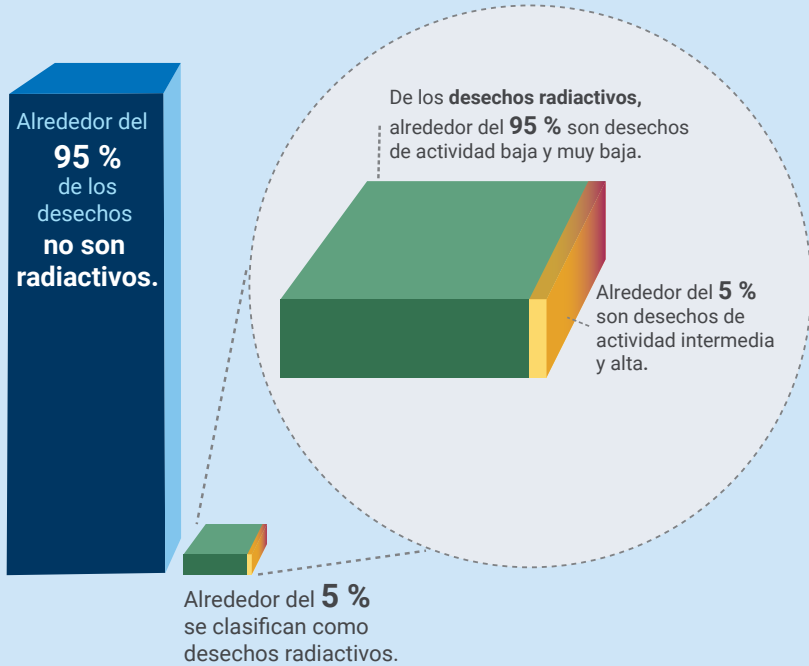
La jerarquía de los desechos



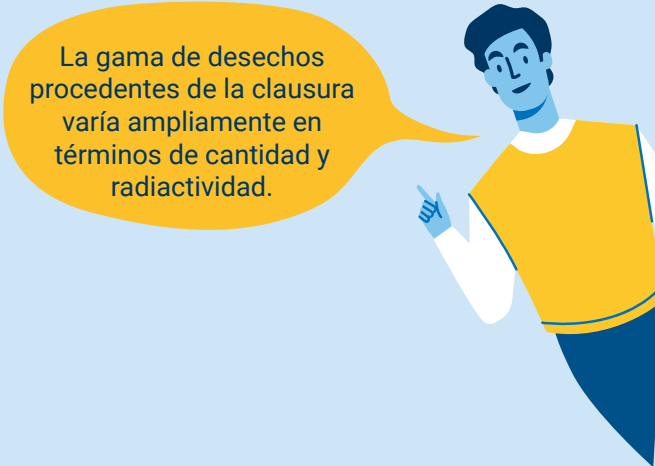
Una prioridad es reducir al mínimo la generación de desechos radiactivos.

La jerarquía de los desechos, elemento fundamental en la ejecución de una clausura y gestión de desechos sostenibles, establece las prioridades en lo que se refiere a la gestión de los desechos. Al tener en consideración la clausura durante la fase de diseño de una instalación nuclear, se previene y reduce al mínimo la generación de desechos.

Cantidades de desechos procedentes de la clausura



Alrededor del 5 % del material resultante de la clausura de una central nuclear de potencia es radiactivo en niveles que obligan a gestionarlo como desecho radiactivo (véanse más abajo las aclaraciones).



Clases y tipos de desechos radiactivos

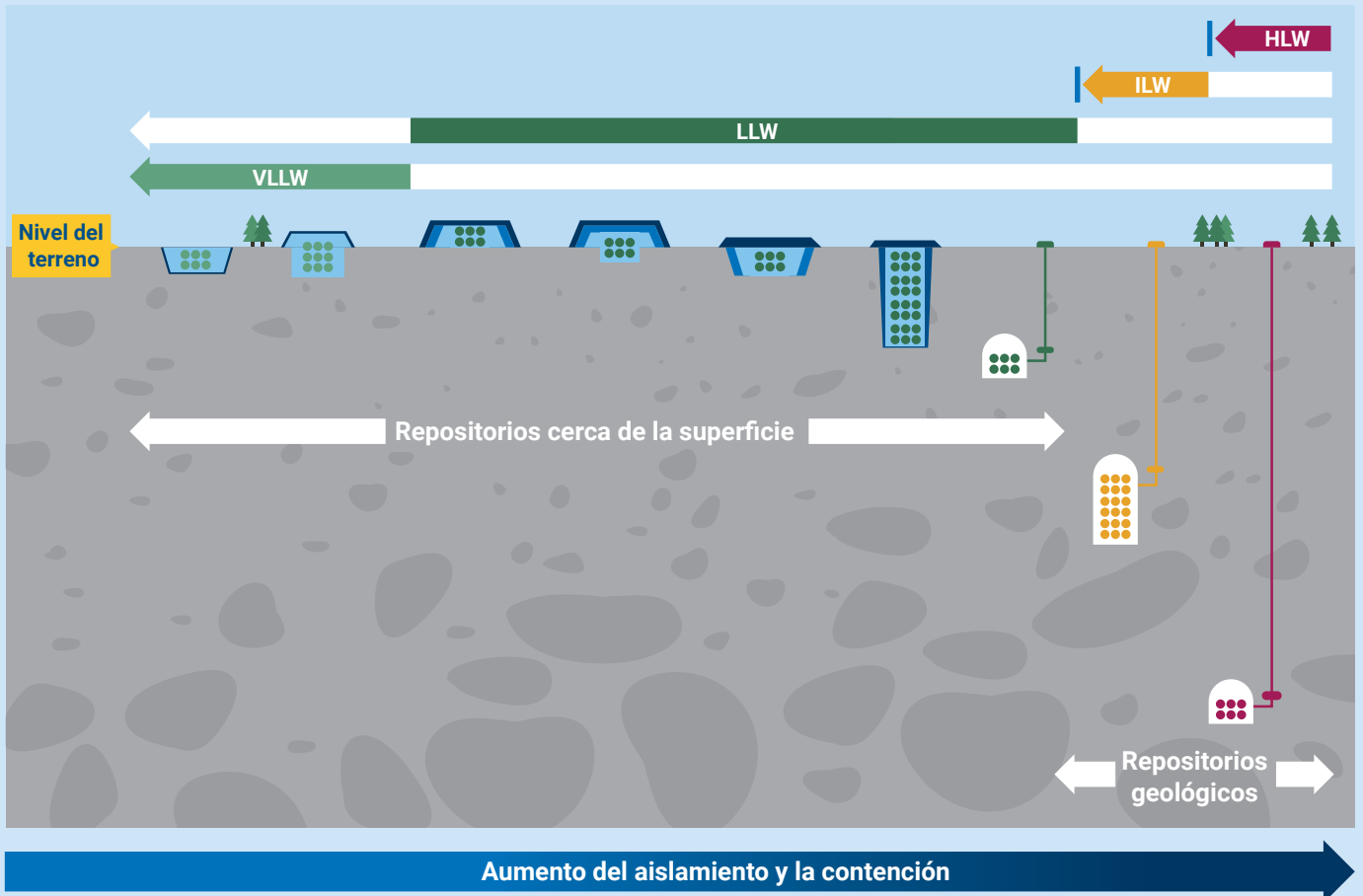
VLLW	LLW	ILW	HLW
<p>Desechos de actividad muy baja</p> <p>Hormigón, tierra, escombros...</p>	<p>Desechos de actividad baja</p> <p>Equipo de protección individual, paños, sistemas auxiliares de descontaminación y desmantelamiento de estructuras...</p>	<p>Desechos de actividad intermedia</p> <p>Componentes del circuito primario del reactor, metales altamente contaminados...</p>	<p>Desechos de actividad alta</p> <p>Combustible gastado, vainas de combustible gastado, desechos vitrificados procedentes del reprocesamiento...</p>
<p>Aptos para su disposición final en vertederos cerca de la superficie.</p>	<p>Aptos para su disposición final en instalaciones cerca de la superficie. Requieren aislamiento y contención durante varios cientos de años.</p>	<p>Aptos para su disposición final a mayor profundidad en repositorios geológicos. Requieren aislamiento y contención durante varios miles de años.</p>	<p>Aptos para su disposición final en formaciones geológicas profundas a varios cientos de metros bajo la superficie. Requieren aislamiento y contención durante varios miles de años.</p>

Las instalaciones de disposición final de desechos radiactivos proporcionan aislamiento y contención mediante barreras múltiples y funciones de seguridad.

Reutilización y reciclado de materiales que quedan dispensados del control reglamentario



Opciones de disposición final en función de la clase de desecho radiactivo



¿Cómo se gestionan de forma segura los desechos radiactivos?



Mediante múltiples barreras de protección, la población y el medio ambiente están a salvo de los peligros y los riesgos derivados del uso de radiación ionizante, incluida la de los desechos radiactivos.



El acceso a los emplazamientos donde se gestionan los desechos radiactivos está estrictamente controlado.



De conformidad con procedimientos estrictos, la seguridad de la gestión de desechos radiactivos es la responsabilidad primaria del operador y está supervisada por organismos reguladores independientes.



Personal cualificado y experimentado gestiona los desechos radiactivos



La autorización reglamentaria de las instalaciones y actividades de gestión de desechos se basa en una justificación de la seguridad y en evaluaciones de la seguridad.

Se han dedicado varios decenios a la investigación, el desarrollo y la demostración de la **disposición final de desechos radiactivos en condiciones de seguridad.**



¿Cómo contribuye la gestión segura de los desechos radiactivos a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas?



- ▲ La gestión segura de los desechos radiactivos, las emisiones al medio ambiente, la clausura y la rehabilitación protege la vida terrestre y submarina.
- ▲ La gestión segura de los desechos radiactivos, las emisiones al medio ambiente, la clausura y la rehabilitación contribuye al reciclado y la reutilización de materiales, objetos y emplazamientos.
- ▲ Las tecnologías nucleares son sostenibles cuando son seguras durante toda su vida útil, lo cual abarca la gestión segura de los desechos radiactivos, las emisiones al medio ambiente, la clausura y la rehabilitación.
- ▲ El uso sostenible de las tecnologías nucleares contribuye de manera directa a nueve ODS.

El mercado de la clausura de instalaciones nucleares, a punto de despegar

Joanne Burge y Emma Midgley

A medida que muchas centrales nucleares de todo el planeta se acercan al final de su ciclo de vida, está apareciendo una nueva industria en torno a la clausura de instalaciones nucleares. Además de las centrales nucleares, cuando llegue el final de su vida útil habrá que clausurar muchas otras instalaciones que forman parte del ciclo del combustible nuclear, como centros de investigación e instalaciones de reprocesamiento del combustible gastado o de tratamiento de los desechos. Es probable que, de aquí a 2050, se gasten cientos de miles de millones de dólares en actividades de clausura en todo el mundo y, por ello, las empresas y los inversores ya están tomando posiciones al respecto.

Actualmente hay unos 420 reactores nucleares de potencia en funcionamiento en todo el planeta y se prevé que, hasta 2050, entren en el proceso de clausura unos 200 reactores nucleares. Además de para clausurar los reactores (proyectos que pueden durar 20 años o más desde su comienzo hasta su fin), para diseñar nuevas instalaciones nucleares también es necesario contar con conocimientos especializados en clausura. En la actualidad hay más de 50 reactores en fase de construcción en todo el mundo y, antes de construirse, cada uno de ellos debía disponer de un plan de clausura. Por ello, la industria de clausura de estas instalaciones parece tener unas sólidas perspectivas a largo plazo.

Se prevé que las empresas de ingeniería, construcción, demolición y gestión de desechos en el ámbito nuclear serán los principales proveedores de servicios para la industria de clausura. Su función consistirá en descontaminar y dismantelar las instalaciones nucleares y rehabilitar los emplazamientos para que estos puedan utilizarse de forma segura en el futuro, teniendo en cuenta factores socioeconómicos y de sostenibilidad. También es preciso dismantelar las instalaciones nucleares y convertirlas en lugares seguros mediante enfoques que tengan en cuenta los efectos para el medio ambiente, en consonancia con principios de la economía circular, por ejemplo mediante el reciclaje de los metales, alambres y cables recuperados, y la separación del hormigón limpio del hormigón reforzado con acero. Al mismo tiempo, para esta compleja tarea se necesita una fuerza de trabajo nuclear muy cualificada, la cual debe incrementarse para evitar una escasez de habilidades nucleares en el futuro.

A fin de conservar los conocimientos y fomentar esta industria, la Red Internacional de Clausura del OIEA proporciona un foro para que las organizaciones y las personas que intervienen en la clausura y el dismantelamiento de instalaciones nucleares intercambien experiencias y lecciones aprendidas. El OIEA presta asistencia a los países en la planificación y la ejecución de procesos de clausura proporcionando

asesoramiento técnico, jurídico y sobre seguridad, y apoyando el intercambio de conocimientos mediante cursos y talleres de capacitación. El OIEA desempeña un papel importante en la tarea de facilitar una amplia colaboración internacional y realizar exámenes técnicos a fin de establecer buenas prácticas y garantizar que se aprende de la experiencia.

“La red reúne a organizaciones y personas que intervienen en la clausura y el dismantelamiento de instalaciones nucleares”, señala Tetiana Kilochytska, especialista en clausura del OIEA. “Ayuda a divulgar información relativa al proceso de clausura, como la puesta en común de prácticas óptimas e innovaciones, a fin de mejorar la cooperación y la coordinación de la industria dedicada a la clausura en todo el mundo”.

Una de las organizaciones que comparte sus conocimientos especializados en favor de otras es la encargada del emplazamiento de Sellafield, en el Reino Unido. En este emplazamiento ha habido diversas instalaciones nucleares, como reactores nucleares de potencia, instalaciones de reprocesamiento de combustible y plantas de tratamiento de desechos. Cuando se inauguró en la década de 1950, Calder Hall, en el emplazamiento de Sellafield, fue la primera central nuclear comercial del mundo. Debido al amplio abanico de instalaciones nucleares antiguas que se encuentran en un espacio comprimido, los profesionales encargados de la clausura que trabajan en el emplazamiento han tenido que idear soluciones innovadoras y singulares durante la clausura, entre las que figuran la digitalización y la robótica.

“Se trata de un desafío muy complejo de clausura de instalaciones nucleares”, afirma Mike Guy, de Sellafield Limited. “Ello se debe al amplio número y la diversidad de instalaciones nucleares, muy próximas entre sí en un emplazamiento saturado. Debemos hacer frente a una amplia variedad de dificultades con respecto a los desechos, incluidos los que se han almacenado en piscinas subacuáticas y la retirada de desechos de celdas muy grandes y complejas”.

Las actividades de clausura en el emplazamiento de Sellafield se iniciaron en la década de 1980 y se prevé que continúen a lo largo de este siglo e incluso después. Gracias a esta enorme experiencia, Sellafield se encuentra en una posición ideal para compartir sus inigualables conocimientos especializados y experiencias con la comunidad internacional de clausura. Ya ha puesto en marcha nuevos procesos para simplificar y acelerar el tratamiento de desechos radiactivos en antiguos emplazamientos y ha compartido sus conocimientos sobre el dismantelamiento de estructuras a fin de ayudar a los ingenieros a diseñar instalaciones que resulten más fáciles de dismantelar.

Además, la inversión en las cadenas de suministro que trabajan con Sellafield Limited pone de manifiesto los posibles beneficios económicos que pueden obtener las empresas que se incorporen a la industria nuclear. En 2021, la Autoridad de Clausura de Instalaciones Nucleares del Reino Unido, el organismo público que supervisa la clausura en el emplazamiento de Sellafield, gastó en torno al 55 % de su presupuesto anual —que asciende a 4000 millones de dólares de los Estados Unidos— en servicios prestados por empresas asociadas.

Agilización de la clausura

La experiencia adquirida en la ejecución de programas de clausura durante varios años se está utilizando cada vez más para acortar la duración de los proyectos de clausura. Reducir el número de años que se dedican a diversos proyectos puede traducirse en importantes disminuciones presupuestarias, puesto que los costos laborales representan una gran proporción del costo de un proyecto. Con los proyectos de clausura que se han puesto en marcha recientemente para reactores de potencia comerciales en los Estados Unidos de América se pretende reducir la duración de la fase principal del desmantelamiento —sin incluir las actividades relacionadas con la finalización de las licencias— a entre cinco y siete años, que es aproximadamente la mitad del promedio de duración de esta fase de actividad a escala mundial.

Se prevé que las actividades de clausura en el emplazamiento de Sellafield (Reino Unido) se prolonguen durante muchos decenios. (Foto: Sellafield Ltd.)

Al optimizar la interacción entre las principales actividades del proyecto y el desmantelamiento y la gestión de los desechos, se puede reducir el tiempo que se necesita para culminar los proyectos. La buena gestión del proyecto y las buenas relaciones entre el propietario de la instalación y la cadena de suministro son de vital importancia. Los programas de gran envergadura, como el de Sellafield, suelen tratar de desarrollar enfoques de alianzas a largo plazo con la cadena de suministro, basados en contratos con una duración de hasta un decenio.

La obtención temprana de la autorización para la clausura también ayuda a acortar la duración de los plazos necesarios para liberar la instalación del control reglamentario. Algunos programas recientes en Alemania tienen como objetivo obtener las autorizaciones para la clausura aproximadamente al mismo tiempo que se procede a la parada definitiva de la instalación. Para un enfoque de ese tipo es necesario iniciar actividades de planificación detalladas y evaluaciones de seguridad conexas antes de la parada definitiva de la instalación.

Los proyectos de clausura producen enormes cantidades de material que deben gestionarse con eficacia. Tener la posibilidad de reciclar o reutilizar una gran cantidad de este material y poder deshacerse rápidamente del que debe gestionarse como desecho son también cuestiones primordiales para reducir los costos globales; además, son factores que contribuyen de forma significativa a acelerar la clausura en el futuro.



Aplicación de salvaguardias nucleares durante la clausura

Jennifer Wagman

El OIEA ayuda a desalentar la proliferación de armas nucleares mediante una serie de medidas técnicas conocidas como salvaguardias, con las que se verifica que los países cumplen sus obligaciones jurídicas internacionales de no hacer un uso indebido del material y la tecnología nucleares. Estas obligaciones son extensivas a los proyectos de clausura. A marzo de 2023, más de 200 instalaciones nucleares en total habían cesado definitivamente su actividad, sea porque habían alcanzado el final de su ciclo de vida natural o por decisiones relacionadas con políticas nacionales. Los países siguen estando jurídicamente obligados a cumplir los acuerdos de salvaguardias durante todo el proceso de clausura y, en algunos casos, también después.

Como la clausura es un proceso largo y variable, el OIEA ha establecido directrices para garantizar que las salvaguardias se siguen aplicando hasta que la instalación se considera clausurada desde ese punto de vista.

Estas directrices del OIEA exigen el cumplimiento de dos objetivos principales en materia de salvaguardias: el primero es verificar que todo el material nuclear se ha retirado de la instalación y se ha trasladado a un lugar conocido; y el segundo, garantizar que todo el equipo esencial se ha retirado de la instalación o, si permanece en ella, se ha dejado inoperativo.

Durante la clausura se alienta a los países a colaborar con el OIEA, presentando periódicamente planes sobre las actividades relacionadas y actualizando la información sobre el diseño de modo que queden reflejados los cambios en la instalación. A medida que se retiran el material nuclear y el equipo esencial, el OIEA reevalúa constantemente las actividades y medidas de salvaguardias llevadas a cabo en la instalación y, si es necesario, las revisa en consulta con el país en cuestión. La participación temprana de los países en los detalles de este proceso se conoce como incorporación de las salvaguardias en el diseño.

“La incorporación de las salvaguardias en el diseño es un proceso de colaboración tanto eficaz en relación con el costo como oportuno, en el que nos aseguramos de que todas las partes interesadas comprendieron plenamente las obligaciones de salvaguardias con suficiente antelación”, declara Jeremy Whitlock, Asesor Técnico Superior del Departamento de Salvaguardias del OIEA. El Sr. Whitlock trabaja con la industria, los reguladores y otras partes interesadas para incorporar las salvaguardias en la fase de diseño de instalaciones nucleares nuevas o modificadas, incluidas las que están en proceso de clausura. “Para ayudar a los países en el proceso de clausura de una instalación nuclear, hemos elaborado directrices en las que se describen los requisitos y las actividades de salvaguardias. Estas directrices ayudan a los países y los operadores de las instalaciones a comprender las medidas necesarias y cómo colaborar con el OIEA para garantizar que la clausura avanza dentro de los plazos deseados”.

Como parte de la clausura de un reactor nuclear, han de respetarse las salvaguardias del OIEA mientras se lleve a cabo una “campaña” destinada a trasladar el combustible gastado a otra instalación para su almacenamiento o disposición final a largo plazo. Para una campaña de este tipo suelen instalarse equipos adicionales de vigilancia y/o control de salvaguardias, con exámenes periódicos de los datos registrados.

“Al verificar el traslado de material nuclear a un lugar de almacenamiento, el OIEA mantiene la continuidad de los conocimientos respecto del material en todo momento. Esto ayuda a ofrecer garantías creíbles de que el material nuclear no se desvía de los usos pacíficos”, señala Lai San Chew, Inspectora de Salvaguardias Nucleares del OIEA. Durante los traslados de combustible gastado como preparación para la clausura definitiva, la Sra. Chew se encarga de verificar los productos de combustible gastado, observar los traslados y examinar la información sobre el diseño actualizada.

Una vez retirado todo el material nuclear, el operador de la instalación comenzará por dismantelar los equipos esenciales y, en último lugar, retirará la pieza más importante del equipo esencial: el núcleo del reactor, cuya disposición final se realiza en una instalación de tratamiento de desechos. A continuación, el país envía al OIEA la información final actualizada sobre el diseño de la instalación para notificar de manera oficial que esta ha sido clausurada.

Una vez que el material nuclear se encuentra en condiciones de seguridad y sometido a las salvaguardias adecuadas en una instalación de almacenamiento o de disposición final a largo plazo, el OIEA verifica la ausencia de material nuclear en la instalación original que se está clausurando y

confirma, además, que todo el equipo esencial ha sido retirado o inutilizado. Tras determinar que una instalación ha sido clausurada desde el punto de vista de las salvaguardias, el OIEA interrumpe las actividades de inspección ordinaria y verificación del diseño en la instalación.

“Trabajamos con el país y el operador de la instalación para garantizar que se entienden plenamente las necesidades especiales de la clausura de una instalación sometida a salvaguardias. De ese modo, ayudamos a lograr una transición tecnológica y físicamente segura hasta el cese de las operaciones, en cumplimiento de todas las obligaciones internacionales del país”, afirma Kerrin Swan, Analista de Salvaguardias del OIEA.

Inspección de salvaguardias en URENCO, Almelo (Países Bajos). (Foto: D. Calma/OIEA)



Preparativos con 60 años de antelación

La primera central nuclear de los Emiratos Árabes Unidos y los planes para clausurarla en el futuro

Artem Vlasov

Desde que hace más de medio siglo se descubrieron reservas de gas y petróleo en los Emiratos Árabes Unidos, este país ha experimentado una notable transformación económica. En apenas unas pocas décadas, ha pasado de ser una pequeña economía dedicada principalmente a la pesca y el comercio de perlas a convertirse en un centro turístico, comercial, financiero y de negocios a escala mundial. Con vistas a mantener ese progreso económico y reducir al mismo tiempo sus emisiones de carbono, los Emiratos Árabes Unidos están diversificando su canasta energética, por ejemplo, con la introducción de energía nuclear.

La central nuclear de Barakah, la primera de los Emiratos Árabes Unidos y del mundo árabe, se volvió operativa en 2020. Actualmente hay tres reactores en funcionamiento y la construcción de otro está por finalizarse. Cuando la central esté plenamente operativa dentro de unos años, está previsto que genere hasta el 25 % de la electricidad del país —con capacidad para abastecer a más de medio millón de hogares emiratíes—. Sin embargo, como cualquier otra central nuclear, deberá desensamblarse cuando concluya su vida útil, en unos 60 a 80 años. Hoy en día, todo país que inicia un programa nuclear debe trazar planes preliminares de clausura cuando diseñe una instalación nuclear, para que el emplazamiento se pueda destinar luego a otros usos.

“La clausura es un proceso multidisciplinar. La planificación de la clausura, en el marco de lo cual se han de determinar las necesidades financieras, debe comenzar en las primeras fases de desarrollo de la instalación nuclear y continuar durante la etapa operacional. Ahora bien, la planificación en detalle de la clausura suele comenzar unos pocos años antes de que la instalación se ponga en régimen de parada definitiva.

Como parte de ese proceso se llevan a cabo actividades para garantizar el grado de preparación organizativa y técnica, a fin de permitir una transición fluida de la explotación a la clausura” —declara Tetiana Kilochytska, Especialista en Clausura del OIEA—. “Los Emiratos Árabes Unidos, que están poniendo en marcha con éxito su primera central nuclear, ya tienen un plan inicial de clausura para cuando la central llegue al final de su vida útil”.

El poder de una planificación cuidadosa

El operador de la central nuclear de Barakah, Nawah Energy Company, presentó un plan inicial de clausura como parte de la solicitud de licencia de explotación que envió inicialmente a la autoridad nuclear de los Emiratos Árabes Unidos, la Autoridad Federal de Reglamentación Nuclear (FANR). En el plan se prevé que la clausura corra a cargo de Nawah y comience cinco años después de que el último reactor entre en régimen de parada definitiva. Según la Corporación de Energía Nuclear de los Emiratos (ENEC), que se encarga del programa nucleoelectrico de los Emiratos Árabes Unidos, está previsto que el proceso de clausura dure unos 13 años para cada una de las 4 unidades.

Una dificultad habitual en la clausura es la incertidumbre con respecto a los costos totales en que se incurrirá con las actividades conexas, como la gestión a largo plazo de los desechos radiactivos resultantes de la clausura y del combustible nuclear gastado. Por ejemplo, el costo de establecer un repositorio geológico para la disposición final de desechos radiactivos de período largo y combustible gastado puede ascender a varios miles de millones de dólares.



Los Emiratos Árabes Unidos están preparados para este desafío y han adoptado medidas para crear un fondo fiduciario para la clausura, que se financia con aportaciones anuales y debe cubrir el costo de la clausura de la central nuclear y las actividades conexas. Para que este pueda responder a las expectativas futuras, se prevé una revisión periódica de los aportes anuales y una actualización del plan de clausura de la central nuclear al menos cada tres años a lo largo de su vida útil.

“Es fundamental que durante el proceso de clausura se pueda acceder de manera adecuada a los conocimientos especializados y la tecnología pertinentes: se trata de una cuestión clave para que la clausura se lleve a término con éxito”, afirma la Sra. Kilochytska. Los Emiratos Árabes Unidos están adoptando medidas para garantizar que haya personal cualificado y competente que asuma las labores de clausura, disposición final de desechos radiactivos y protección radiológica de las personas y el medio ambiente durante ese proceso. Con la continua evolución de las tecnologías, como la robótica y la inteligencia artificial, cabe esperar que los nuevos avances traigan consigo mayores oportunidades para una clausura más eficiente, con técnicas de desmantelamiento más rápidas, una descontaminación más eficaz y una mejor protección de los trabajadores.

La preparación de hoy para un mañana sostenible

El OIEA presta asistencia a los países en la planificación y la ejecución de procesos de clausura, proporcionando asesoramiento técnico, jurídico y sobre seguridad, y apoyando

el intercambio de conocimientos mediante cursos y talleres de capacitación. El OIEA desempeña un papel importante con miras a facilitar una amplia colaboración internacional y realizar exámenes técnicos a fin de establecer prácticas óptimas y garantizar que se aprende de los ejemplos pasados.

“La continua interacción de los Emiratos Árabes Unidos con el OIEA ayudó a formular la política del país en materia de energía nuclear”, señala la Sra. Kilochytska. Los Emiratos Árabes Unidos colaboran con expertos del OIEA para garantizar una seguridad nuclear tecnológica y física y una transparencia sólidas durante todo el proceso de explotación de la central nuclear de Barakah, también en relación con sus planes de clausura.

La central nuclear de Barakah desempeñará un papel clave en la estrategia de emisiones netas cero de los Emiratos Árabes Unidos para 2050, cuyo objetivo es aumentar radicalmente la producción de energía limpia del país. Con ella se evitará la emisión de 22 millones de toneladas de gases de efecto invernadero al año, cantidad equivalente a la que producirían casi 5 millones de coches y a una cuarta parte de la reducción de emisiones con la que se comprometieron los Emiratos Árabes Unidos en virtud del Acuerdo de París, el tratado internacional sobre cambio climático. La central nuclear de Barakah ya es el mayor generador individual de electricidad y la mayor fuente de electricidad limpia de la región.

La primera central nuclear de los Emiratos Árabes Unidos no está aún en pleno funcionamiento, pero el país ya está planificando minuciosamente la clausura en el futuro.

(Fotografía: ENEC)



Incentivar a la próxima generación a emprender carreras profesionales en el sector de la clausura

Annie Engstroem

Uno de los principales desafíos a los que se enfrenta actualmente la industria de la clausura nuclear es atraer a jóvenes profesionales a este campo. Es necesario que una nueva generación se incorpore a la fuerza de trabajo activo por dos factores. Por un lado, existe una necesidad inmediata de aumentar la cantidad de profesionales que trabaja para clausurar el creciente número de reactores en proceso de envejecimiento que están llegando al final de su vida útil. Por otro, la industria debe prepararse para el futuro, cuando se espera que el sector de la clausura tenga un auge y haya una demanda aún mayor de profesionales de la ciencia y la ingeniería.

Se calcula que entre el 12 % y el 15 % de los reactores nucleares de potencia que actualmente están en funcionamiento se retirarán del servicio antes de 2030 y, para su clausura, será necesaria una variedad de profesionales de diversas disciplinas para garantizar que esto se lleve a cabo de forma segura y eficaz en función del costo y teniendo en cuenta su uso futuro. Al mismo tiempo, se están construyendo en todo el mundo nuevas instalaciones nucleares que también tendrán que clausurarse en algún momento.

“Los jóvenes profesionales, como yo, deseamos poner nuestras aptitudes al servicio de la ejecución de los programas de clausura y el fomento de la confianza del público en el ámbito nuclear”, indica Simona Šandalová, química nuclear de 25 años y beneficiaria del Programa de Becas del OIEA Marie Skłodowska-Curie.

Los complejos desafíos que plantea la clausura de emplazamientos nucleares se traducen en diversas oportunidades profesionales para los jóvenes en este campo. Entre ellas se encuentran las tareas relacionadas con tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, la ciencia de datos y la robótica, así como las oportunidades para quienes desean especializarse en carreras profesionales en los ámbitos de la física, la química, la ingeniería, la gestión de proyectos, la gestión de desechos radiactivos o la rehabilitación ambiental. En resumen, el sector de la clausura ofrecerá seguridad laboral y oportunidades profesionales a quienes se incorporen a él ahora y en un futuro previsible.

“Hace cuarenta años, la clausura no era una preocupación prioritaria para los desarrolladores de centrales nucleares o instalaciones del ciclo del combustible nuclear, y apenas se prestaba atención a garantizar la disponibilidad de personal debidamente cualificado cuando estas instalaciones llegaban al final de su vida útil”, dice Patrick O’Sullivan, Especialista de Clausura del OIEA. “En la actualidad, atraer a jóvenes profesionales del sector nuclear a las actividades de clausura y

a las conexas de gestión de desechos radiactivos se ha vuelto una prioridad fundamental en la mayoría de los programas”.

Para descarbonizar la economía, los países también están invirtiendo en reactores nucleares avanzados como, por ejemplo, los reactores modulares pequeños, que se prevén que sean más fáciles y económicos de clausurar desde un punto de vista técnico, dado que pueden transportarse de vuelta a la fábrica para su desmantelamiento y reciclaje.

“Si los países van a desplegar esfuerzos e incluir la energía nuclear en su canasta de energía, es realmente necesario que se preparen bien para desarrollar competencias esenciales que faciliten considerar desde el principio el desmantelamiento de centrales nucleares”, señala Marorisang Makututsa, Vicepresidenta de la Generación Joven del Ámbito Nuclear de África (AYGN). La AYGN es una organización sin fines de lucro cuyo objetivo es motivar y empoderar a jóvenes profesionales del sector nuclear de África mediante la organización de eventos de capacitación y de creación de redes nacionales. Actualmente Sudáfrica explota dos reactores nucleares de potencia y, a su vez, Egipto está construyendo sus primeros reactores; asimismo, Ghana, junto con unos diez países más del continente, está considerando introducir la energía nucleoelectrónica en su canasta de energía.

Oportunidades para jóvenes

La clausura es el último paso del ciclo de vida nuclear; sin embargo, el proceso multidisciplinario de la clausura de una central nuclear requiere conocer todo el ciclo de vida nuclear. Los ingenieros, los científicos y otros profesionales especializados en la clausura poseen, por tanto, competencias transferibles a otras partes del ciclo de vida nuclear, por ejemplo, el diseño, la construcción y la explotación de la instalación nuclear.

“Los jóvenes con conocimientos especializados y experiencia en materia de clausura tienen muchas oportunidades en otros sectores”, explica Lisa Lande, Especialista en Desarrollo de Recursos Humanos en el Ámbito Nuclear del OIEA. “La capacidad de gestionar proyectos, obtener los conocimientos técnicos especializados necesarios para la gestión de desechos radiactivos y comprender el impacto de los contaminantes en el medio ambiente tiene un valor incalculable en el sector medioambiental y en diversos ámbitos de la industria tecnológica”.

En Francia, el Instituto Nacional de Ciencias y Técnicas Nucleares (INSTN) alienta activamente a estudiantes a estudiar soluciones nuevas e innovadoras para la clausura.

Florent Lemont es Director de Investigación en la CEA y Jefe del INSTN – Marcoule. En 2022, el Sr. Lemont fue también el organizador de un reto en Francia denominado “Hackadem”, en el que 600 estudiantes de nivel secundario y universitario compitieron en equipos presentando soluciones creativas para la clausura de instalaciones nucleares en el futuro.

“Muchos participantes no sabían que la clausura es una esfera innovadora transversal que incluye tecnología avanzada, digitalización, química y mucho más”, señala Florent Lemont. “Con el concurso, adquirieron conocimientos sobre las futuras oportunidades en el campo de la clausura y lo importante que es obtener experiencia en este ámbito”.

Iniciativas del OIEA para despertar el interés de estudiantes y jóvenes profesionales

El OIEA organiza una serie de iniciativas para difundir las oportunidades profesionales en el campo de la clausura y apoyar la creación de capacidad en la esfera nuclear en sus Estados Miembros.

El OIEA coopera activamente con universidades de todo el mundo (de Eslovaquia, Francia, la República Checa, la República de Corea, y el Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte, entre otros países) para llevar a cabo actividades de investigación e intercambiar información técnica, experiencias y prácticas óptimas en materia de

clausura y rehabilitación ambiental. En la Universidad Internacional de Florida (FIU), en Estados Unidos de América, esta cooperación ha permitido al OIEA ofrecer programas de capacitación y pasantías a estudiantes con formación en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas, e integrar el material del OIEA sobre clausura en los planes de estudio de dicha universidad.

En septiembre de 2022, el OIEA organizó un concurso sobre innovaciones en el sector de la clausura de instalaciones nucleares para ese año, e invitó a estudiantes y jóvenes profesionales a presentar ensayos originales sobre el desmantelamiento de instalaciones nucleares. Algunos de los temas abordados fueron cómo hacer más eficaz la clausura, cómo planificar y llevarla a cabo utilizando un modelo de economía circular y cómo incorporar una estrategia de clausura al diseño de una central nuclear.

“La clausura es un desafío del futuro que necesita una fuerza de trabajo con las cualificaciones pertinentes —afirma el Sr. O’Sullivan—. Es por eso que el OIEA organiza y pone en marcha una serie de iniciativas, de manera directa y mediante sus centros colaboradores, para promover la participación de los jóvenes en la clausura, entre las que se incluyen asociaciones con universidades, programas de becas y capacitación, así como el fomento de la participación de los jóvenes en sus talleres y conferencias con especialistas”.

Trabajadores en actividades de clausura en una planta de reprocesamiento de combustible nuclear en La Hague (Francia). (Foto: M. Klingenboeck/OIEA)



Opiniones expertas sobre la clausura de la planta de reprocesamiento de combustible gastado de Francia

Michael Amdi Madsen

En la actualidad, en torno al 70 % de la electricidad de Francia procede de 56 centrales nucleares. Todo el combustible gastado de estos reactores y también parte del proveniente de otros países se reprocesa y se recicla parcialmente en La Hague, un emplazamiento ubicado en la península de Cotentin, al norte del país.

Tras 35 años de funcionamiento, la primera planta de reprocesamiento de La Hague, la UP2-400, entró en régimen de parada en 2003 y se está procediendo a su clausura: un proyecto que prevé durar decenios. Para conocer mejor la evolución de este proyecto y los desafíos que entraña la clausura de una instalación como la UP2-400, hablamos con Eric Delaunay, Vicepresidente Superior de Operaciones de Fin del Ciclo de Vida de Orano, la empresa francesa de titularidad principalmente pública encargada de garantizar que el emplazamiento sea seguro y adecuado para usos futuros.



P: ¿Cuáles son algunos de los desafíos que supone la ejecución del proyecto de clausura de la UP2-400 y en qué medida se pueden comparar con la clausura de otras instalaciones nucleares de gran envergadura, como las centrales nucleares?

R: El principal desafío al que se enfrenta el proyecto de clausura de la UP2-400 es la presencia de depósitos y de contaminación radiactivos en una enorme proporción de las instalaciones que se encuentran en régimen de parada. En una central nuclear, mediante la retirada del combustible gastado y una descontaminación de todo el sistema se elimina más del 99 % de la radiactividad inicial presente en la central nuclear. Únicamente la vasija de presión del reactor y su equipo interno siguen teniendo una radiactividad significativa. En una planta de reprocesamiento como la UP2-400, la situación es un poco diferente. Cada parte del equipo y cada sala están contaminadas con un nivel de radiactividad y estos componentes deben recuperarse y acondicionarse antes de que pueda procederse al desmantelamiento. Esto significa que las funciones de seguridad de la planta de reprocesamiento se deben preservar durante la mayor parte del proyecto de clausura; en cambio, en las centrales nucleares, las clases y los sistemas de seguridad se pueden reducir en cuanto se haya culminado la retirada del combustible y se haya vaciado la piscina de combustible gastado.

P: ¿Cuáles son los principales riesgos operacionales y estratégicos de la clausura a los que se enfrenta el proyecto y qué se está haciendo para gestionarlos?

R: Los principales riesgos estratégicos son los sobrecostos y los retrasos en la finalización del proyecto, puesto que los retrasos generan costos adicionales. Las demoras pueden deberse a diversos riesgos operacionales que abarcan todos los aspectos del proyecto. Los dos más significativos son, en primer lugar, la falta de conocimientos en relación con el estado radiológico inicial de las células y del equipo de alta actividad; y, en segundo lugar, los desafíos relacionados con el desarrollo profesional y la retención del personal. Para mitigar el primer riesgo, hemos aplicado un programa de caracterización muy exhaustivo que reduce considerablemente la incertidumbre con respecto al estado de la planta de reprocesamiento y sus células durante varios años. Mientras tanto, hemos tratado de gestionar el desafío de los recursos humanos con diversas medidas, como la participación en programas regionales y nacionales de capacitación, una política proactiva de contratación, la capacitación continua de nuestro personal para facilitar su versatilidad y movilidad dentro de la organización, y la innovación en las prácticas de clausura a fin de mejorar el entorno laboral.

P: El proyecto de clausura de la UP2-400 se inició hace unos 20 años y parece previsible que continúe durante varios años más. ¿En qué medida ha afectado la innovación tecnológica al proyecto a lo largo del tiempo y qué avances tecnológicos futuros cree que tendrán mayor repercusión?

R: Durante los últimos 20 años, los cambios tecnológicos más notables han estado relacionados con la digitalización en todos los ámbitos del proyecto. Las tecnologías digitales han evolucionado en tres vías: en relación con la potencia y la eficiencia, el costo y la diversidad. Hace 20 años, los modelos virtuales eran complejos y caros de elaborar, la tecnología de la realidad virtual era limitada y los teléfonos inteligentes y las tabletas no existían. Durante los últimos años, estas tecnologías han evolucionado de tal manera que ahora aportan beneficios reales y cuantificables a nuestras actividades y han transformado y mejorado por completo los procesos de nuestra organización. En el futuro, la robótica aumentará la productividad, incrementará la seguridad de los trabajadores y mejorará las condiciones laborales y la motivación de nuestro personal.

P: La sostenibilidad y los principios de economía circular tienen cada vez más importancia en la industria nuclear. ¿Cómo afectan estos principios a las actividades de clausura en La Hague?

R: Cuando pensamos en los principios de economía circular, para nosotros supone un desafío el hecho de que estamos clausurando instalaciones que se construyeron hace entre cuarenta y cincuenta años y en cuyo diseño no se contempló la economía circular. No obstante, desde que, en 2008, creamos una división completa en nuestra empresa dedicada a la clausura de nuestras propias instalaciones nucleares, Orano lleva 15 años implicada en el cierre del ciclo industrial nuclear y en la liberación de edificios en desuso para su futura reutilización. También nos centramos en reducir al mínimo la generación de desechos en todas las fases del proceso de clausura y cada vez reutilizamos más equipo y reciclamos más materiales. Además, los recientes cambios reglamentarios en Francia también han abierto la puerta al reciclaje de metales procedentes de instalaciones nucleares clausuradas para su reutilización en la industria nuclear.

P: ¿Cuáles son los principales efectos socioeconómicos de los trabajos de clausura en La Hague y cómo contempla su responsabilidad con respecto a la comunidad local?

R: Las actividades de clausura representan aproximadamente el 20 % de la actividad general y del efecto socioeconómico del emplazamiento de La Hague, que también alberga dos plantas de reciclaje de combustible gastado que se encuentran en funcionamiento. Los emplazamientos de Orano en Normandía son importantes empleadores y fuentes de ingresos para la comunidad local. El gasto anual de Orano representa más de 850 millones de euros, de los cuales más del 70 % se queda en la región de Normandía. Orano La Hague también ha constituido una alianza con la Cámara de Comercio e Industria de Cherbourg Cotentin con miras a capacitar y dar empleo a trabajadores locales. En 2023, los emplazamientos de Orano en la zona de Cotentin contratarán a 500 personas, de las cuales el 20 % trabajará en actividades de clausura. Además, se contratará a 200 aprendices de programas teórico-prácticos durante períodos de uno a tres años.

P: ¿De qué manera apoya el OIEA la actividad de clausura en La Hague y de qué modo las actividades colaborativas internacionales pueden mejorar el apoyo a los proyectos de clausura?

R: Nuestro proyecto de clausura es muy intensivo y exige que nos centremos en su ejecución. Sin embargo, se trata también de un esfuerzo de larga data que se beneficia de las innovaciones y las experiencias de otros. El apoyo del OIEA en materia de clausura y rehabilitación ambiental proporciona un foro inigualable en el que intercambiar información y aprender de los demás sobre cuestiones que comprenden las tendencias e innovaciones que podrían apoyar nuestras actividades, como las tecnologías digitales, la robótica, la capacitación y el desarrollo de competencias. Por ejemplo, los avances en curso de la Reunión Técnica sobre Tecnologías Nuevas y Emergentes para Contribuir al Avance de los Proyectos de Clausura son de particular interés para nosotros y esperamos que esas iniciativas impidan la duplicación de esfuerzos en materia de desarrollo.

Un nuevo modelo operativo para la clausura de centrales nucleares

Bruce A. Watson



Bruce A. Watson es el Asistente Especial de la División de los Programas de Clausura, Recuperación de Uranio y Desechos de la Oficina de Salvaguardias y Seguridad de Materiales Nucleares de la Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos (NRC). El Sr. Watson, ex operador nuclear, adquirió una amplia experiencia en la clausura de reactores y materiales en emplazamientos como responsable técnico de la rescisión de licencias de

reactores nucleares de potencia de los Estados Unidos (EE. UU.). También tiene una extensa experiencia internacional en el ámbito de la clausura con el OIEA: ha brindado asistencia para elaborar guías de seguridad y programas de capacitación para la clausura y ha participado como experto en varias misiones de examen por homólogos y de asesoramiento del Organismo.

Los EE. UU., pioneros de la tecnología nuclear desde hace tiempo, actualmente tienen en marcha uno de los programas de energía nucleoelectrónica más antiguos y de mayor envergadura del mundo. Con el envejecimiento de las flotas de reactores y su consiguiente retirada del servicio, se crean cada vez más proyectos de clausura. En la actualidad, la NRC supervisa 17 centrales nucleares en fase de clausura activa y ocho centrales nucleares en fase de almacenamiento seguro, así como la clausura de dos reactores de investigación y varios otros emplazamientos nucleares. Además, también se están clausurando varios emplazamientos relacionados con la defensa que están comprendidos en la esfera de competencia

regulatoria del Departamento de Energía. Esta demanda está impulsando la innovación, por lo que las empresas están buscando formas creativas de hacer frente a este desafío.

En 2010, surgió en los EE. UU. un modelo operativo completamente nuevo para la clausura. Hasta ese entonces, todos los proyectos de clausura de reactores con licencia de la NRC utilizaban un modelo operativo similar. El operador de la central nuclear seguía siendo plenamente responsable durante el proceso de clausura. Los operadores optaban por ejecutar ellos mismos todos los trabajos de clausura o por contratar a una empresa para que se encargara de ellos. A principios de la década de 1990, se pusieron en régimen de parada diez reactores con licencia de la NRC y su clausura se completó para 2009, para lo que se utilizó este modelo tradicional en todos los casos.

Sin embargo, a finales de 2010, las largas deliberaciones entre las empresas de clausura y los operadores habían dado buenos resultados y abrieron las puertas a una nueva forma de llevar a cabo los proyectos de clausura. En primera instancia, un operador de los EE. UU. aceptaba transferir una licencia temporal a una empresa de clausura. Una vez concluida la clausura, la licencia del terreno y la instalación de almacenamiento en seco de combustible gastado se transfería de nuevo al operador original. La NRC aprobó este proceso y poco después aprobó, también, uno similar entre otro operador y una empresa de clausura.

Oportunidades y dificultades

Estos acuerdos solo se concretaron tras años de negociaciones. Los futuros licenciatarios tuvieron que ponderar a fondo tanto las oportunidades como las dificultades. Por un lado, la transferencia de una licencia de este tipo proporcionaría a la empresa de clausura pleno acceso al fondo fiduciario



para la clausura de la central nuclear. Por otro lado, también pasarían a tener plena responsabilidad contractual y extracontractual respecto de todos los riesgos financieros y reglamentarios derivados de la operación. Finalmente, los acuerdos prosperaron a pesar de estos riesgos. Tres años después, en 2013, las primeras empresas acordaron una transferencia de licencia permanente, en lugar de temporal, como parte de la venta de las instalaciones.

En muchos sentidos, 2013 fue un año clave. Fue la primera vez que una empresa de clausura habló con el operador de una central nuclear que estaba a punto de entrar en régimen de parada y le ofreció comprarla con el objetivo de clausurarla. Entonces se negoció un acuerdo de venta para una central nuclear que quedó en régimen de parada ese mismo año. El operador y la empresa de clausura solicitaron la transferencia definitiva de la licencia a la empresa de clausura.

A menudo, las empresas de clausura que adquirirían este tipo de licencias podían integrar estas actividades en sus operaciones ya establecidas, puesto que probablemente ya operaban emplazamientos de disposición final de desechos nucleares o estaban certificadas para prestar servicios de almacenamiento del combustible gastado.

Agilización considerable de los plazos para la planificación

Un resultado notable de la transferencia de licencia que se dio en 2013 fue la agilización considerable de los plazos para la planificación de las actividades de clausura. La rescisión de la licencia de la central estaba prevista inicialmente para 2073. Esto significaba que, en un principio, el operador se acogería al reglamento de la NRC que exige que la rescisión de la licencia se produzca en 60 años. Para rescindir la licencia, la central debía estar clausurada por completo, incluida la rehabilitación ambiental del terreno, lo que permitiría reutilizarlo para otros fines. Un nuevo licenciataria tiene previsto finalizar el mismo proceso para 2030, y la instalación de almacenamiento en seco de combustible gastado seguirá siendo una instalación con licencia y sujeta a inspecciones.

Otros operadores de centrales nucleares más antiguas que se encuentran en la fase de almacenamiento seguro y que se acercan a la fecha límite de clausura de 2030 también podrían

considerar una transferencia de licencia de este tipo a fin de adoptar un proceso más rápido. Algo importante para considerar es que, en los EE. UU., una central nuclear debe clausurarse y la licencia debe rescindir en un plazo de 60 años desde el cese de sus operaciones.

Las transferencias de licencias se han convertido en algo bastante común en el país y se dan en un número importante de centrales nucleares en proceso de clausura. Sin embargo, el modelo operativo tradicional de los explotadores que continúan a cargo de la clausura de las centrales persiste y sigue siendo la base de muchos proyectos de clausura en curso.

Por otra parte, es bastante improbable que otros países se vean llamados a seguir el modelo para la clausura que se utiliza en los EE. UU. La razón principal es que, a diferencia de la mayoría de los demás países, las centrales nucleares estadounidenses son comercialmente independientes. En consecuencia, el modelo operativo que se utiliza en EE. UU. es diferente del que tiene la mayoría de los demás países.

Agilizar proyectos similares en todo el mundo

No obstante, los procesos de clausura ágiles que se han adoptado en los EE. UU. podrían contribuir a agilizar proyectos similares en todo el mundo. Compartimos nuestras enseñanzas extraídas con otros países, lo que es posible gracias a organizaciones internacionales y mediante las normas de seguridad, los talleres, los foros, las misiones y las publicaciones del OIEA. El Organismo realiza una labor fundamental para promover la coherencia en la forma de llevar a cabo la clausura, garantizando que se realice de forma segura y dentro de marcos reguladores sólidos.

El OIEA desempeña un importante papel en la aportación de información sobre enfoques coherentes para la clausura, como los límites de dosis, a fin de garantizar que haya amplio acuerdo sobre el momento en que se ha completado satisfactoriamente la limpieza de un emplazamiento, así como de mejorar la seguridad de las comunidades locales. Los documentos del OIEA son de gran utilidad en este ámbito. En la comunidad internacional del sector de la clausura existe un verdadero interés en saber más sobre la manera de llevar a cabo una clausura de forma segura y eficaz.



Prometedores resultados de la agricultura climáticamente inteligente para mejorar la productividad del algodón en Azerbaiyán



Gracias a las técnicas isotópicas los investigadores y agricultores azerbaiyanos pueden obtener información clave sobre cómo optimizar el uso de los fertilizantes y mejorar la eficiencia de la producción de algodón sin dañar la salud del suelo.

(Fotografía: M. Zaman/OIEA)

En Azerbaiyán, en el marco de un proyecto que cuenta con el apoyo del OIEA en colaboración con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), investigadores y agricultores utilizan prácticas de agricultura climáticamente inteligente basadas en técnicas nucleares y otras técnicas conexas que les han permitido duplicar con creces el rendimiento de su producción de algodón. Gracias al uso de una nueva variedad llamada “algodón súper”, en combinación con prácticas de agricultura climáticamente inteligente cuidadosamente aplicadas, que permiten ver cómo se puede aumentar la productividad agrícola de manera sostenible, el proyecto piloto ha visto aumentar el rendimiento pasando del promedio del país de tres toneladas por hectárea a ocho toneladas por hectárea.

El proyecto piloto es parte de un proyecto de cooperación técnica del OIEA puesto en práctica en 2021 y se centró en el desarrollo de pautas de agricultura climáticamente inteligente para la producción de algodón, la capacitación de los investigadores y

agricultores progresistas de Azerbaiyán en materia de prácticas de agricultura climáticamente inteligente, y el diseño de ensayos experimentales en las explotaciones agrícolas. Mediante otro proyecto, lanzado en 2022 y centrado en el fortalecimiento de las prácticas óptimas en materia de prácticas agrícolas relativas a la gestión del suelo, los nutrientes y el agua para la producción de algodón, se procura ayudar a mejorar la productividad del algodón, dada la particular vulnerabilidad de los suelos de Azerbaiyán al cambio climático y la degradación del suelo. La temperatura anual promedio del país ha subido 0,4 °C desde 1991; a esto se agrega la disminución de las precipitaciones y fenómenos meteorológicos como inundaciones, sequías y olas de calor cada vez más frecuentes.

“A grandes rasgos, el 60 % de la mejora en la productividad de los cultivos se debe al aprovechamiento de la aplicación estratégica de nutrientes en el suelo y de la gestión del agua, —dice Mohammad Zaman, científico especializado en suelos del Centro Conjunto FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación

y la Agricultura y Oficial Técnico del proyecto—. Se trata de aplicar la cantidad indicada, de la manera correcta, en la etapa del crecimiento adecuada”.

Las prácticas de la agricultura climáticamente inteligente implican el uso de técnicas isotópicas para obtener información esencial acerca de cómo optimizar el uso de los fertilizantes y aumentar la eficiencia de la producción agrícola sin degradar la salud del suelo.

“Cuando comenzamos, los suelos de Azerbaiyán estaban sumamente degradados y la fertilidad era muy baja, por lo que el suelo no tenía la capacidad de proporcionar todos los nutrientes esenciales que requiere el cultivo de algodón”, explica el Sr. Zaman. Para hacer frente a esta situación, los expertos del OIEA desarrollaron un paquete completo de técnicas agrícolas nucleares y conexas, que van desde la preparación del suelo y la selección de las mejores variedades de algodón hasta la aplicación de nutrientes y sistemas de riego a los campos de algodón y garantizar el control de malezas, plagas y enfermedades.

“El desarrollo de prácticas mejoradas de gestión del suelo, los nutrientes y el agua, sumado al uso de la variedad de ‘algodón súper’, nos ha llevado a aumentar la productividad y la calidad de nuestro algodón, así como las ganancias”, explica Sakhavat Mammadov, agricultor azerbaiyano que participó en el proyecto piloto y que utiliza las prácticas de la agricultura climáticamente inteligente en su explotación agrícola desde hace dos años.

Las técnicas nucleares y conexas no solamente ayudan a mejorar la productividad agrícola sino que también contribuyen a aumentar la resiliencia de los sistemas agrícolas frente al cambio climático. En Azerbaiyán los investigadores utilizaron una técnica que emplea nitrógeno 15 (N-15), un isótopo estable. El nitrógeno contribuye de manera importante al crecimiento de las plantas y a la fotosíntesis, proceso mediante el cual las plantas transforman el dióxido de carbono y la energía de la luz solar en alimento propio. El Sr. Zaman explicó que la falta de nutrientes como el nitrógeno en el suelo lleva a rendimientos bajos y menos nutritivos. La aplicación excesiva o incorrecta de abonos nitrogenados, por otra parte, contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero y a la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas.

“Se prevé que en Azerbaiyán el algodón será uno de los cultivos que sufrirán el mayor declive en su producción

debido al cambio climático y a la rápida degradación del suelo, —dice el Sr. Zaman—. El aprovechamiento de las técnicas isotópicas, tales como el uso del N 15, puede ayudar en la adaptación a esta situación, lo que da mayor competitividad al sector del algodón a la vez que garantiza el empleo y mejora el bienestar de la población rural”.

En el pasado, Azerbaiyán fue uno de los principales productores y un importante exportador de algodón, con una cosecha superior a las 830 000 toneladas, que en la década de 1980 aportaban hasta una cuarta parte de los ingresos del país. No obstante, la transición hacia el libre mercado y el rápido crecimiento de otras industrias en la década de 1990 contribuyeron a que el algodón perdiese su papel clave en la economía de Azerbaiyán, lo que dio lugar a una caída de la producción en 2009 a un mínimo histórico de 31 000 toneladas.

Los resultados del proyecto muestran el importante potencial de las prácticas climáticamente inteligentes para aumentar la productividad agrícola. “Si tenemos en cuenta el área total de 105 000 hectáreas de tierras destinadas a los cultivos de algodón en Azerbaiyán, con dedicar un 10 % al uso de prácticas de agricultura climáticamente inteligente del OIEA la producción sería de 84 000 toneladas, frente a 31 500 toneladas, lo que representa un aumento del 166 % con respecto a las prácticas convencionales utilizadas para el cultivo de algodón”, dice el Sr. Zaman. “El éxito extraordinario de

la aplicación de las prácticas agrícolas climáticamente inteligentes en este proyecto es un indicador interesante y una enorme promesa sobre cómo estas prácticas pueden contribuir a un importante aumento de la producción de algodón en Azerbaiyán y, por consiguiente, incidir considerablemente en la economía del país”.

El OIEA, a través de su programa de cooperación técnica y del Centro Conjunto FAO/OIEA, presta asistencia a países en la aplicación de metodologías agrícolas climáticamente inteligentes para aumentar la productividad, adaptando los sistemas agrícolas al cambio climático y reduciendo su impacto sobre el medio ambiente. El Centro Conjunto FAO/OIEA también presta apoyo a la investigación en este ámbito. En un proyecto coordinado de investigación sobre el uso de soluciones nucleares climáticamente inteligentes para contribuir a la disminución de los efectos de la agricultura en el clima, científicos del Brasil, Chile, Costa Rica, la República Islámica del Irán y el Pakistán informaron una reducción del 50 % en los gases de efecto invernadero. Otras prácticas de la agricultura climáticamente inteligente están ayudando a desarrollar soluciones dietéticas balanceadas para el ganado en medio de las sequías recurrentes en Angola, con el fin de mejorar el uso del agua y la gestión de los nutrientes del suelo en Kenia, así como para hacer frente a la erosión del suelo en Túnez.

— Artem Vlasov



Los científicos utilizan el isótopo estable nitrógeno-15 para recopilar datos cuantitativos acerca de la cantidad de abonos nitrogenados que necesita el algodón y cuán eficientemente los asimila la planta. (Fotografía: M. Zaman/OIEA)

Aplicación de técnicas nucleares en respuesta a desastres naturales en América Latina y el Caribe



Las técnicas de ensayo no destructivo (END) ofrecen datos confiables acerca de la resistencia y la integridad de los materiales sin interferir con estructuras que podrían estar debilitadas o resultar peligrosas.

(Fotografía: Acuerdo Regional de Cooperación para la Promoción de la Ciencia y la Tecnología Nucleares en América Latina y el Caribe (ARCAL))

América Latina y el Caribe es la segunda región del mundo más propensa a sufrir desastres. Su estructura tectónica y sus características meteorológicas únicas la hacen particularmente vulnerable a fenómenos naturales, como los terremotos, inundaciones y huracanes. Debido a que el impacto de estas vulnerabilidades es aún mayor a causa del cambio climático, la región necesitaba desarrollar urgentemente la capacidad para evaluar la seguridad y la integridad de las edificaciones después de catástrofes naturales, especialmente en las zonas urbanas. Gracias a la ayuda del OIEA, la región ha logrado ser autosuficiente en ese ámbito.

Con asistencia del OIEA se han creado cuatro centros de respuesta en la Argentina, Chile, México y el Perú con capacidad para aplicar las técnicas de ensayos no destructivos (END) para evaluar la integridad de las edificaciones civiles como carreteras y puentes, dentro del territorio nacional y en países vecinos. Estos centros ayudarán a coordinar la respuesta regional en casos de emergencia.

Las técnicas de END proporcionan datos fiables sobre la resistencia y la integridad de los materiales sin interferir en estructuras que podrían estar debilitadas o resultar peligrosas, utilizando para ello diferentes tipos de radiación que permiten detectar defectos en el hormigón, las tuberías y las soldaduras. Las técnicas son seguras y rápidas, por lo que ayudan a proteger a la población civil.

Los cuatro centros de respuesta se han creado a través de un proyecto de cooperación técnica (CT) del OIEA puesto en marcha en 2018 para mejorar la evaluación de estructuras urbanas y la calidad de los bienes y servicios industriales en América Latina y el Caribe sirviéndose de técnicas nucleares.

“Los recientes terremotos en la región dejan clara la importancia de las redes que mejoran la coordinación de la respuesta a emergencias en esta región propensa a sufrir catástrofes. Gracias a la creación de los centros de respuesta, ahora la región es autosuficiente para mitigar los efectos de los desastres”,

señala Gerardo Maghella, Tecnólogo Industrial Asociado en el OIEA.

Como parte de la labor de establecimiento de los centros, el OIEA organizó actividades de capacitación y certificación de expertos en técnicas de END en Buenos Aires, que tuvieron lugar entre el 7 y el 18 de noviembre de 2018, en el marco del proyecto regional de CT en curso. Nueve participantes de la Argentina, el Brasil, Costa Rica y México obtuvieron la certificación o la recertificación en métodos avanzados de radiografía digital con rayos X y rayos gamma, que los cualifica para inspeccionar estructuras de ingeniería civil con las técnicas de END más recientes.

Otros 24 participantes de diez países (Argentina, Chile, Costa Rica, Cuba, Ecuador, México, Perú, Uruguay, República Bolivariana de Venezuela y República Dominicana) se instruyeron en métodos civiles de END, entre ellos la inspección visual y los ensayos por ultrasonido, que utilizan ondas sonoras

para detectar defectos en los materiales y comprobar su grosor.

“La certificación es un impulso muy importante para la promoción de las metodologías de END en el ámbito de la ingeniería civil en nuestros respectivos países”, afirma uno de los expertos recién certificados, Eduardo Robles, Jefe de Proyecto en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares y representante de la respuesta de análisis no destructivo en México.

Las entidades encargadas de impartir la capacitación y la certificación fueron la organización sin fines de lucro Asociación Italiana de Ensayos No Destructivos, Monitorización y Diagnóstico (AIPnD), en el marco de disposiciones prácticas firmadas con el OIEA y de conformidad con las normas internacionales ISO 9712 sobre ensayos no destructivos, e ISO 17024 sobre los

requisitos generales para organismos de certificación, que posibilitan la capacitación de personas por expertos.

Hernán Xargay, Jefe de División en la Comisión Nacional de Energía Atómica de la Argentina y coordinador del nuevo centro de respuesta de ese país, explica: “Las actividades de capacitación y certificación a nivel de las normas ISO, organizadas por el OIEA, generan confianza en que se cumplen los requisitos internacionales y se apoya la armonización de las metodologías en toda la región”.

Mario Barrera Méndez, Coordinador del Control de la Calidad en la Comisión Chilena de Energía Nuclear que dirige el nuevo centro de respuesta en Chile, se mostró de acuerdo: “La red establecida por el OIEA es la piedra angular de la nueva capacidad de respuesta a emergencias de la región. Nosotros, como

uno de los cuatro centros de respuesta, tenemos la intención de compartir la gran cantidad de conocimientos que hemos adquirido sobre las técnicas de END en todos los lugares de América Latina y el Caribe donde sea necesario”.

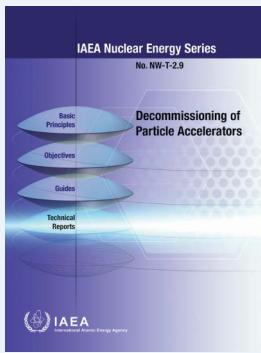
Los ensayos no destructivos son un método de control de la calidad que utiliza técnicas nucleares para examinar los materiales sin dañarlos. El OIEA apoya el uso de la tecnología de END para mantener el estricto control de calidad necesario para la explotación segura de las instalaciones nucleares y otras instalaciones industriales. Este apoyo se expresa proporcionando equipos y asistencia a los Estados Miembros, como la capacitación del personal local en la aplicación de la tecnología. Aquí encontrará más información sobre la labor del OIEA en materia de END.

— *Pauline Sophie Hennings*

Los END son un método de control de la calidad que utiliza técnicas nucleares para examinar los materiales sin dañarlos.

(Fotografía: ARCAL)

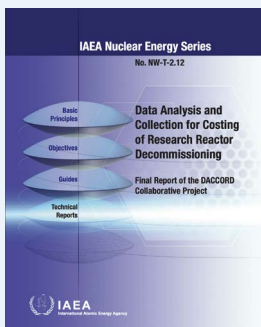




DECOMMISSIONING OF PARTICLE ACCELERATORS

Esta publicación presenta información sobre experiencias y enseñanzas extraídas de la puesta en marcha de proyectos de clausura de aceleradores de partículas. Sobre la base de esta información, y haciendo énfasis en cuestiones y preocupaciones comunes, se ofrece información práctica para aquellas personas que desempeñan alguna función en este proceso. La publicación está dirigida a operadores de instalaciones de acelerador, en concreto las que se acercan a la fase de clausura, o mantienen una instalación en estado de desmantelamiento diferido, así como a reguladores, gestores de desechos, encargados de adoptar decisiones a nivel gubernamental, autoridades locales, contratistas que participan en la clausura y diseñadores de aceleradores. Se prevé que las enseñanzas extraídas que figuran en esta publicación contribuyan a la planificación de la clausura durante la fase de diseño de nuevas instalaciones y, por tanto, se reduzca al mínimo la generación de desechos radiactivos sin poner en riesgo las características estructurales ni la eficacia de la construcción.

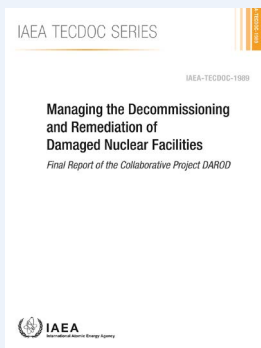
ISBN: 978-92-0-102419-0



DATA ANALYSIS AND COLLECTION FOR COSTING OF RESEARCH REACTOR DECOMMISSIONING: FINAL REPORT OF THE DACCORD COLLABORATIVE PROJECT

Esta publicación informa sobre el proyecto DACCORD, que presta apoyo a los Estados Miembros con la preparación de estimaciones preliminares de costos para la clausura de reactores de investigación. La información presentada redundaba en especial beneficio de los programas que cuentan con limitada experiencia en materia de clausura. Calcular los costos de la clausura de un reactor de investigación puede ser una tarea de amplio alcance: es preciso tener debidamente en cuenta varias posibles aportaciones e influencias a la hora de elaborar la estimación correspondiente. En esta publicación se ofrece información sobre los factores unitarios para la clausura de los reactores de investigación y se establece una base para la estimación de incertidumbres y contingencias y para la evaluación del impacto de las actividades de caracterización y planificación de la clausura. La publicación también aborda el uso del código del programa informático CERREX-D2 (estimaciones de costos en Excel para clausurar reactores de investigación), desarrollado por el OIEA a fin de que los usuarios no especializados puedan elaborar estimaciones de costos preliminares en relación con la clausura.

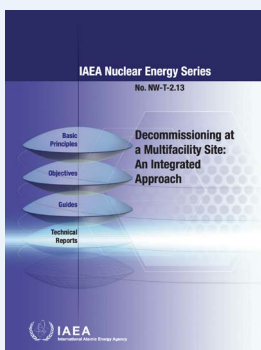
ISBN: 978-92-0-108621-1



MANAGING THE DECOMMISSIONING AND REMEDIATION OF DAMAGED NUCLEAR FACILITIES

En el marco del Plan de Acción sobre Seguridad Nuclear, el OIEA dirigió el Proyecto Internacional sobre la Gestión de la Clausura y la Rehabilitación de Instalaciones Nucleares Dañadas (Proyecto DAROD). Este proyecto se centra en proporcionar, sobre la base de estudios de caso de instalaciones dañadas y enseñanzas extraídas reales, orientaciones prácticas para clausurar y rehabilitar instalaciones nucleares dañadas a causa de accidentes. Esta publicación resume los resultados prácticos del Proyecto DAROD. Ha sido concebida para órganos reguladores, entidades explotadoras, organizaciones de apoyo técnico y funcionarios gubernamentales que participan en la clausura y la rehabilitación de instalaciones nucleares dañadas tras un accidente o a causa de un deterioro histórico.

ISBN: 978-92-0-142621-5



DECOMMISSIONING AT A MULTIFACILITY SITE

En los últimos años, varios Estados Miembros han concluido la clausura de emplazamientos nucleares con instalaciones múltiples. Esta publicación consolida su experiencia técnica y organizativa y ofrece información y orientaciones prácticas que promueven la ejecución segura, oportuna y eficaz en función del costo. Se examinan todas las fases de la clausura, desde la planificación y el desmantelamiento hasta la gestión de desechos radiactivos y el levantamiento del control del emplazamiento, así como planes de organización y la financiación. Esta publicación va dirigida a los responsables de la toma de decisiones, explotadores de centrales nucleares, contratistas y reguladores implicados en la planificación, la gestión, la autorización y la ejecución de actividades de clausura. Reviste particular importancia para los explotadores de emplazamientos nucleares con instalaciones múltiples cuya vida útil prevista se acerca a su fin. También revestirá interés para los diseñadores y constructores de establecimientos nucleares nuevos con el objeto de facilitar la clausura llegado el momento.

ISBN: 978-92-0-119522-7

SI NECESITA INFORMACIÓN ADICIONAL O DESEA ENCARGAR UNA PUBLICACIÓN, PÓNGASE EN CONTACTO CON:

Dependencia de Mercadotecnia y Venta
 Organismo Internacional de Energía Atómica
 Vienna International Centre, PO Box 100, A-1400 Viena (Austria)
 Correo electrónico: sales.publications@iaea.org

Lea este y otros números del *Boletín del OIEA* en línea en
www.iaea.org/es/bulletin

Para más información sobre el OIEA y su labor, visite
www.iaea.org

o síguenos en

