

CUINAP | Argentina

Año 4 • **2023** | Cuadernos del INAP

Investigación, innovación y producción en la CNEA

El reactor multipropósito RA-10
y el Laboratorio Argentino de Haces
de Neutrones (LAHN)

Jorge Salvador Zappino

134

Capacitar e investigar para fortalecer las capacidades estatales

CUINAP | Argentina

Investigación, innovación y producción en la CNEA

El reactor multipropósito RA-10
y el Laboratorio Argentino de Haces
de Neutrones (LAHN)

Jorge Salvador Zappino

134

Autoridades

Dr. Alberto Ángel Fernández

Presidente de la Nación

Ing. Agustín Oscar Rossi

Jefe de Gabinete de Ministros

Dra. Ana Gabriela Castellani

Secretaria de Gestión y Empleo Público

Mag. Leandro Bottinelli

Director Institucional del INAP

Índice

Introducción	10
1 Breve referencia de los reactores nucleares de investigación de la CNEA	13
2 Antecedentes y características del RA-10	28
3 La Planta de Producción de Elementos Combustibles para Reactores de Investigación (ECRI)	47
4 Innovaciones en el proyecto: el Laboratorio Argentino de Haces de Neutrones (LAHN)	58
5 Actualidad del Reactor Multipropósito RA-10 y del LAHN	70
A modo de conclusión	74
Glosario	76
Referencias bibliográficas	84

Investigación, innovación y producción en la CNEA



**Jorge
Salvador
Zappino**

Licenciado en Ciencia Política por la Universidad de Buenos Aires (UBA), magíster en Historia Económica y de las Políticas Económicas (UBA), y magíster en Generación y Análisis de Información Estadística (UNTREF). Ejerció como docente universitario en la UBA y desarrolló diversas actividades en otras universidades públicas y privadas del país. Actualmente, se desempeña como investigador en la Dirección de Gestión del Conocimiento, Investigación y Publicaciones del INAP.

Resumen

Los reactores de investigación son reactores nucleares utilizados para la investigación y el desarrollo en tecnología nuclear. Entre las aplicaciones principales de esta tecnología se pueden citar la medicina, la industria, la energía y la investigación científica en áreas como física nuclear, química, biología, medicina, etc. Estos estudios contribuyen al desarrollo de modernas tecnologías, medicamentos y materiales para la industria. Además, son utilizados para la formación de profesionales del área nuclear y para la investigación y el desarrollo de tecnologías de control y seguridad de la energía nuclear.

En estos reactores, los neutrones generados por el proceso de fisión son utilizados, entre otras cosas, para producir radioisótopos empleados en medicina nuclear para el diagnóstico y tratamiento de diferentes enfermedades, lo que contribuye a mejorar la calidad de vida de la población.

La Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) es el organismo argentino a cargo de la promoción y el desarrollo de la tecnología nuclear en el país, y cuenta con una trayectoria de más de 70 años en el estudio y desarrollo de reactores de investigación. En este sentido, ha sido responsable de la construcción y operación de los reactores RA-1, RA-2, RA-3, RA-4, RA-6 y RA-8, entre otros, los cuales fueron diseñados y construidos con tecnología argentina, y han permitido la realización de importantes investigaciones científicas, además de contar con recursos humanos altamente capacitados en diversas disciplinas. Por otro lado, la CNEA ha exportado su tecnología a países como Australia, Argelia, Egipto, y Perú, entre otros.

En el presente, la CNEA cuenta con cinco reactores de investigación operativos distribuidos en distintos puntos territorio argentino. El más importante de ellos es el RA-3, el cual fue puesto en marcha en 1967 y

funciona en el Centro Atómico Ezeiza (CAE). Es el reactor con mayor potencia (10 MW) y el mayor productor de radioisótopos de la Argentina y Latinoamérica. Actualmente, está en construcción el Reactor Argentino Multipropósito RA-10 en el CAE, cuya historia, desarrollo y características son el motivo de este trabajo.

Palabras clave

RA-10, reactores de experimentación, técnicas neutrónicas, radioisótopos, Argentina.

Abstract

The research reactors are nuclear reactors used for research and development in nuclear technology. Among the main applications of this technology, we can mention medicine, industry, energy and scientific research in areas such as nuclear physics, chemistry, biology, medicine and so on. Such research contributes to the development of modern technologies, medicines and materials for industry. In addition, they are used for the training of professionals in the nuclear area and for research and development of nuclear energy control and safety technologies.

In these reactors, the neutrons generated by the fission process are, mainly, used to produce radioisotopes. These radioisotopes are used in nuclear medicine for the diagnosis and treatment of different diseases, which contributes to improving the population lifestyle.

The National Atomic Energy Commission (CNEA) is the Argentine organization in charge of the promotion and development of nuclear technology in the country, and has a history of more than 70 years in the research and development of research reactors. Therefore, it has been responsible for the construction and operation of the RA-1, RA-2, RA-3,

RA-4, RA-6 and RA-8 reactors, among others, which were designed and built with Argentine technology. Moreover, they have allowed important scientific research to be carried out and to have highly trained human resources in several disciplines. In addition, CNEA has exported its technology to countries such as Australia, Algeria, Egypt, and Peru, among others.

At present, the CNEA has five operational research reactors distributed in different parts of Argentina. The most important of them is the RA-3, launched in 1967. It operates at the Ezeiza Atomic Center (CAE), being the reactor with the highest power (10 MW) and the largest producer of radioisotopes in Argentina and Latin America. Nowadays, the Argentine Multipurpose Reactor RA-10 is under construction in the CAE, whose history, development and characteristics forms the basis of this paper.

Key words

Training, RA-10, experimentation reactors, neutron techniques, radioisotopes, Argentina.

Introducción¹

Los reactores de investigación son reactores nucleares utilizados para la investigación y el desarrollo en tecnología nuclear. Entre las aplicaciones principales de esta tecnología, se pueden citar la medicina, la industria, la energía y la investigación científica en áreas como física nuclear, química, biología, medicina, etc. Estos estudios contribuyen al desarrollo de modernas tecnologías, medicamentos y materiales para la industria. Además, son utilizados para la formación de profesionales del área nuclear y para la investigación y el desarrollo de tecnologías de control y seguridad de la energía nuclear.

En estos reactores, los neutrones generados por el proceso de fisión son utilizados, entre otras cosas, para producir radioisótopos empleados en medicina nuclear para el diagnóstico y tratamiento de diferentes enfermedades, lo que contribuye a mejorar la calidad de vida de la población.

La Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) es el organismo argentino a cargo de la promoción y el desarrollo de la tecnología nuclear en el país, y cuenta con una trayectoria de más de 70 años en la investigación y desarrollo de reactores de investigación. En este sentido, ha sido responsable de la construcción y operación de los reactores RA-1, RA-2, RA-3, RA-4, RA-6 y

1 El autor está en deuda con las/os siguientes directivas/os y técnicas/os de las instalaciones analizadas en este trabajo, sin ellas/os la visita y la posterior descripción habrían sido imposibles: Natalia Stankevicius, gerenta de Área de Producción de Radioisótopos y Aplicaciones de la Radiación; Pablo Cristini, responsable Primario PPRF; Daniel Cestau, jefe de Instalación PPRF; Leticia Santaren, jefa de Proceso PPRF; Roberto Centurión, operador PPRF; Hernán Spinelli, jefe de Oficiales de Radioprotección; Verónica Cerizola, subgerenta de Dirección Técnica; Débora Bottazzini, responsable Primaria y jefa de Instalación PPR; Gisele Lencina, jefa de Proceso PPR; Emiliano Pozzi, jefe de Turno RA-3; Ariel Bellino, jefe de Turno RA-3; Marcelo Otero, jefe de Operación RA-3; Juan Riella, jefe de Radioprotección RA-3; y Carlos Torres, oficial de Radioprotección RA-3. Un agradecimiento especial para la Dra. Adriana Serquis, presidenta de CNEA; el Ing. Herman Blaumann, gerente del Proyecto RA-10; el Dr. Rolando Granada, investigador Superior de CNEA; y Daniel Podestá, jefe de Instalación y de Departamento ECRI.

RA-8, entre otros, los cuales fueron diseñados y construidos con tecnología argentina, y han permitido la realización de importantes investigaciones científicas, además de contar con recursos humanos altamente capacitados en diversas disciplinas. Por otro lado, la CNEA ha exportado su tecnología a países como Australia, Argelia, Egipto, y Perú, entre otros.

En el presente, la CNEA cuenta con cinco reactores de investigación operativos distribuidos en distintos puntos territorio argentino². El más importante de ellos es el RA-3, el cual fue puesto en marcha en 1967 y funciona en el Centro Atómico Ezeiza (CAE). Es el reactor con mayor potencia (10 MW) y el mayor productor de radioisótopos de Argentina y Latinoamérica. Actualmente, está en construcción el Reactor Argentino Multipropósito RA-10 en el CAE, cuya historia, desarrollo y características son el motivo de este trabajo.

El análisis está dividido en cinco apartados. En el primero, haremos una breve recorrida por la historia de los reactores de investigación argentinos. Centraremos el análisis en el antecedente más directo del RA-10, es decir, el RA-3, en la historia de la producción nacional de radioisótopos y en la descripción de la Planta de Producción y Fraccionamiento de Radioisótopos por Fisión (PPFRF). En el apartado 2, presentaremos los antecedentes, los orígenes y la descripción del Reactor Multipropósito Argentino RA-10. Para ello, describiremos en detalle sus características principales. Luego, en el apartado 3, analizaremos los orígenes y el funcionamiento de la Planta de Producción de Elementos Combustibles para Reactores de Investigación (ECRI). En el apartado 4, describiremos los antecedentes del Laboratorio Argentino de Haces de Neutrones (LAHN), único en su tipo en el hemisferio sur, y exhibiremos sus principales características

² En el caso del RA-0 y el RA-4, las entidades responsables son la Universidad Nacional de Córdoba (UNC) y la Universidad Nacional de Rosario (UNR), respectivamente.

y aplicaciones. Por último, en el apartado 5 haremos un repaso de la actualidad del proyecto del RA-10 y del LAHN, para llegar finalmente a las conclusiones del trabajo.

Breve referencia de los reactores nucleares de investigación de la CNEA

Los reactores nucleares pueden clasificarse en *reactores de investigación* y *reactores de potencia*. Los primeros son utilizados para obtener partículas nucleares empleadas para realizar estudios sobre materiales, producir radioisótopos de uso medicinal e industrial, y como instalaciones de prácticas e investigaciones. Los segundos están destinados a la generación de energía eléctrica.

En los reactores de investigación, se utiliza el flujo neutrónico generado para producir sustancias llamadas «radioisótopos» y para realizar diversos tipos de ensayos. Su producción posibilita la realización de diagnósticos y tratamientos en los servicios de medicina nuclear tanto de los hospitales públicos como de otros de todo el país, en los cuales se tratan enfermedades como el cáncer, cardiopatías y trastornos neurológicos.

La Argentina se ha convertido, en los últimos años, en un actor mundial clave en este tipo de reactores. La CNEA y la empresa pública INVAP S.E. han construido varios de ellos en otros países de la región y de otros continentes. Como ejemplo de esto, en agosto de 2022, la CNEA, INVAP y el Departamento de Energía Atómica de la India pusieron en marcha una instalación en Mumbai, para el cual INVAP había ganado la licitación

internacional en 2014. Este contrato implicó, además, el entrenamiento del personal de operación en ambos países. Entre las principales exportaciones de CNEA e INVAP en este mercado, pueden citarse: Perú, RP-0 (1978); y RP-10 (1988); Argelia, NUR (1989); Egipto, ETRR (1998); y Australia, OPAL (2006).

La producción de radioisótopos se encuentra en crecimiento en el mundo y la Argentina se ha convertido en un líder regional por la calidad de sus productos y el conocimiento adquirido en la construcción y la operación de reactores, lo cual genera valor agregado, desarrollo tecnológico y transferencia de conocimiento.

Entre 1950 y 1958 se fueron conformando los equipos de investigación de la CNEA, a la vez que se formaron profesionales en ingeniería y en física nuclear, se instalaron los primeros laboratorios, se fabricaron los primeros elementos combustibles (EECC), para culminar, a inicios de 1958, con la puesta en marcha del primer reactor de investigación, el RA-1.

El RA-1 fue el primer reactor de investigación del hemisferio sur en alcanzar la criticidad el 17 de enero de 1958 y fue construido íntegramente en la Argentina. Por su parte, el RA-3 es uno de los reactores argentinos más importantes, ya que en él se producen todos los radioisótopos utilizados en el país y para la exportación.

La década de 1960 fue testigo del desarrollo de las aplicaciones nucleares, entre ellas, la fabricación de nuevos EECC para reactores de investigación y la construcción de facilidades críticas, y de un reactor de investigación y producción de radioisótopos. Además, en estos años se iniciaron los estudios para dar comienzo a la generación de energía eléctrica con reactores de potencia.

Entre la década de 1970 y los años 2000, la Argentina ingresó a la etapa de la generación nucleoelectrónica con la construcción de tres reactores de potencia. Además, se construirían nuevos reactores de investigación y producción de radioisótopos para exportación, se logró el dominio completo del ciclo del combustible nuclear y se ingresó en los primeros intentos para desarrollar centrales de potencia con tecnología nacional³.

El país cuenta, en la actualidad, con cinco reactores nucleares de investigación en operación, los cuales están instalados en los centros atómicos Constituyentes (CAC), Ezeiza (CAE) y Bariloche (CAB), en el Complejo Tecnológico Pilcaniyeu (CTP) y en las universidades nacionales de Córdoba (UNC) y de Rosario (UNR).

En la Tabla 1, se observan las características de los reactores nucleares de investigación y producción de radioisótopos de la CNEA⁴.

3 Para más detalles sobre el desarrollo nuclear de CNEA, reactores y combustibles, véase Hurtado (2014), De Dicco (2013), De Dicco *et al.* (2015) y Zappino (2022a, 2022b, 2022c, 2022d).

4 Para más detalles de los reactores nucleares RA-1, RA-0, RA-2, RA-4, RA-6 y RA-8, véase De Dicco (2013). El reactor nuclear RA-3 será tratado como antecedente del RA-10 en los apartados que siguen.

Tabla 1. Reactores nucleares de investigación y producción de radioisótopos de la CNEA

Unidad	Año de primera criticidad	Potencia térmica	Ubicación	Propósito principal
RA-1	1958	40 kWt	CAC	Investigación y formación de recursos humanos
RA-0	1958	1 Wt	Universidad Nacional de Córdoba	Conjunto crítico para la formación de recursos humanos y difusión de la actividad nuclear
RA-2	1966	30 Wt	CAC	Conjunto crítico experimental (desmantelado)
RA-3	1967	10 MWt	CAE	Producción comercial de radioisótopos e investigación
RA-4	1971	1 Wt	Universidad Nacional de Rosario	Conjunto Crítico para formación de recursos humanos y difusión de la actividad nuclear
RA-6	1982	3 MWt	CAB	Investigación y formación de recursos humanos
RA-8*	1997	10 Wt	Complejo Tecnológico Pilcaniyeu	Conjunto crítico experimental del reactor de potencia CAREM

* El RA-8 estuvo operativo entre 1997 y 2001. Actualmente, se encuentra desmantelado.

Nota: 1) todos los reactores operativos emplean en la actualidad U^{235} a <20 % de enriquecimiento, a excepción del RA-8: <3,4 %; 2) las designaciones RA-5, RA-7 y RA-9 corresponden a proyectos que, por diversos motivos, fueron cancelados en su primera etapa de ejecución.

Fuente: De Dicco (2013)

1.1 El Reactor Argentino RA-3 y la producción nacional de radioisótopos

En diciembre de 1967, se puso en marcha el reactor RA-3 con el objetivo de satisfacer la demanda de radioisótopos médicos y fortalecer la capacidad tecnológica nuclear del país. La construcción se realizó bajo los principios de «aprender haciendo» y la experiencia obtenida permitió el posterior diseño y construcción de otros reactores (Briozzo *et al.*, 2007).

El RA-3, ubicado en el CAE, es un reactor de investigación y producción de radioisótopos que utiliza uranio enriquecido como combustible (inicialmente al 90 % y desde 1990 al 20 %; volveremos sobre este tema más adelante). Su potencia fue aumentada en varias ocasiones. Actualmente, tiene licencia para operar a 10 MW.

La decisión de construir este reactor —y la planta de producción de radioisótopos anexa— estuvo relacionada con el avance de la radioquímica. En ese sentido, es importante destacar que la primera aplicación de la energía nuclear en el país fue el uso médico de los radioisótopos. En efecto, el impulso a la medicina nuclear se reflejó en las acciones realizadas a partir de mediados de los años cincuenta, cuando la CNEA llevó adelante una fuerte actividad de promoción de sus aplicaciones, especialmente a través de cursos dirigidos al sector médico.

En este contexto, se estableció el Departamento de Biología y Medicina Nuclear en 1952, y, en 1957, se creó la División de Investigaciones Radiobiológicas. Además, se construyeron instalaciones como el bioterio y los laboratorios de genética y rayos X. En el mismo año, se formó el Departamento de Radioisótopos, encargado de la gestión del suministro y comercialización de material radioactivo, así como del estudio y la

promoción de sus aplicaciones. Para satisfacer las crecientes necesidades médicas, se comenzaron a producir los primeros radioisótopos en un acelerador de partículas (sincrociclotrón). Sin embargo, las capacidades de este equipo eran limitadas y se ampliaron cuando el reactor RA-1 empezó a operar en enero de 1958. La demanda de radioisótopos para uso médico aumentó rápidamente y superó la capacidad de producción, lo que llevó a la decisión de aumentar la potencia del reactor a finales de 1959. Este reinició su producción al año siguiente.

Mientras se realizaban los trabajos de potenciación del RA-1, se comenzó a considerar la construcción de otro reactor de mayor potencia, ya que era evidente que la demanda superaría pronto las capacidades existentes. Así, entre finales de 1960 y principios de 1961, se empezó a idear y diseñar un nuevo reactor con mayor potencia que estaría acompañado de una planta de producción de radioisótopos para reemplazar la producción a nivel de laboratorio. De esta manera, nació el proyecto del RA-3.

Si bien el objetivo principal era satisfacer las necesidades nacionales de radioisótopos, el RA-3 tenía como objetivo, además, su diseño y construcción en el país en lugar de su adquisición «llave en mano». Esta decisión traería aparejados beneficios a largo plazo como la expansión de las industrias locales, la capacitación tecnológica, la investigación científica y técnica, y el aprovechamiento integral de los recursos naturales.

Para lograr resultados positivos en este proceso, era esencial contar con personal altamente calificado en desarrollo tecnológico e ingeniería. La adquisición de capacidades que permitieron llevar a cabo nuevos proyectos fue resultado de una lógica acumulativa e innovación incremental seguida por la CNEA. Desde el comienzo del proyecto RA-3, la Comisión decidió involucrar en la construcción y suministro de equipos a empresas

locales tanto como fuera posible. En 1962, se realizó una licitación para la construcción del edificio y los componentes principales, como el tanque del reactor y los tanques de decaimiento (Briozzo *et al.*, 2007). Sin embargo, la quiebra del contratista original provocó una nueva licitación y retrasó las obras durante un año.

Aunque el diseño del reactor tenía influencia francesa debido a la estrecha relación con ese país en temas nucleares, se llevaron a cabo avances tecnológicos relevantes, como el diseño de dispositivos de irradiación, el sistema de control automático del reactor, monitores de área y dispositivos de medición de posición de las barras de control. La consola de control también fue diseñada y fabricada por una empresa local. La experiencia previa con la construcción del RA-1 y su modificación fue crucial para estos trabajos.

El 90 % de la participación fue de la industria nacional. El reactor se inauguró oficialmente en la fecha establecida, con una potencia de 0,5 MW, y, posteriormente, se completaron los sistemas de detección de radiación y blindaje, así como el segundo circuito de refrigeración. A partir de 1969, el reactor comenzó a operar regularmente a una potencia máxima de 2,5 MW. Y desde 1970, el nuevo reactor permitió que la Argentina pasara de importar radioisótopos a producirlos localmente, de manera de garantizar el suministro a la salud pública.

En las figuras 1 y 2 puede observarse el tablero de comando del RA-3 y una toma del núcleo del reactor con los EECC y las barras de control, respectivamente.

Figura 1. Tablero de comando del RA-3



Fuente: imagen provista por la Gerencia del Área Producción de Radioisótopos y Aplicaciones de la Radiación de la CNEA

Figura 2. Núcleo del RA-3 con los EECC y las barras de control



Fuente: provista por la Gerencia del Área Producción de Radioisótopos y Aplicaciones de la Radiación de la CNEA

Posteriormente al RA-3, la CNEA, en conjunto con INVAP, desarrolló otros reactores de investigación en la Argentina y en otros países durante los siguientes 40 años. Entre estos, se pueden nombrar el RA-6 en Bariloche (1982), el RP-10 en Perú (1988), el NUR en Argelia (1989), el ETRR-2 en Egipto (1997), el OPAL en Australia (2007) y el conjunto crítico RA-8 en Pilcaniyeu (1997). Actualmente, la Argentina es uno de los pocos proveedores mundiales de estos reactores de alta tecnología.

1.2 La Planta de Producción de Radioisótopos por Fisión (PPRF)

La Planta de Producción y Fraccionamiento de Radioisótopos por Fisión se encuentra situada en el CAE. Está constituida por un conjunto de celdas blindadas con plomo en las paredes, en condiciones de estanqueidad y de atmósfera controlada. Las celdas se ubican alrededor de un corredor denominado «caliente», operado desde los laboratorios, por donde ingresa el material irradiado proveniente del reactor RA-3⁵. Este corredor se comunica por uno de sus extremos con el edificio del RA-3 y con el edificio de la planta.

Entre los principales radioisótopos para uso medicinal, industrial y agropecuario que se producen se encuentran:

- ⁹⁹Mo (molibdeno 99)
- ^{99m}Tc (tecnecio 99)
- ¹³¹I (yodo 131)
- ⁵¹Cr (cromo 51)
- ¹⁵³Sm (samario 153)
- ³²P (fósforo 32)

5 El acceso de personal y equipos se realiza bajo vigilancia radiológica permanente.

El yodo 131 se utiliza principalmente en el diagnóstico y tratamiento de trastornos de la tiroides, mientras que el tecnecio 99 (producto derivado del decaimiento del molibdeno 99) es mayormente utilizado en el diagnóstico médico, de manera que se cubre aproximadamente el 85 % de las prácticas de medicina nuclear en todo el mundo. En este sentido, la CNEA suministra tanto el yodo 131 como el molibdeno 99 para la totalidad del mercado interno argentino y además exporta a Brasil.

El equipamiento de la planta incluye

- celdas radioquímicas con telemanipuladores y telepinzas para manipulación a distancia;
- campanas radioquímicas y cajas de guantes;
- equipamiento de laboratorio para los procesos de producción y fraccionamiento en mesada y dentro de las celdas radioquímicas.

La producción rutinaria de molibdeno 99 tuvo sus inicios en 1985. En ese momento, se utilizaban blancos de irradiación de uranio enriquecido al 90 % en su isótopo 235 (HEU, por su sigla en inglés), los cuales eran irradiados en el reactor RA-3. Sin embargo, desde 2002, la Argentina produce este radioisótopo utilizando blancos de irradiación de bajo enriquecimiento (LEU, por su sigla en inglés) con menos del 20 % del isótopo 235, lo cual contribuye a reducir los riesgos de proliferación nuclear. Este cambio significó un hito importante en el desarrollo nuclear nacional.

Los orígenes de este hecho datan de 1992, cuando EE. UU. aprobó la enmienda Shumer⁶, lo cual significaba que las empresas estadounidenses exportadoras de uranio enriquecido debían cambiar a uranio enriquecido

⁶ Esta enmienda condiciona la exportación estadounidense de HEU a empresas extranjeras al establecer que estas deberían cambiar a LEU cuanto antes.

por debajo del 20 % antes de 2005. Estas medidas se basaban en políticas de no proliferación nuclear, ya que el HEU podía ser utilizado con fines bélicos. Para nuestro país, esta normativa representaba un problema y un desafío. El problema era que ya no contaría con HEU a partir de 2005 y el desafío representaba lograr el cambio a LEU antes de esa fecha. Finalmente, la CNEA logró el objetivo en 2002, por lo que la Argentina se convirtió en el primer país en producir molibdeno 99 utilizando LEU. Además, a través de INVAP, la Comisión ha transferido esta tecnología a Australia, Egipto, Argelia e India (Carranza, 2017).

Sobre la transferencia de tecnología a India, la gerenta del Área Producción de Radioisótopos y Aplicaciones de la Radiación de la CNEA, Natalia Stankevicius, aclara:

La transferencia de tecnología y la puesta en marcha de la planta de India se encuadran en un largo recorrido que tiene Argentina en materia del proceso científico-tecnológico nuclear nacional. (...) Lo que nosotros le transferimos a la India en forma conjunta entre CNEA e INVAP fue el proceso de producción de Mo-99. Invap se hizo cargo de la ingeniería y montaje de la planta y CNEA de la calificación del proceso radioquímico asociado a la transferencia tecnológica que permitió la validación de los equipos y componentes instalados para que funcionen los equipos. INVAP contrata a la CNEA porque el Estado Nacional, a través de la CNEA, es dueño de la tecnología y luego se hace un trabajo conjunto para puesta en marcha de la planta. Se llevan a cabo pruebas del proceso en frío y luego una etapa que se llama *hot commissioning* que es una corrida con las placas irradiadas en el reactor. Esta etapa se hace con personal de la CNEA, que cuenta con la experiencia de operación, que viajan a la India para calificar el proceso y también forma parte del primer entrenamiento *in situ* del personal de India que luego va a operar en esa plantilla. (...) India selecciona a Argentina por

interés de acuerdos bilaterales en materia de capacitaciones e intercambios por la capacidad de Argentina de llevar a cabo proyectos exitosos relativos a transferencias de tecnología (Muñoz Castiñeira, 2023).

1.2.1 El proceso de producción y fraccionamiento de radioisótopos

Los blancos de irradiación son sometidos a un intenso flujo de neutrones en el reactor RA-3 durante aproximadamente cuatro días a fin de obtener los radioisótopos deseados a través de la fisión del uranio. Luego de ese tiempo de irradiación, los blancos se trasladan a la planta a través de un carro-blindaje de plomo de gran espesor (23 cm) para garantizar la seguridad del personal⁷.

Una vez trasladadas las miniplacas a la planta, la cual se halla conectada internamente con el reactor, el carro-blindaje se acopla a la compuerta de la celda de disolución. Allí, y mediante telemanipuladores, las/os operadoras/es retiran las miniplacas del cartucho que ya se encuentra dentro de la celda y da comienzo el proceso de producción.

La primera etapa comienza con la disolución y filtración de las miniplacas. En el filtro se deposita el uranio que no ha experimentado fisión (aproximadamente el 2 % del uranio 235 presente en las miniplacas). Los filtros se identifican y almacenan en la celda para su posterior administración y conteo. El filtrado contiene molibdeno 99, yodo 131 y otros elementos de menor interés.

⁷ Todo el personal involucrado en el proceso cuenta con dosímetros para medir su exposición a la radiación.

Luego de la filtración, se realiza la primera etapa de separación donde se retiene el molibdeno 99 por un lado y el yodo 131 por otro. A partir de aquí, el proceso se divide en dos caminos, uno para cada radioisótopo. En el proceso de molibdeno 99, hay otras dos etapas de separación con características operativas específicas (resina de intercambio, temperatura, etc.).

Después de la tercera etapa, el molibdeno 99 ya está completamente separado en una forma química determinada. Al finalizar todo el proceso, se mide la actividad obtenida y se traslada el producto para realizar el control de calidad y el fraccionamiento. Para obtener el yodo 131 se realiza una segunda separación y se envía luego de una semana de decaimiento (Cristini *et al.*, 2017).

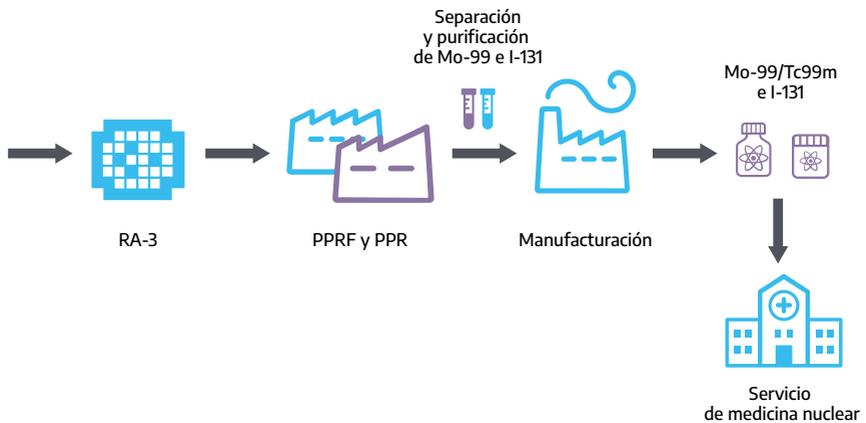
Sobre el proceso de producción, Natalia Stankevicius amplía:

Los blancos de irradiación que vienen de la ECRI son preservados en la planta y quedan custodiados por normas de salvaguardas. Frente a cada proceso productivo, el jefe de instalación decide enviar los blancos al RA- 3. Dado que la trazabilidad es un requisito normativo, cada uno de los blancos tiene su código para conocer, por ejemplo, cuántos gramos de uranio están ingresando al reactor. Luego, los blancos se envían al reactor donde se irradian. El reactor empieza, en general, a operar los domingos hasta el miércoles. Allí se bombardea con neutrones el blanco para producir la fisión del uranio. En este caso, no nos interesa preservar el calor que se produce, sino que interesan las transmutaciones que se van creando en la fisión. Cuando las miniplacas están irradiadas, se trasladan a las celdas que están ubicadas en la planta, se colocan dentro de un disolutor mediante un proceso radioquímico para que los blancos, que están en estado sólido, pasen a estado líquido. Luego, se le realiza un proceso purificación y otro proceso en el que se separan los radioisótopos de interés. Una vez separados el molibdeno 99 y el yodo 131,

se envían a la segunda planta de producción donde se realizan otras etapas de proceso y los controles. Una vez aprobados por la dirección técnica, van a la sección de fraccionamiento y embalaje (comunicación personal, 28 de abril de 2023).

En la Figura 3, puede observarse una esquema del proceso de producción de radioisótopos.

Figura 3. Proceso de producción de radioisótopos



Fuente: ilustración provista por la Gerencia del Área Producción de Radioisótopos y Aplicaciones de la Radiación de la CNEA

La decisión de construir el Reactor Multipropósito RA-10 llevó a la necesidad de realizar el proyecto de una nueva planta de producción de radioisótopos por fisión. Entre los objetivos de esta nueva planta, se encuentra incrementar la producción de radioisótopos a escala comercial para satisfacer la demanda local, regional e internacional con preferencia en la producción de molibdeno 99 e yodo 131, entre otros radioisótopos. La producción semanal debería poder sostenerse en cantidades que van

de 2000 y 3000 (a 6 días) curies de molibdeno 99 y 400 curies de yodo 131. Además, la nueva planta posibilitará el desarrollo de procesos para la producción de nuevos radioisótopos. Sobre el proyecto de la nueva planta de producción, la presidenta de la CNEA, Dra. Adriana Serquis, afirma:

Se está trabajando en un plan de negocios con el fin de conocer cuáles son los requerimientos y necesidades del país y de la región para ver hasta dónde hay que llegar con la producción. Mientras tanto, estamos trabajando ya firmemente en el plan de la nueva planta asociada al RA-10, porque las capacidades de la actual planta requieren una mejora de la tecnología para poder aprovechar mejor la potencialidad del nuevo reactor. El diseño e ingeniería de detalle de esta nueva planta comenzaría a mediados de 2024, con la expectativa de acoplarse al cronograma de puesta en marcha del RA-10 (comunicación personal, 7 de septiembre de 2023).

Actualmente, solo existen cinco plantas similares en el mundo y esta sería la única en Latinoamérica (Cristini *et al.*, 2017).

Finalmente, en lo que respecta al rol de la Argentina en el mercado de radioisótopos, Stankevicius afirma:

Argentina se está posicionando como un fuerte productor, no solo por la producción nacional de 52 años ininterrumpidos. El 80 % de los estudios de medicina nuclear se realizan utilizando tecnecio 99 (es el isótopo «hijo» del molibdeno), y eso implica que si en Argentina no tuviéramos producción nacional sería muy difícil la accesibilidad a los estudios de medicina nuclear, Y a la vez permite tener la capacidad de sustituir importaciones y realizar exportaciones de alto valor agregado (Nota al Pie, 2023).

2

Antecedentes y características del RA-10

Los orígenes del proyecto para construir un nuevo reactor para la producción de radioisótopos a fin de reemplazar al RA-3, se encuentran en el proyecto RA-7, presentado en 1979, que proponía un reactor nuclear de alto flujo neutrónico que utilizara uranio natural y agua pesada como moderador y refrigerante. El objetivo era probar materiales y EECC, y producir radioisótopos en forma comercial.

En 1981, ya se había completado el 75 % de la ingeniería conceptual. Sin embargo, debido a las dificultades económicas por las que transitaba el país en ese momento, el proyecto fue abandonado.

En 1985, el Poder Ejecutivo Nacional (PEN) firmó el Decreto 1777/1985, por el cual se autorizaba a la CNEA a construir un nuevo reactor nuclear de producción de radioisótopos sito en la provincia de Córdoba y denominado «RA-9». Este proyecto interesó prontamente al Dr. Rolando Granada, investigador superior de CNEA-CAB, quien nos dio su testimonio sobre los avatares de los primeros momentos:

El proyecto del RA-9 existió a mediados de los años ochenta, propuesto por el Dr. Gregorio Baró, de la Dirección de Radioisótopos y Radiaciones, para la construcción de un nuevo reactor a fin de extender las capacidades del ya existente RA-3 para producir radioisótopos. Enterado del proyecto, solicité

rápidamente a las autoridades, del CAB en principio, y ellas se dirigieron a las autoridades nacionales de CNEA, la posibilidad de que se incluyan tubos para extraer haces de ese nuevo reactor. Porque el reactor iba a tener una potencia importante, se hablaba de 20 o 22 MW. Ese fue el motivo del inicio de mis tareas de constante búsqueda para que pudiéramos tener un reactor de investigación nuevo con capacidad para investigación también, además de producción de radioisótopos en nuestro país.

En este sentido, pude participar en aspectos del diseño de esos tubos, juntamente con el equipo de INVAP, quien tenía a su cargo la ingeniería. Y, por otro lado, comenzamos a conversar con la gente de la Universidad Nacional de Córdoba, porque el reactor iba a estar emplazado cercano al sitio del reactor de Embalse. Así que consideramos que era importante que existiera una unidad académica potente en cercanías para que no se convierta solamente en una fábrica de radioisótopos, sino que, además, hubiera realmente investigación. En esos años, uno de los que proponía Córdoba como emplazamiento del nuevo reactor RA-9 era el entonces gobernador Angeloz, que quería instalar en esa provincia una especie de centro atómico, un polo de desarrollo nuclear basado no solamente en el reactor de generación nucleoelectrónica como el de Embalse, sino también en un reactor de investigación. Así que llegamos a establecer un acuerdo entre la CNEA, la UNC y la provincia de Córdoba, donde esta última ponía a disposición algunas becas de Córdoba Alta Tecnología [CORATEC], que era la agencia que había sido creada en la provincia. La UNC iba a proponer a jóvenes estudiantes para que pudieran también venir a terminar sus estudios en el CAB, donde los íbamos a recibir para que comiencen a formarse en estas nuevas técnicas. Luego, los años 1986 y 1987 fueron muy malos desde el punto de vista económico y financiero, y el proyecto nunca llegó a concretarse (comunicación personal, 25 de noviembre de 2022).

Al año siguiente, se firmó una Declaración Conjunta entre el Gobierno de la provincia de Córdoba, la UNC y la CNEA, mediante la cual se planteaba el interés en que el reactor tuviera como propósito la producción de radioisótopos y la investigación básica y aplicada. En septiembre de ese mismo año, se elaboró el Proyecto Laboratorio de Técnicas de Investigación Neutrónicas (LATIN) mediante la Resolución 563/1986, sobre el cual volveremos en el apartado 4.1. Este proyecto presentaba una propuesta para utilizar el RA-9 en investigación básica y aplicada, pues establecía un laboratorio para la utilización de técnicas neutrónicas y un programa de formación de recursos humanos. Sin embargo, la reducción de recursos financieros llevó a la cancelación del proyecto (De Dicco, 2014).

A mediados de los noventa, el Dr. Granada presentó una nueva propuesta ante la CNEA y la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Nación para construir un nuevo reactor de investigación, pero esta no fue considerada.

En 2008, la Honorable Cámara de Diputados de la Nación declaró la necesidad de que el Poder Ejecutivo Nacional (PEN) promoviera la iniciativa de construcción de un nuevo reactor nuclear de producción e investigación, como lo venía impulsando el Dr. Granada:

Continué constantemente bregando por esta idea mientras iban cambiando las autoridades. En realidad, hubo tres momentos muy particulares: este que acabo de mencionar con relación al proyecto RA-9 es el primero, el inicial, años 1986 a 1988. Luego, participé también, invitado por INVAP, en el reactor que estaban construyendo en Egipto, asesorando a la autoridad egipcia de energía nuclear en cuanto a la utilización de los haces de neutrones que este reactor iba a tener y también dictando cursos para los colegas egipcios. En esta línea de acción, hay otro punto importante, alrededor de la mitad de los noventa, durante la presidencia de Menem, donde vuelvo

a insistir presentando todo un paquete, todo un ensayo actualizado sobre la conveniencia de construir un reactor de investigación en nuestro país, algunas de sus características básicas y también utilidades.

Yo había tenido la oportunidad, gracias a la CNEA, a fines de los años ochenta, de realizar un recorrido por los reactores de investigación más importantes, lo que significó visitar una decena de reactores en diferentes partes del mundo, lugares donde pude tomar conocimiento directo de las características y utilización de sus haces de neutrones. De manera que eso me permitió luego formular propuestas que tenían una fundamentación muy real y muy concreta. Tampoco en ese momento hubo una respuesta favorable porque recuerdo bien que, durante un tiempo, la CNEA perteneció a la Secretaría de Ciencia y Tecnología que estaba a cargo del Lic. Juan Carlos del Bello. Y él, en realidad, consideró que la CNEA estaba planteando dos cosas, de las cuales una era el reactor CAREM. Y en vista que este era un proyecto que se venía desarrollando y que, por lo tanto, había que darle continuidad, desechó la posibilidad de considerar un nuevo reactor.

Durante 1999, mientras estuve a cargo de la Gerencia de Tecnología de CNEA, elaboré un nuevo plan estratégico para la institución aprobado por Resolución del Directorio número 56 [B.A.P. 47/1999], el cual incluye como uno de los objetivos del Proyecto Reactores Experimentales «diseñar un reactor de flujo neutrónico alto para producción de radioisótopos, irradiación de materiales y elementos combustibles, y la experimentación en otras áreas de interés básico o aplicado».

Y volví a darle impulso a estas ideas cuando, entre 2003 y 2006, fui gerente del CAB. Organice entonces *workshops* en los cuales se discutió intensamente sobre las posibilidades, y arribamos a la conveniencia de considerar seriamente la construcción de un reactor de esas características

en nuestro país. Hay que recordar que, por entonces, estaba en plena construcción y ya hacia su finalización lo que luego los australianos llamaron el reactor OPAL, construido por un consorcio liderado por INVAP. Eso fue una ratificación adicional de la capacidad de la Argentina para construir un reactor de esas características. Fue en ese momento cuando esta iniciativa cobró impulso dentro de la CNEA. Finalmente, en el año 2010, la Lic. Boero, presidenta de la CNEA, toma la decisión y lanza el proyecto de construcción del reactor RA-10 (comunicación personal, 25 de noviembre de 2022).

En efecto, en junio de 2010, mediante la Resolución 200/2010, la presidencia de CNEA decide comenzar con el diseño, la construcción y la puesta en marcha de un reactor nuclear multipropósito llamado RA-10. Ese año se llevaron adelante tareas para la estructuración, planificación e integración del proyecto. Además, se consolidó la ingeniería conceptual de requerimientos, del estudio de consistencia y de los principales sistemas del reactor.

En 2011, se realizaron actividades para la medición de la capa de óxido en placas de aluminio; el estudio de la ubicación para el proyecto, que incluyó el análisis de localización; la elaboración del análisis de seguridad para obtener la licencia de construcción otorgada por la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN); la elaboración de la ingeniería básica para el diseño, desarrollo y construcción del sistema de instrumentación nucleónica, del sistema de protección del reactor, de los EECC, las placas absorbentes y cajas guías; y la instalación de servicios de energía eléctrica, agua, gas natural y alcantarillado. Ese mismo año, el Proyecto RA-10 aumentó su capacidad operativa y funcional, y se completó la ingeniería conceptual con la colaboración de la empresa INVAP. Esta etapa requirió aproximadamente 25.000 horas de trabajo a lo largo de un año, con un presupuesto superior a \$1.5 millones (De Dicco, 2014).

Hacia fines de 2012, el proyecto presentaba un avance de la ingeniería básica del 90 %, la cual sería completada a mediados de 2013. En ese año, la CNEA e INVAP suscribieron un convenio para el desarrollo conjunto de la ingeniería de detalle del reactor, trabajo estimado en 450.000 horas hombre. Además, se realizó el diseño conceptual y la descripción general de los principales componentes para el tratamiento de los residuos líquidos radiactivos, y se terminó la elaboración de la ingeniería y el diseño básico de los EECC y conjuntos de control de reactividad para el reactor. Al año siguiente, la CNEA presentó a la ARN el *Informe preliminar de seguridad*, producto del cual se obtuvo la licencia de construcción.

Finalmente, el 6 de mayo de 2017, se produjo la primera colada de hormigón para la construcción del reactor. Con esa colada se inició, en términos regulatorios, la etapa de construcción. Sin embargo, la obra civil ya tenía un avance del 20 %. La losa era fundamental para la colocación de los tabiques y el montaje de los primeros componentes ubicados en el edificio del reactor.

En 2018, se construyó la pileta principal. Al año siguiente, se montó el tanque de decaimiento y la pileta de servicios. Finalmente, en 2020, se instalaron las bombas del sistema primario.

En la Figura 4, puede apreciarse una imagen del complejo RA-10 una vez finalizado.

Figura 4. Complejo RA-10



Fuente: imagen provista por la Gerencia del Proyecto RA-10 de la CNEA

Este proyecto tiene como antecedente inmediato el reactor de producción de radioisótopos OPAL, diseñado y construido por INVAP con la colaboración de la CNEA para Australia en 2007, con el cual el país obtuvo reconocimiento mundial.

Sobre los motivos que tiene la Argentina para construir un reactor de estas características, el Ing. Herman Blaumann, gerente del Proyecto RA-10, afirma:

Primero, asegurar el suministro, en el mediano plazo, de radioisótopos, para el mercado nacional. Tenemos un reactor que nos antecede, que es el RA-3. En realidad, los reactores experimentales no tienen fecha de vencimiento, pero es pertinente pensar en una nueva instalación para asegurar ese suministro y además que tenga el potencial para colocarnos también como proveedores importantes en el mercado mundial del molibdeno 99. Es decir, se trata de la decisión de posicionar a la Argentina en el

mercado mundial de los radioisótopos. Por otro lado, somos fabricantes de combustibles de reactores experimentales y de centrales nucleares, y no tenemos instalaciones en el país para calificar esos combustibles. Había muy pocas en el mundo. Una de las más importantes estaba en Noruega, el reactor Halden, que se cerró hace 2 años, y otra en Canadá. Es un tema crítico a nivel mundial. Entonces, hay una decisión de que el RA-10 cuente también con una instalación para calificar EECC. Este dispositivo se coloca en el tanque del reflector y reproduce las condiciones de presión y temperatura de una central nuclear. El combustible se quema allí igual que se quema en la central, en las mismas condiciones, y se evalúa después la *performance* de ese combustible bajo esas condiciones. Eso lo va a tener el RA-10. Es un desafío tecnológico, quizás el más importante del proyecto, y completa nuestra capacidad como productores de combustible nuclear (comunicación personal, 2 de marzo de 2023).

Articulados con el reactor RA-10, operarán la PPRF, el Laboratorio Argentino de Haces de Neutrones (LAHN), la Planta Industrial de Elementos Combustibles para Reactores de Investigación (PIECRI) y el Laboratorio de Ensayo de Materiales Irradiados (LEMI). Estas instalaciones conformarán un centro de radioisótopos médicos, ciencia y tecnología nuclear que representará un laboratorio único en su tipo en el país y en la región.

Entre los principales objetivos del proyecto pueden citarse:

- El aumento de la producción comercial de radioisótopos utilizados en medicina nuclear para satisfacer el mercado local, regional e internacional. El objetivo es el incremento en la producción de molibdeno 99 y el desarrollo de nuevos radioisótopos.
- La posibilidad de probar nuevos combustibles y materiales nucleares mediante la implementación de instalaciones para la irradiación de

miniplacas y combustibles para reactores nucleares experimentales MTR, así como pruebas en EECC de reactores nucleares de potencia, materiales estructurales para estudios de daño por radiación y corrosión, y materiales del recipiente de presión de reactores nucleares de potencia para el estudio de fragilización.

- Desarrollar aplicaciones tecnológicas para una amplia gama de temas relacionados con la investigación básica en campos como ingeniería nuclear, ciencia y tecnología de materiales, física de la materia condensada, química y biología mediante el uso de técnicas neutrónicas basadas en el uso de neutrones térmicos y fríos.

Es importante aclarar que la industria nacional participa de este proyecto con el 95 % de los suministros y montajes electromecánicos.

Las características técnicas de la instalación son las siguientes:

- El proyecto abarca un predio de 3,85 hectáreas. La superficie total cubierta será de más de 17.000 m², mientras que la superficie total a construir en planta será de 7632 m² (entre los niveles -8,5 m y +26,5 m).
- La instalación cuenta con cuatro edificios: el del reactor, el de guías de neutrones, el de servicios y el auxiliar.
- Los grandes componentes que incluye el edificio del reactor son la pileta principal, el tanque de decaimiento, la pileta de servicios y las bombas de circulación del sistema primario de refrigeración.
- Los EECC son de tipo placa de uranio de bajo enriquecimiento; su moderador será de agua liviana; su reflector, de agua pesada y operará en ciclos continuos de 26 días con una potencia de 30 MW.
- Dos sistemas de extinción diversos e independientes.

Sobre los EECC del reactor, Blaumann amplía:

Nuestros reactores experimentales se refrigeran con agua liviana que, en general, recorre el núcleo de arriba hacia abajo. También hay agua liviana, dentro de los combustibles, que actúa como moderador y están rodeados [el RA-3 y el RA-6] por grafito que actúa como reflector. Ese refrigerante es, a la vez, moderador. Después, está el agua de la pileta. Si en lugar de ese grafito que rodea al núcleo, se dejara simplemente el agua, tendría que armarse un núcleo más grande. El grafito reflector permite tener un núcleo más chico. Nosotros tenemos refrigeración y moderación por agua liviana. En lugar de reflector grafito, tenemos agua pesada, porque lo que buscamos es mucho volumen de reflector, porque ahí se colocan todos los dispositivos para producir radioisótopos, para dopar silicio, para irradiar combustibles, los conductos neumáticos para análisis por activación, es decir, casi todo lo que se va a irradiar en el RA-10 va a estar en el reflector. Porque ahí es donde se produce el flujo térmico más alto y eso se logra con agua pesada.

Entonces, nosotros utilizamos un tanque que tiene más de 1 m de diámetro que lleva adentro 6 t de agua pesada para producir un pico de flujo térmico que es lo que activa todas las aplicaciones del reactor. El reactor tiene un núcleo de 20 EECC que se fabrican en la ECRI. Al año consume dos núcleos completos, es decir, 40 EECC. Los recambios se hacen cada mes. Para eso, se detiene el reactor y se reemplazan entre 3 y 4 EECC. Hay varias alternativas estudiadas para el recambio. Lo lógico es entrar por afuera llevando los de afuera hacia adentro, que es donde más se queman, y sacar los del medio. Los combustibles son transportados desde la ECRI a Ezeiza. En el edificio hay una sala de EECC frescos que es donde se almacenan y desde allí, en cada recambio, se introducen en el núcleo.

Los EECC gastados van a la pileta de servicios. Hay dos piletas. En una se pueden guardar combustibles gastados hasta 10 años. Y hay que desarrollar una solución para después de esos 10 años. Probablemente, vaya a algún almacenamiento húmedo y después a almacenamiento seco, porque todavía Argentina no tomó la decisión sobre qué va a hacer con los combustibles gastados, si reprocesa o van a disposición final (comunicación personal, 2 de marzo de 2023).

De esta manera, el reactor estará compuesto por:

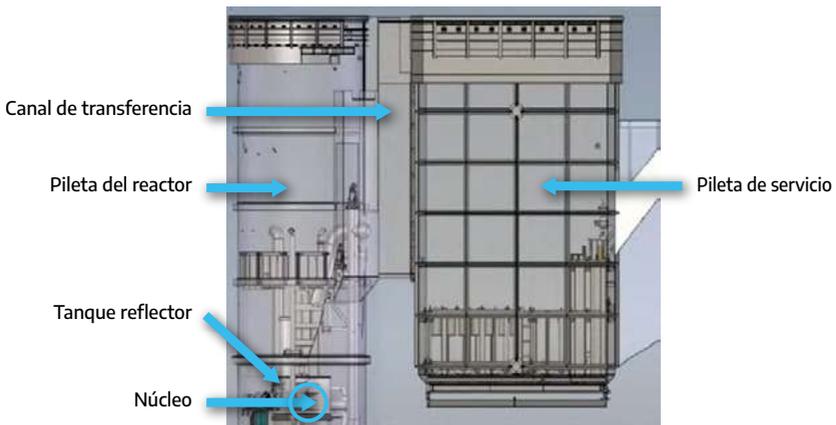
- Una pileta abierta, de 14 m de profundidad y 5 m de diámetro, que permite ver directamente el núcleo y el tanque reflector. De esta manera, se pueden cambiar EECC y acceder, a través de la boca de la pileta, a sus dispositivos experimentales. La pileta se llena con agua para que funcione de barrera entre la radiación y las/os operadoras/es que trabajan en boca de tanque.
- Un tanque, llamado «tanque reflector», que aloja las facilidades de irradiación de elementos combustibles, dopado de silicio, cabezales neumáticos, extracción de haces, además de la facilidad de producción de radioisótopos. Este tanque contiene agua pesada que refleja los neutrones resultantes de la reacción en cadena y es el medio que posibilita su aprovechamiento.
- Un núcleo conformado por una cuadrícula de 25 celdas donde se ubican las facilidades de irradiación y se disponen los EECC. El objetivo del mismo es producir neutrones que alimenten a las distintas aplicaciones del reactor. En conjunto con el núcleo, también se encuentra el sistema de regulación de reactividad con las placas absorbentes de neutrones que permiten regular la potencia de operación del reactor. En su función de seguridad, cuando se detecta

una condición anormal, permiten realizar un apagado rápido del reactor al insertarlas en forma instantánea dentro del núcleo.

- Sistemas de refrigeración que garantizan la operación segura del reactor: del circuito primario, para retirar el calor del núcleo; de piletas, que garantiza la refrigeración de los dispositivos experimentales; y del secundario, que garantiza la extracción de calor de estos hacia el ambiente (Proyecto Vectores, 2021).

En la Figura 5, puede observarse un esquema del reactor. En su zona inferior están el núcleo y el tanque del reflector. La columna de agua que está sobre la pileta sirve para proveer refrigeración y blindaje, y que el personal pueda trabajar en la zona de boca de tanque. Que esté abierto significa que, desde la boca de tanque y con distintas herramientas, se puede intervenir en los combustibles o en las posiciones de irradiación.

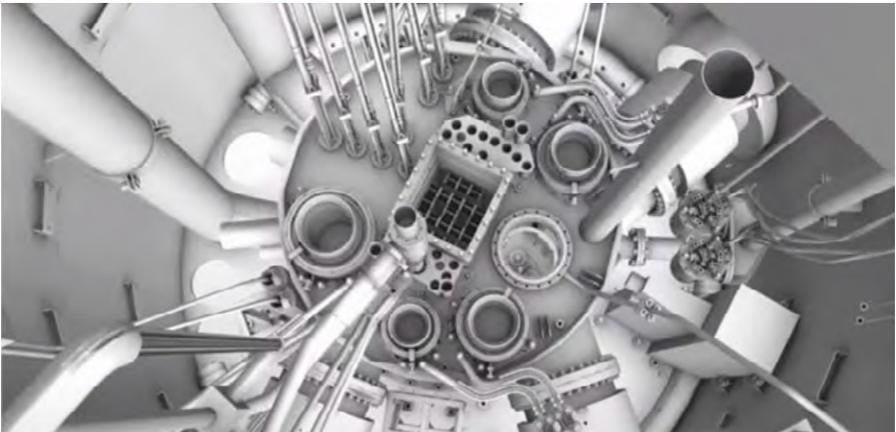
Figura 5. Esquema del RA-10



Fuente: ilustración provista por la Gerencia del Proyecto RA-10 de la CNEA

Luego, en la Figura 6, se plasma el componente crítico del RA-10 que es el tanque del reflector. Este tiene, aproximadamente, 1 m de altura y 2 m de diámetro. Está lleno de agua pesada, la cual cumple la función de moderador. El núcleo del reactor está en el centro y es una grilla de 25 posiciones donde se colocan los EECC rodeados de este tanque, lo que hace que se produzcan allí grandes volúmenes de flujo de neutrones, que es lo que se utiliza para lograr las aplicaciones citadas anteriormente.

Figura 6. Tanque del reflector



Fuente: ilustración provista por la Gerencia del Proyecto RA-10 de la CNEA

La seguridad integral de la planta es supervisada por el Sistema de Protección del Reactor, diseñado y fabricado íntegramente en la CNEA con un diseño innovador y tecnología de punta.

Sobre las diferencias con el reactor OPAL de Australia, el Ing. Blaumann declara:

La potencia es un 50 % mayor que la del OPAL. Tiene facilidades de irradiación internas al núcleo que el reactor australiano no tiene. Acá hubo un requerimiento del área de materiales para poder trabajar en la irradiación de materiales y para eso se requerían flujos rápidos elevados, y eso se logra en el núcleo del reactor. Este pedido se debe a que acá hay comunidades que trabajan en la irradiación de materiales y combustibles. Entonces, esto se presenta también como una manera de brindarles un nuevo horizonte, un nuevo objetivo, redinamizando esos sectores. Hay dos diferencias importantes, la potencia, las posiciones de irradiación internas del núcleo, y una posición para irradiar barras combustibles, que el OPAL no tiene. Después hay otras cuestiones más específicas que tienen que ver con las barras de control, con los sistemas de parada, etc. También hay lecciones aprendidas del OPAL, de muchos años, a través de INVAP o del intercambio con la gente de Australia, o de una revisión de parte de CNEA, etc. Hay cambios en los sistemas de refrigeración. Nosotros le hemos llamado, desde el comienzo, un «reactor de referencia» (comunicación personal, 2 de marzo de 2023).

2.1 Aplicaciones principales del complejo RA-10

La denominación «reactor multipropósito» responde a las diversas aplicaciones que serán posibles una vez que el reactor se encuentre en operaciones. Desarrollamos cada una de ellas a continuación.

2.1.1 Aplicaciones médicas

Como se describió, la CNEA cuenta con más de 50 años de producción y distribución de radioisótopos utilizados en aplicaciones para la salud. Estos son producidos, en la actualidad, por el reactor RA-3. La producción de estos radioisótopos no solamente contribuirá con el abastecimiento total

del mercado nacional, sino que el RA-10, junto a la nueva PPRF, estará en condiciones de producir un volumen anual exportable por más de USD 90 millones. En efecto, existe un mercado accesible para el molibdeno 99 que es fragmentado geográficamente y tiene fuertes interrupciones en el suministro. Dentro de este contexto, la Argentina puede ocupar alrededor del 20 % de un mercado actual valorado en USD 300 millones anuales con la venta semanal de 2000 Ci-6d de este radioisótopo (Proyecto Vectores, 2021).

2.1.2 Aplicaciones en ciencia y tecnología

En el mundo de hoy, las técnicas neutrónicas se encuentran entre las herramientas principales para investigaciones y desarrollos en ciencias de materiales, biología y bioquímica. Mediante estas técnicas, es posible estudiar la dinámica y estructura de la materia inanimada y animada, desde las vibraciones de átomos individuales de hidrógeno hasta el plegado de proteínas, desde las altas temperaturas y presiones del núcleo terrestre hasta las bajas temperaturas y altos campos magnéticos en el estudio de la superconductividad (Proyecto Vectores, 2021). En este sentido el reactor RA-10 junto con el LAHN (que analizaremos en el apartado 4.2) brindarán a la ciencia y a la tecnología instrumentos de primer nivel para estos desarrollos.

2.1.3 Aplicaciones industriales y en TIC

Entre las principales aplicaciones industriales sobresalen dos: el silicio dopado y el iridio industrial. El primero representa una materia prima de altísima calidad para el desarrollo de aplicaciones electrónicas avanzadas y microelectrónica (teléfonos celulares, tarjetas de microchip, computadoras, etc.). Además, se utiliza en equipos de alta potencia como trenes, automóviles

híbridos y eléctricos. El método de dopado de silicio por transmutación neutrónica que utilizará el RA-10 es una técnica superior que produce una alta resistividad final, homogeneidad y control de calidad, comparado con el método químico tradicional. Este producto influirá en el desarrollo de la industria nacional y la exportación de productos industriales, ya que el mercado internacional de venta de lingotes de silicio dopado vislumbra un gran crecimiento, y dentro del cual el RA-10 podría producir entre 30 y 60 tn de lingotes, y obtener ventas por aproximadamente USD 6 millones, lo que representaría el 40 % del mercado mundial actual (Proyecto Vectores, 2021).

Por su parte, el iridio industrial es utilizado como materia prima para radiografías con rayos gamma donde, por medio de un haz enfocado hacia el blanco, se testean elementos de forma no destructiva y muchas veces en el sitio donde se encuentran instalados. Ejemplos de esto pueden ser soldaduras estructurales en tuberías y contenedores de alta presión (Proyecto Vectores, 2021).

2.1.4 Aplicaciones en tecnología nuclear

El LEMI permitirá estudiar el comportamiento de materiales nucleares, a la vez que ampliará las capacidades de producir y calificar nuevos combustibles y componentes para futuros reactores experimentales y de potencia.

El *loop* consiste en un dispositivo donde se evalúan, validan y califican combustibles para centrales nucleares de potencia, bajo condiciones neutrónicas y termohidráulicas similares a las que serán sometidos en su uso real. Las barras combustibles de centrales nucleares y diferentes materiales estructurales pueden ser puestas a prueba en esta instalación para analizar su envejecimiento y las consecuencias ante cambios de

potencia. Con esta facilidad, podrán ser calificados nuevos desarrollos de combustibles nucleares, dado que el reactor cuenta con capacidad de ensayos de acumulación de quemado y rampas de potencia (Proyecto Vectores, 2021).

2.1.5 Aplicaciones en la industria alimenticia

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), en asociación con la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), está apoyando los últimos avances en los campos de la irradiación de alimentos y fitosanitarios a fin de ayudar a agilizar el proceso de control de plagas y facilitar el comercio internacional. Se trata de tratamientos poscosecha que utilizan radiación ionizante producida por una fuente, como el cobalto-60, o generada por aceleradores (Organismo Internacional de Energía Atómica [OIEA], 2022).

La irradiación de alimentos es un método de conservación similar a otros, especialmente a los que utilizan calor, ya que tiene un efecto biocida. Este consiste en exponer el alimento a radiaciones ionizantes durante un período de tiempo determinado, proporcional a la cantidad de energía que se desea que el alimento absorba. Estas radiaciones ionizantes actúan sobre la materia y dan lugar a dos procesos básicos: el proceso *primario* o *directo* provoca la formación de iones, moléculas excitadas o fragmentos moleculares. El proceso *secundario* o *indirecto* implica la interacción de los productos del proceso primario y puede conducir a la formación de compuestos diferentes de los presentes inicialmente.

El efecto biocida de esta irradiación se debe a los daños en el ADN en replicación. Los principales objetivos de la irradiación de alimentos son controlar organismos indeseables (bacterias, hongos, parásitos e insectos),

interferir en procesos fisiológicos que causan deterioro y modificar propiedades tecnológicas.

En el CAE funciona, desde 1970, una instalación semiindustrial que utiliza cobalto-60 para la irradiación (Narvaiz, 2009).

2.1.6 Aplicaciones en la industria cultural

Los métodos de ensayos no destructivos para el estudio de bienes culturales son técnicas basadas en principios físicos que permiten obtener resultados para establecer un diagnóstico del estado o calidad del objeto inspeccionado sin alterar sus condiciones de uso o aptitud en servicio. Estos métodos permiten detectar y evaluar discontinuidades o propiedades de los materiales.

Algunos métodos tradicionales específicos, como la radiografía industrial, se utilizan en el análisis de patrimonios culturales, pinturas, esculturas y obras arquitectónicas. Además, se aplican otros métodos, como la termografía infrarroja, el georadar y la reflectografía para la evaluación no destructiva de obras de arte.

Estos ensayos son una herramienta complementaria utilizada por especialistas en arte para la investigación y resultan muy útiles para historiadoras/es, restauradoras/es y profesionales dedicadas/os a la conservación del patrimonio cultural, ya que permiten examinar detalles específicos. Ayudan a determinar el origen, la ubicación histórica y, en algunos casos, confirmar o descartar la atribución de una obra de arte. Los resultados obtenidos forman parte de los registros históricos que posteriormente se utilizan como documentos. La CNEA dispone de equipos

de última generación y personal capacitado para llevar a cabo estos estudios (Obrutzky, 2009).

La Planta de Producción de Elementos Combustibles para Reactores de Investigación (ECRI)

La ECRI es una instalación nuclear clase I-ARN que opera desde la década de 1960 en el CAC. Allí se diseñan y fabrican los elementos combustibles, blancos de irradiación y otros dispositivos para reactores de investigación. La capacidad actual de producción de la planta es de 45 EECC o 2700 blancos de irradiación. Sobre los orígenes de la planta, el jefe de Instalación y de Departamento ECRI, Daniel Podestá detalla:

La planta es una instalación que se origina en los años sesenta, a partir de fabricar los EECC para el reactor RA-3 con uranio altamente enriquecido al 90 % de uranio 235. Son combustibles tipo placa, donde el uranio está confinado en una vaina de aleación de aluminio. Durante la década del ochenta, se desarrolló la tecnología necesaria para trabajar con uranio de bajo enriquecimiento (menor a 20 % de uranio 235). Después de ese hito, el grupo fue creciendo y tomando mayor envergadura a partir de que la CNEA, junto a INVAP, comienza con la construcción y exportación de reactores de investigación y de producción de radioisótopos al mundo.

Se inició con el proyecto Perú que implicó la producción de los EECC para el reactor RP-0, cuyos elementos combustibles también podían ser utilizados para el reactor RP-10. Después de 35 años de haber puesto crítico el reactor

peruano, en 2016, a través de un acuerdo entre OIEA, INVAP Y CNEA-ECRI se fabricó el nuevo núcleo combustible para el reactor RP-10.

En 1991, se reemplazó el núcleo combustible del reactor argentino RA-3 por uranio de bajo enriquecimiento para responder a las preocupaciones internacionales sobre la proliferación en el marco del proyecto ECBE [elementos combustibles de bajo enriquecimiento]. Esto fue parte de un programa de reducción de uranio enriquecido del 90 % al 20 % de uranio 235. Más tarde, en 2007, se fabricaron los EECC con uranio de bajo enriquecimiento para el reactor argentino RA-6 en el marco del proyecto UBERA 6 y hoy, 2023, estamos fabricando los EECC para el reactor multipropósito RA-10 (comunicación personal, 3 de noviembre de 2022).

La Ley 24.804 de la Actividad Nuclear establece que la ARN tiene la función de regular la actividad en lo referente a temas de seguridad radiológica y nuclear, protección física, salvaguardias y no proliferación, y le otorga la facultad de dictar normas, de cumplimientos obligatorios, que como instalación debe cumplir. El personal que desarrolla sus tareas en la planta también tiene que tener una licencia individual y una autorización específica, otorgadas por la ARN, para poder trabajar. La instalación está certificada bajo la norma ISO 9001:2015, lo que permite aumentar la eficiencia al tener un sistema de gestión de la calidad basado en la mejora continua. La ECRI realiza exportaciones de blancos de irradiación a Australia y otros países del mundo.

Desde 1985, la CNEA produce el radioisótopo molibdeno 99 a través de blancos de irradiación con uranio enriquecido al 90 % de uranio 235. Durante 1991, se produjo el reemplazo del núcleo combustible del reactor RA-3 que pasó a utilizar uranio de bajo enriquecimiento (LEU, por su sigla

en inglés) para cumplir con las normas internacionales sobre proliferación nuclear. Sobre este hito fundamental, Podestá amplía:

En el caso de los blancos de irradiación, vale remarcarlo, todo el desarrollo se hizo en la instalación CNEA-ECRI. Cuando Argentina firma, en los noventa, el Tratado de No Proliferación de Armas Nucleares, fue también tenido en cuenta para la fabricación de los blancos de irradiación. A partir de 2000, Argentina fue el primer país en el mundo en fabricar blancos de irradiación por fisión para la producción de molibdeno 99 e yodo 131 con uranio de bajo enriquecimiento. Por este motivo, en el marco de la Cumbre de la Industria Nuclear 2016, la CNEA recibió el Premio a la Innovación Industrial por el desarrollo de la tecnología para el uso de uranio de bajo enriquecimiento en blancos de irradiación de molibdeno 99 (comunicación personal, 3 de noviembre de 2022).

Este avance implicó la realización de cambios en los procesos de separación y purificación de las instalaciones. En 2002, finalmente, comenzó la producción comercial de molibdeno 99 con blancos de irradiación de LEU. Vale aclarar que todo este proyecto se llevó a cabo sin apoyo externo. Esta experiencia se ha presentado en el ámbito internacional como prueba de su factibilidad técnica y económica⁸. Además, sirvió para vender blancos de irradiación a entidades extranjeras como la Organización Australiana de Ciencia Nuclear y Tecnología, a la Autoridad de Energía Atómica de Egipto y transferencia de tecnología de EECC. Podestá fue uno de los protagonistas de la transferencia de tecnología a Egipto y así la describe:

8 Varios ejemplos incluyen un estudio de 2009 encargado por el Congreso de los Estados Unidos («Producción de isótopos médicos sin uranio altamente enriquecido»); las publicaciones del Grupo de Alto Nivel sobre la Seguridad del Suministro de Radioisótopos Médicos, una iniciativa que abarca temas sobre el suministro global y también sobre la conversión a blancos de LEU para la producción de radioisótopos por fisión; y el programa del Departamento de Energía de Estados Unidos, también conocido como «Enriquecimiento Reducido para Reactores de Investigación y de Ensayo» (<https://www.argentina.gob.ar/cnea/tecnologia-nuclear/combustiblesnucleares/para-reactores-de-investigacion>).

En 1997, fuimos parte de la asistencia técnica para la puesta en marcha de la Fuel Manufacturing Pilot Plant (FMPP) en la ciudad de El Cairo, Egipto, junto con el personal técnico-profesional de INVAP. Allí hicimos todos los estudios preoperacionales de los equipos, se puso en marcha la planta y también se fue capacitando al personal egipcio. Fue un trabajo en etapas que llevo casi nueve meses (comunicación personal, 3 de noviembre de 2022).

Hasta 2019, las actividades de la ECRI se concentraban en la transferencia de tecnología a Argelia para la implementación de una instalación de producción de EECC y blancos de irradiación, además de garantizar la provisión de blancos de irradiación al reactor australiano OPAL y al reactor argentino RA-3.

3.1 Desarrollos en la ECRI

La ECRI, además, hace tareas de desarrollos para validar el diseño, según especificaciones técnicas, de nuevos EECC. Al momento de la confección de este trabajo se está iniciando un desarrollo para buscar alternativas en el cambio de las vainas de aleación de aluminio para las placas combustibles y también para blancos de irradiación que permita en un futuro pasar de una vaina de aleación de aluminio AA 6061 a una de AA 5754.

El blanco de irradiación es una placa plana constituida por un núcleo combustible de aluminuro de uranio disperso en aluminio, UAl_2-Al , en una vaina de aleación de aluminio AA 6061. Fabricado el blanco, esta placa plana se irradia en el reactor RA-3. Ahí permanece alrededor de cinco días hasta alcanzar un grado de quemado de alrededor del 4 %. Luego, se transporta a la PPRF donde se realiza el proceso descrito en el apartado 1.2.

Todos los insumos utilizados por la ECRI son nacionales, excepto el uranio enriquecido al 20 % que es importado. Esto se debe a que la Argentina no enriquece uranio a escala industrial y lo debe adquirir a los países que lo producen. Para el caso de los productos que exportamos, el uranio es un bien del cliente.

El proceso de producción para la producción de blancos de irradiación o EECC se inicia con el procesamiento del uranio para obtener un polvo combustible. En palabras de Podestá,

Se inicia a partir de un proceso de fundición para obtener una aleación que para un elemento combustible es un lingote de U_3Si_2 (siliciuro) y para un blanco de irradiación es un lingote de U_3Al_2 (aluminuro). Luego, este lingote es molido para obtener un polvo combustible que después se mezcla con polvo de aluminio para obtener un compacto. Estos compactos poseen distintas densidades de uranio según su uso, por ejemplo: una placa combustible de U_3Al_2 -Al (aluminuro) tiene una densidad de 1,7 g de uranio por cm^3 ; si la placa es de U_3O_8 -Al, la densidad es de 2,8 g de uranio por cm^3 , y si es con silicio U_3Si_2 -Al (siliciuro), la densidad alcanza los 4,8 g de uranio por cm^3 . También se está desarrollando un nuevo compuesto con molibdeno UMo-Al que alcanzaría los 7 g de uranio por cm^3 . En el caso de los blancos de irradiación, se utiliza un súper aluminuro $UxAl_y$, ya que su densidad alcanza los 2,5 g de uranio por cm^3 para la obtención de molibdeno 99 por fisión (comunicación personal, 3 de noviembre de 2022).

Para los reactores de mayor potencia, es necesario obtener una mayor densidad de uranio en el núcleo combustible, con el fin de obtener una mayor producción de neutrones. En el caso de los EECC del RA-10, el núcleo está constituido por 19 elementos combustibles y cada elemento combustible contiene 21 placas combustibles con una densidad de

uranio de $4,8 \text{ g U/cm}^3$. La fabricación de los EECC para el RA-10 implica primero producir 65, de los cuales 25 son *dummies* que se utilizan en la puesta en marcha en frío del reactor, y luego 40, ya sí con uranio, para la puesta en crítico del reactor.

Una vez obtenido el compacto, se utiliza la técnica de enmarcado que consiste en poner este compacto dentro de un marco y luego cerrarlo con dos tapas. Ese conjunto se suelda en su perímetro con soldadura TIG. Vale aclarar que estos componentes, marco y tapa son de una aleación de aluminio 6061, que luego constituirá la vaina de la placa combustible.

La fabricación de la placa combustible lleva una secuencia de laminación en caliente y frío que son una cantidad de pasos de laminación donde se reduce su espesor entre un 80 % y un 85 %. Se inicia con un espesor de conjunto aproximado de 12 mm y se alcanzan espesores finales, según el tipo de placas, de entre 1,5 mm y 1,7 mm.

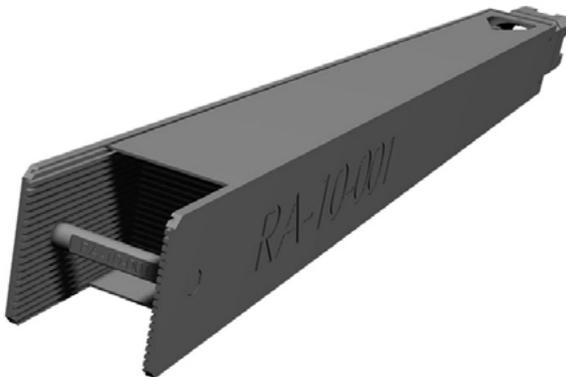
En las figuras 7 y 8 se muestran los EECC de los reactores RA-6 y RA-10, respectivamente. Luego, en la Figura 9, se observa un blanco de irradiación del reactor RA-3.

Figura 7. EECC del reactor RA-6



Fuente: CNEA (2019)

Figura 8. EECC del reactor RA-10



Fuente: CNEA (2019)

Figura 9. Blanco de irradiación del reactor RA-3



Fuente: CNEA (2019)

Por otro lado, en las siguientes imágenes se observan distintas instalaciones de la ECRI, a saber, una máquina ensambladora de EECC (Figura 10), una maquina laminadora de placas y EECC (Figura 11) y un recinto de caja de guantes para operación de materiales (Figura 12).

Figura 10. Máquina ensambladora de EECC



Fuente: imagen provista por la Planta de Elementos Combustibles para Reactores de Investigación (ECRI)

Figura 11. Máquina laminadora de placas y EECC



Fuente: imagen provista por la Planta de Elementos Combustibles para Reactores de Investigación (ECRI)

Figura 12. Recinto de caja de guantes



Fuente: imagen provista por la Planta de Elementos Combustibles para Reactores de Investigación (ECRI)

3.2 Necesidad de una nueva planta de fabricación de EECC y de blancos de irradiación (PIECRI)

El proyecto del RA-10 plantea la necesidad de la construcción de una nueva planta de industrial de fabricación de elementos combustibles para reactores de investigación y de blancos de irradiación, denominada «PIECRI», de manera de integrarse a las instalaciones actuales y asegurar la provisión nacional de estos productos para el creciente mercado nacional. Con esa nueva instalación, se lograría incrementar el ingreso de divisas mediante la exportación de EECC y de blancos de irradiación.

Esto permitiría, además, fortalecer y capitalizar las tecnologías ya desarrolladas y en desarrollo por la CNEA, y reforzar su conocimiento científico y tecnológico en el área de combustibles nucleares para uso pacífico. Asimismo, se busca contribuir a las políticas sectoriales y a los requerimientos nacionales en términos de desarrollo tecnológico de vanguardia, especialmente en relación con el creciente uso de radiofármacos en la medicina nuclear.

La planta PIECRI permitiría alcanzar una producción anual de 150 EECC o su equivalente de 9000 blancos de irradiación. La planta existente podría encargarse de desarrollar nuevas tecnologías de fabricación, producir EECC y blancos de irradiación a pequeña escala, y transferir tecnología a la nueva planta.

Este esquema de funcionamiento permitiría a la CNEA aumentar su capacidad de producción y satisfacer tanto la demanda actual como retomar las líneas de investigación y desarrollo que han posicionado a la institución como referente mundial en el campo nuclear. Otro beneficio destacado es mantener su estatus como proveedor líder de blancos de irradiación de

bajo enriquecimiento y expandirse en el mercado internacional de EECC tipo MTR, y aprovechar las necesidades de los países que buscan satisfacer la demanda de insumos para medicina nuclear.

4

Innovaciones en el proyecto: el Laboratorio Argentino de Haces de Neutrones (LAHN)

4.1 Antecedentes: el Proyecto LATIN

Los antecedentes del LAHN se originan en un proyecto del Dr. Rolando Granada que fue presentado en junio de 1987: el Laboratorio de Técnicas de Investigación Neutrónicas (LATIN). Se trataba de una propuesta para utilizar los haces de neutrones del reactor RA-9 para investigación básica y aplicada en las áreas de física de materia condensada y ciencia de materiales.

El proyecto preveía la posibilidad de extraer del RA-9 haces de neutrones para investigación, es decir que se trató de una propuesta de materialización de esas potencialidades como una contribución al desarrollo científico-tecnológico argentino.

Sobre los orígenes de LATIN, el Dr. Granada afirma:

Habíamos escrito una propuesta para crear ese laboratorio con la idea de que, detrás de ese acrónimo, pudiéramos imaginar a ese laboratorio como abierto para la utilización de toda la región latinoamericana. Pero la historia siguió, el RA-9 nunca se construyó en Argentina e INVAP luego construiría

uno similar en Egipto denominado «ETTR» (comunicación personal, 25 de noviembre de 2022).

Para una mejor comprensión de estas técnicas, es útil repasar los fundamentos del proyecto citado. En los años ochenta, existía una relativa inaccesibilidad de fuentes de neutrones y las que existían en ese momento solo proveían haces débiles. El empleo de estas técnicas se había iniciado como una actividad suplementaria de los reactores nucleares diseñados para operar como facilidades de irradiación o bancos de prueba para el desarrollo de tecnología nuclear. Durante las décadas de 1950 y 1960, solo existió un grupo reducido de científicos de esa disciplina. Debido a su momento magnético dipolar intrínseco, los neutrones permiten estudiar propiedades magnéticas y fenómenos de *spin* (Granada, 1987). Estas técnicas tendrían un fuerte impulso en la década de 1970. Volveremos sobre estas técnicas en el apartado 4.3.

Respecto de las posibilidades que se abrían a partir de este proyecto, una de las más importantes fue la de impulsar una fuerte interacción entre investigación básica y aplicada a través de la participación y el empleo conjunto de las facilidades del laboratorio.

En esos años, existían otras fuentes de neutrones en el país. Entre ellas, podrían citarse tres: el Acelerador Lineal de Electrones (LINAC), el reactor RA-3 y el reactor RA-6. El LINAC, situado en el CAB, producía haces pulsados de neutrones a través de reacciones en los núcleos constituyentes de un blanco pesado. Este acelerador era utilizado para la determinación de espectros y secciones eficaces totales sobre el rango térmico de energías, mediante el empleo de técnicas de tiempo de vuelo. Además, la instalación de un difractómetro posibilitaba la realización de estudios estructurales en policristales.

El reactor RA-3, situado en el CAE, es empleado como fuente de neutrones para la producción de radioisótopos y para experimentos de irradiación y prueba de materiales.

Por su parte, el reactor RA-6, situado en el CAB, posee un núcleo de configuración variable y tubos de extracción de haces de neutrones. Es utilizado en tareas de capacitación y entrenamiento, y como fuente de neutrones para la realización de experimentos de análisis por activación e irradiaciones de diversa índole.

Finalmente, ni el proyecto del RA-9 ni el LATIN tuvieron continuidad. Allí, entonces, quedaron los antecedentes del LAHN.

Ahora bien, la pregunta es: ¿por qué neutrones? El Dr. Granada lo explica:

Los neutrones tienen propiedades únicas comparados con otras partículas o formas de radiación que se emplean para estudiar la naturaleza en general. Por ejemplo, se usa rayos X o radiación gamma para estudiar propiedades fundamentalmente estructurales de los materiales. Los neutrones interactúan directamente con los núcleos de la materia, no con las nubes electrónicas de los átomos, porque lo hacen a través de la fuerza nuclear. También los neutrones pueden interactuar magnéticamente con los electrones no apareados en la materia. Esto es posible porque tienen lo que llamamos «espín», un momento nuclear intrínseco que es capaz de acoplarse con los campos magnéticos que puedan existir en la materia, lo cual permite estudiar el magnetismo de manera directa. Muchos dispositivos actuales, como los de almacenamiento de datos, no hubieran sido posibles sin el uso de neutrones y porque a diferencia de los rayos X, que estudian las estructuras de los materiales, permiten estudiar también la dinámica, es decir, cómo se mueven los átomos. Hablar de estructuras quiere decir estudiar cómo están

distribuidos los átomos en diferentes sistemas. Pero la dinámica permite ver cómo se mueven esos átomos, esos núcleos.

Los neutrones penetran profundamente en la materia y eso tiene ventajas prácticas para la investigación, porque en muchos casos se requiere estudiar procesos, fenómenos, interacciones que ocurren en los materiales bajo ciertas condiciones muy complejas, por ejemplo, a presiones muy altas. «Presiones muy altas» significa que se tiene que poner una muestra dentro de un entorno muy especial como, por ejemplo, una celda de presión. Los neutrones pueden hacerlo porque son capaces de atravesar las paredes de esa celda, interactuar con la muestra y extraer la información. Eso no se puede hacer con rayos X ni con ninguna otra forma de radiación.

Otra característica particular de los neutrones es que son capaces de «ver» a los núcleos de los elementos con una intensidad que no se correlaciona con el número atómico, como ocurre en el caso de los rayos X que ven con más intensidad la dispersión producida por átomos de número atómico más alto, porque tienen más electrones que dispersan a los rayos X de manera proporcional al cuadrado de la carga. Por esto, los rayos X prácticamente no ven a los átomos livianos y sí ven con gran intensidad los átomos de los elementos pesados. En el caso de los neutrones, no existe una correlación de ese tipo. Y esto tiene enorme importancia, por ejemplo, para la biología, porque pueden detectar con alta precisión y selectividad al hidrógeno, al carbono, al nitrógeno, al oxígeno, es decir, todos elementos livianos y característicos de los sistemas biológicos (comunicación personal, 25 de noviembre de 2022).

4.2 Características del LAHN

Como se aclaró en el apartado 2, el RA-10 es un reactor multipropósito, cuyos tres ejes principales son

- la producción de radioisótopos;
- el estudio de materiales y combustibles nucleares desde el punto de vista del daño por radiación y quemado, ya que la Argentina necesita la posibilidad de estudiar quemados de nuevos combustibles que se vayan desarrollando; y
- la utilización de sus haces de neutrones, térmicos y fríos, para investigación y desarrollo.

En este último eje se inserta el LAHN.

Granada explica, a continuación, las ventajas de un nuevo reactor como el RA-10 para la generación de haces de neutrones y la importancia del LAHN:

No todos los reactores emiten haces de neutrones, pero, por ejemplo, el RA-3 y el RA-6 tienen haces. En general, son haces o tubos que están mirando al núcleo mismo del reactor. Pero esto es altamente inconveniente, porque así se extraen neutrones térmicos, pero también rápidos y radiación gamma. Todo viene por el mismo tubo. Los reactores modernos, solo aquellos que han sido específicamente diseñados para extraer haces para investigación, no tienen haces radiales, es decir, haces que apuntan al núcleo, sino que son todos tangenciales al núcleo. Si uno mira el corte de lo que es el reactor RA-10, puede ver que ninguno de los tubos de extracción de haces mira al núcleo, sino que miran a una zona donde existe el agua pesada, que es el reflector moderador o la fuente fría. Entonces, tales haces contendrán los neutrones térmicos o los neutrones fríos, respectivamente.

En este momento se está construyendo la Fuente Europea de Espalación, que es una fuente de pulsada basada en una reacción nuclear que utiliza un acelerador de donde salen los neutrones. El costo de esa fuente es del orden de los 3000 millones de euros aproximadamente y han convergido diferentes países europeos para ese proyecto. Y realizan esos niveles de inversiones, porque, evidentemente, les reditúa en el mantenimiento de una condición de liderazgo tecnológico de Europa (comunicación personal, 25 de noviembre de 2022).

Por su parte, Blaumann amplía sobre la importancia de este laboratorio para la comunidad científica:

El LAHN es necesario para una comunidad científica que busca herramientas nuevas como son las técnicas neutrónicas. Esa comunidad hoy va a otros reactores del mundo. Y tampoco es que existan tantas de estas facilidades. Muchos reactores de este tipo se están cerrando en el hemisferio sur. Solo existe el OPAL en Australia. Y la intención aquí es brindar ese servicio internamente, pero también a nivel regional y a nivel mundial. Es decir, contar con una instalación como la que Argentina ha provisto a otros países, como Australia, que son instalaciones de clase mundial (comunicación personal, 2 de marzo de 2023).

El LAHN es una infraestructura que formará parte del complejo del RA-10 y permitirá que el sistema científico argentino cuente con modernas tecnologías destinadas a estudiar la estructura de los materiales. En este sentido, será la primera en su tipo en América Latina.

El RA-10 tendrá aberturas alrededor de su núcleo a través de las cuales se producirá un escape controlado de neutrones. Se trata de un esquema de

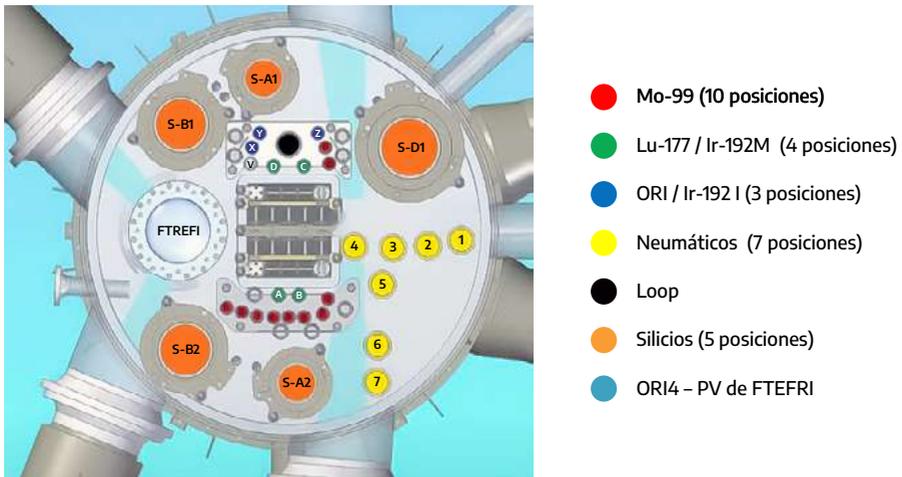
8 canales para la extracción de haces de neutrones, 4 térmicos y 4 fríos que estarán mirando a la fuente fría de deuterio líquido.

En esta instalación, los haces de neutrones serán optimizados, transformados y dirigidos hacia instrumentos diseñados para estudios en ciencia de la información y las comunicaciones, problemáticas medioambientales, patrimonios culturales, ciencias de la vida y la salud, y energía.

En la Figura 13, se presenta un esquema de los componentes internos del tanque del reflector del RA-10 que permiten que se logren todas las aplicaciones previstas. En el centro, en color gris, se encuentra la grilla del núcleo. Los círculos amarillos representan las barras de control, que son de hafnio, y se insertan para absorber neutrones y controlar la potencia del reactor. También se observan las posiciones para irradiación de blancos para producir, por ejemplo, molibdeno 99 (círculos rojos), lutecio 177 (círculos verdes) o iridio 192 (círculos azules). Finalmente, los círculos color naranja son posiciones para irradiar y dopar silicio, y el círculo negro es la posición para irradiar EECC para reactores de potencia.

Luego, hay una fuente fría (círculo blanco en el centro a la izquierda) que es un volumen de 18 litros de deuterio líquido, el cual se mantiene enfriado a 25 K (grados Kelvin) gracias a un sistema criogénico que baja la temperatura de los neutrones. Los neutrones que están en la zona del tanque del reflector son neutrones térmicos (25 K de energía). La fuente fría los baja dos o tres órdenes de magnitud para que, por los conductos (grises y blancos que salen en varias direcciones) salgan haces de neutrones, cuyo comportamiento como onda permite que se puedan hacer experimentos de difracción, entre otros.

Figura 13. Componentes internos del tanque del reflector



Fuente: ilustración provista por la Gerencia del Proyecto RA-10 de la CNEA

En cuanto a los instrumentos con los que contará el LAHN para llevar adelante sus investigaciones, entre 2017 y 2021 fue convocada la comunidad científica regional y se documentaron las necesidades e intereses vinculados al uso de técnicas neutrónicas para un amplio abanico de temas científicos. Esta actividad se reflejó en documentos llamados *Casos científicos*⁹, en función de los cuales se definieron y proyectaron los primeros instrumentos del laboratorio.

- INSTRUMENTO DE REFLECTOMETRÍA CON NEUTRONES POLARIZADOS: mediante este, se puede obtener información sobre perfiles de concentración, composición y magnetización de regiones en las cuales cambian las propiedades de un material en films y estructuras

9 Estos documentos se hallan disponibles en <https://www.lahn.cnea.gov.ar/index.php/instrumentacion> (recuperado el 7 de agosto de 2023).

laminares, con impacto en un amplio rango de aplicaciones científicas y tecnológicas.

- INSTRUMENTO DE DIFRACCIÓN DE MONOCRISTAL: su accionar es relevante para el avance del conocimiento en diversas áreas de la ciencia como química, física, ciencia de materiales, geología, biología y otras, gracias a la disponibilidad de datos estructurales de alta precisión que se obtienen utilizando técnicas de difracción de rayos X y neutrones; y a la vez permite la determinación precisa de las posiciones atómicas en una amplia variedad de sólidos cristalinos.
- INSTRUMENTO DE DISPERSIÓN DE NEUTRONES A BAJO ÁNGULO (SANS): cubre una amplia gama de temas actuales tanto en el área de ciencia de materiales como en materia condensada, física del sólido, materia blanda y biofísica-química.
- INSTRUMENTO DE DIFRACCIÓN DE POLVOS DE ALTA RESOLUCIÓN: las técnicas de difracción y análisis cristalográfico son herramientas indispensables en disciplinas como ciencia de materiales, física y química de la materia condensada, geología, desarrollo y control de medicamentos, biología estructural, tecnología de alimentos, entre otras.
- INSTRUMENTO DE ESPECTROMETRÍA DE NEUTRONES: el empleo de neutrones permite explorar un amplio rango del espacio de fase «estructura dinámica» en la materia bajo diferentes condiciones físicas.
- ESTACIÓN PARA I&D EN CÁNCER USANDO HACES DE NEUTRONES TÉRMICOS (BNCT): la interacción de los neutrones con estructuras biológicas ha sido un tema de suma importancia histórica en el campo de la biofísica de las radiaciones. En ella, se destaca la terapia por captura neutrónica en boro (*Boron Neutron Capture Therapy* [BNCT]), una modalidad de tratamiento del cáncer que actualmente se encuentra en etapa de ensayo clínico en distintas partes del

mundo, incluida la Argentina. Debido a que la BNCT es en esencia una forma de radioterapia, está indicada para el control local de tumores sólidos, es decir, aquellos tipos de tumores pertenecientes a tejidos del organismo excepto los del sistema circulatorio. El objetivo primordial en BNCT es el de depositar una dosis de radiación altamente localizada en células tumorales para producir un daño selectivo en ellas y, al mismo tiempo, minimizar la dosis entregada al tejido normal presente en el volumen de tratamiento.

- **TOMÓGRAFO DE NEUTRONES** (*Advanced System for Tomography and Radiography* [ASTOR]): la radiografía y tomografía de neutrones es una técnica no destructiva para la obtención de imágenes a partir de la detección de los neutrones que atraviesan una muestra. Se puede aplicar a piezas o partes de piezas de tamaño pequeño y mediano para visualizar, por ejemplo, fracturas, fragmentaciones, porosidad, formación de cavidades y cualquier defecto o proceso embebido dentro de componentes —incluso metálicos— durante diversos experimentos.
- **ESCÁNER DE TENSIONES/DIFRACTÓMETRO MULTIPROPÓSITO** (*Advanced Non-Destructive Evaluation of Stress* [ANDES]): especialmente útil para el estudio de calidad y confiabilidad de soldaduras en piezas complejas, ya sean autopartes, tubos de extracción, piezas de siderurgia, recipientes en reactores nucleares, etc. En producción, estos estudios permiten mejorar la calidad de componentes industriales u optimizar los criterios de diseño en muchas áreas de la ingeniería. Se benefician de ello, particularmente, aquellas industrias donde la seguridad resulta de máxima importancia, como las automotriz, aeronáutica, nuclear y aeroespacial¹⁰.

¹⁰ Para más información, ingresar a <https://www.lahn.cnea.gov.ar/index.php/instrumentacion> (recuperado el 7 de agosto de 2023).

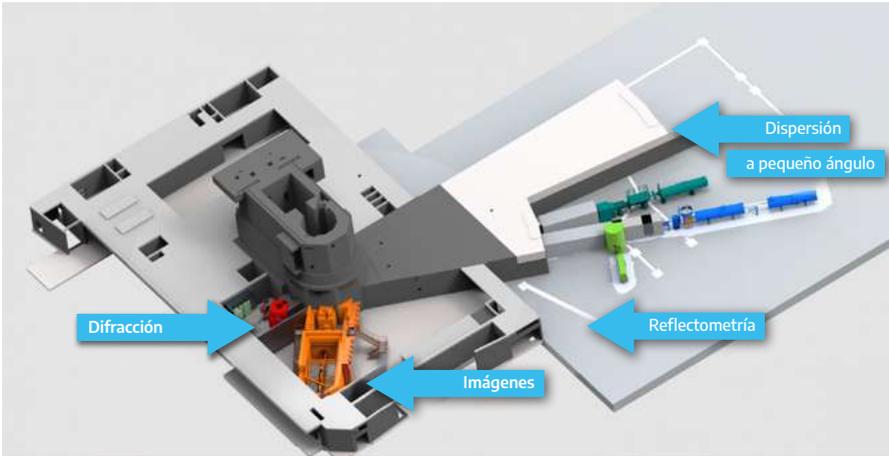
Acerca de las aplicaciones que posibilitará el LAHN, la Dra. Serquis declara:

Por ejemplo, la industria farmacéutica necesita saber los componentes que tienen cada uno de los fármacos. La estructura cristalina de esos fármacos es lo que se patenta. Si uno necesita ver cómo están ordenados los diferentes componentes, esto se consigue con la información de la estructura cristalina. A veces, tener una molécula girada hacia un lado o hacia otro lado hace que un fármaco sea un veneno, o sea un remedio.

También en el estudio de obras de arte donde, por ejemplo, con los pigmentos que tiene una pintura se puede determinar qué tipo de origen tuvo ese pigmento, si es verdadera o falsa, etc.

Puede servir, además, para estudiar desde la aleación con la que se forman las alas de un avión a la aleación que sirve para los componentes de materiales nucleares. El sueño del área metalúrgica es tener técnicas no destructivas para estudiar un material, para poder estudiar sus tensiones, etc. (comunicación personal, 7 de septiembre de 2023).

Figura 14. Esquema del LAHN



Fuente: <https://www.argentina.gob.ar/noticias/el-laboratorio-argentino-de-haces-de-neutrones-se-posicionara-como-el-eje-de-un-polo>

5

Actualidad del Reactor Multipropósito RA-10 y del LAHN

En 2022, la inversión total en el proyecto fue de 265 millones de dólares. Además de garantizar el autoabastecimiento de radioisótopos, se calcula que el RA-10 encontrará un momento de una gran demanda de radioisótopos en el mundo debido a que en 2025 muchos de los reactores en actividad finalizarán su vida útil. De esta manera, la Argentina podría abastecer al 20 % de esa demanda, lo cual podría significar alrededor de USD 50 millones al año de ingresos.

Respecto de este tema, la Dra. Serquis manifiesta:

Esperamos trabajar y empezar a expandir este mercado hacia Brasil, hacia Bolivia, hacia la región, pero también hay tratativas con otros países bastante más lejanos, a pesar de que uno sabe que los tiempos de vida de los radioisótopos hacen que uno tenga que tener muy bien sincronizado desde el momento en que se producen hasta el momento en que se utilizan en su lugar de destino (comunicación personal, 7 de septiembre de 2023).

Ya se encuentran finalizadas la pileta del reactor y la pileta de servicios, las cuales fueron fabricadas por la empresa metalúrgica SECIN S.A.¹¹. La

11 Para más datos sobre SECIN S.A., véase Zappino (2022b).

pileta del reactor alojará los EECC, las barras de control y otros dispositivos, mientras que la pileta de servicios permitirá hacer uso de todas las funcionalidades del reactor.

Otro componente que se encuentra finalizado es el puente grúa de operaciones, que es utilizado sobre la pileta del reactor y que también fue fabricado por la empresa SECIN S.A. Este puente contiene un aparejo de 500 kg con numerosos dispositivos de seguridad, como sensores en las barrevías, de manera que, si un obstáculo se cruza en su camino, el sistema detiene el movimiento en forma instantánea. También existe un sistema de sobrecarga y cable flojo para poder controlar el izaje en caso de un exceso de carga. A esto se agrega un compresor que permite mover una herramienta debajo del agua.

Sobre el futuro trabajo del RA-10, el Ing. Blaumann afirma:

Aquí van a convivir distintas áreas del conocimiento, que van desde la investigación básica, el desarrollo, lo tecnológico, la producción, etc., con una sinergia muy grande entre todas esas áreas. Y eso es un faltante, a veces, en Argentina. El valor agregado se consigue cuando se logra la integración. Lo que hoy es un proyecto estratégico, mañana debe ser un eje estratégico que permita esa calidad de logros (comunicación personal, 2 de marzo de 2023).

Y sobre los plazos de finalización de la obra, a marzo de 2023, asegura:

La obra civil está prácticamente finalizada. Quedan muy pocos frentes que dependen de otros trabajos de montaje y de algunos suministros que están demorados. La etapa final tiene, a medida que progresa el montaje, ensayos preoperacionales, que es donde se testean todos los sistemas y donde se

realiza la recepción provisoria de la obra. Esos ensayos comenzaron en la segunda mitad de 2023 y terminarán más o menos en julio de 2024. Luego, viene una etapa que se llama «de pruebas preliminares» donde se prueban todos los sistemas en forma integrada. La planta tiene que demostrar que todo funciona antes de tener combustible. Y, después de eso, viene la puesta en marcha nuclear. La previsión es que eso comience en noviembre de 2024, para conseguir la criticidad en un mes (comunicación personal, 2 de marzo de 2023).

A su vez, sobre los plazos de obra, la Dra. Serquis manifiesta:

Se espera que para fines de 2023 ya esté avanzada toda la parte de componentes, cuyo principal contratista es INVAP, para todo lo que es integración de componentes, como para tener un comienzo de las pruebas de puesta en marcha a fines de 2024. El tanque reflector, que es uno de los corazones del reactor, que está fabricando INVAP, está pronto a ser terminado (comunicación personal, 7 de septiembre de 2023).

En marzo de 2023, había 80 empresas nacionales participando del proyecto, lo cual involucra a 1500 personas en trabajo directo.

Acerca del futuro del reactor RA-3, el Ing. Blaumann atestigua:

Esa decisión no está tomada. Claramente, el RA-10 lo va a reemplazar en la producción de radioisótopos. Probablemente, el RA-3, con sus capacidades actuales de operación, siga funcionando, por ejemplo, para la parte académica, o sea utilizado por el Instituto Dan Beninson como reactor escuela, y actividades de investigación. Me imagino que lo que es propio de la razón de ser del RA-10 pasará a este reactor y el RA-3 seguirá con su capacidad operativa, como hace el RA-6, que no es un reactor de producción, sino de

investigación. Podría justificarse su continuidad en la operación por ese lado. Va a depender de su capacidad y licencia para seguir funcionando. Y va a depender de la dinámica que le impriman los usuarios, los requerimientos de las carreras de grado y posgrado del sector nuclear, que tienen una demanda importante (comunicación personal, 2 de marzo de 2023).

Por último, sobre la actualidad y el futuro del LAHN la Dra. Serquis declara:

Todos estos centros que permiten las técnicas neutrónicas están en el hemisferio norte, concentrados en Europa, en Estados Unidos, en Japón, excepto el de Australia, que está hecho en el reactor OPAL que fabricó INVAP. Y en el hemisferio sur no hay ningún otro. El LAHN será el primero en el hemisferio sur, complementario al sincrotrón que tiene Brasil en Campinas (en el que se desarrollan las técnicas de análisis de materiales utilizando haces de radiación de distintas energías en lugar de neutrones). Estamos trabajando para que el LAHN tenga un convenio con el Ministerio de Ciencia y Tecnología (MINCYT) y que todo el sistema científico tecnológico se vea beneficiado. Además, puede llegar a tener resultados en la industria y en el desarrollo de los instrumentos. Ahora se están instalando instrumentos, algunos de ellos donados por Alemania y que quedaron de los cierres de reactores alemanes. Se analizaron las características que tienen y algunos los estamos diseñando localmente. Y toda esa capacidad también nos brindará capacidad exportadora. Todas estas temáticas permitirán atraer investigadores de distintas universidades, de distintos centros de investigación tanto de Argentina como de otros países de la región. Y esto significará un fuerte valor agregado (comunicación personal, 7 de septiembre de 2023).

A modo de conclusión

Con el complejo RA-10, la Argentina tiene la oportunidad de adquirir una participación del 20 % en el mercado mundial de radioisótopos a través de este proyecto. Además, al vender silicio dopado y probar elementos combustibles de centrales y reactores de otros países, el país podría convertirse en uno de los pocos que controlan esta tecnología y en un proveedor calificado de silicio dopado, un material de alto valor agregado.

El complejo RA-10 también funcionará como una universidad nuclear donde las/os estudiantes podrán realizar investigaciones originales. Esta instalación permitirá formar especialistas en disciplinas nucleares y ciencia de materiales, lo cual dará a la formación nuclear argentina una ventaja significativa sobre lo que ya se ha logrado. Además, no todas/os las/os estudiantes serán argentinas/os, ya que la CNEA ha demostrado su experiencia en formar expertas/os a través de su RA-6 de Bariloche, quienes luego regresan a sus países y se convierten en clientes tecnológicos de INVAP. Este enfoque de becas con el RA-10 puede cambiar el panorama internacional.

Con el reactor nuclear RA-10, la Argentina podrá hacer frente a la creciente demanda de radioisótopos, pues garantizará la capacidad de producción y asegurará un suministro constante. Además, se busca fortalecer la relación estratégica con Brasil para liderar el suministro de radioisótopos para aplicaciones médicas. Otro objetivo es consolidar la posición del país en la producción de combustibles nucleares para reactores de investigación y potencia.

El complejo RA-10 ofrece oportunidades de investigación y desarrollo en métodos neutrónicos, que son relevantes para diversas ramas de la ciencia, al Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología. Asimismo, se invita a las

empresas industriales del país a participar en la provisión de componentes. La Argentina busca posicionarse en el mercado mundial de reactores nucleares multipropósito para la producción de radioisótopos, así como en la investigación científica y tecnológica aplicada. El objetivo principal es avanzar en la construcción de la soberanía tecnológica de América Latina y del hemisferio sur, y poner al servicio de las naciones el desarrollo y la experiencia en tecnología nuclear con fines pacíficos.

El complejo RA-10-LAHN consolida más de 70 años de investigación y desarrollo nuclear en Argentina. A diferencia del reactor OPAL que INVAP construyó para Australia, el RA-10 tendrá un 50 % más de potencia e incluirá dispositivos para testear combustibles nucleares y brindar acceso a técnicas de investigación neutrónicas y producción de insumos irradiados para la industria tecnológica.

Este proyecto confirma la capacidad real de la Argentina para diseñar, fabricar y poner en funcionamiento reactores nucleares, como lo ha hecho desde la construcción del RA-1 en 1958. Además, consolida la posición históricamente sólida del país en la exportación de tecnología nuclear, aplicaciones nucleares, industria y ciencia, así como su liderazgo tecnológico regional y su presencia global en políticas nucleares.

Glosario

Aluminio 6061: aleación de una resistencia entre media y alta. Resiste bien la corrosión y tiene buena soldabilidad, ductilidad y maquinabilidad (<https://www.gabrian.com/es/aluminio-6061-conozca-sus-propiedades-y-usos/>).

Barras de control: tubos cilíndricos hechos de material absorbente de neutrones (carburo de boro o aleaciones de plata, indio y cadmio) con las mismas dimensiones que las varillas de combustible. Su función es proporcionar un medio rápido de control de la reacción nuclear, de manera de permitir efectuar cambios rápidos de potencia y su parada eventual en caso de emergencia. La reactividad del núcleo se aumenta o disminuye subiendo o bajando las barras de control (<https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/glosario-de-terminos/barra-de-control/#:~:text=Su%20funci%C3%B3n%20es%20proporcionar%20un,bajando%20las%20barras%20de%20control>).

Ciencia de materiales: se encarga del estudio de la preparación, estructura cristalina y propiedades físicas y químicas de los materiales, y de cómo adaptarlos a usos específicos (<https://www.ib.edu.ar/academicas/maestria-en-ciencias-fisicas/item/249-ciencia-de-materiales.html#:~:text=La%20Ciencia%20de%20Materiales%20se,c%C3%B3mo%20adaptarlos%20a%20usos%20espec%C3%ADficos>).

Decaimiento radiactivo: la radiactividad, también conocida como «decaimiento radiactivo», «decaimiento nuclear», «desintegración nuclear» o «transformación nuclear», es el proceso espontáneo y estocástico por el cual un núcleo inestable «decae» en otro que puede ser estable o inestable emitiendo una partícula o radiación electromagnética. Al núcleo inicial se lo conoce como «núcleo padre» y al resultante como

«núcleo hijo» o «núcleo hija». La radiación emitida puede ser una partícula alfa, beta o gamma. (<https://www.famaf.unc.edu.ar/~pperez1/manuales/cm/capitulo2.html#:~:text=La%20radiactividad%2C%20tambi%C3%A9n%20conocida%20como,una%20part%C3%ADcula%20o%20radiaci%C3%B3n%20electromagn%C3%A9tica>).

Dopado de silicio: técnica por excelencia para producir semiconductores de alta calidad, es el dopado vía irradiación neutrónica, NTD (Neutron Transmutation Doping) por su sigla en inglés. Con esta técnica, se puede lograr una distribución homogénea del agente dopante en la red cristalina del semiconductor y obtener un dispositivo electrónicamente estable. El dopado de materiales semiconductores se realiza a través del agregado de impurezas a la red cristalina del semiconductor original, de manera que modifica las propiedades eléctricas del material (https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/49/101/49101799.pdf).

Dummies: prototipo en una escala real del producto en el que se puede considerar la totalidad de elementos que se van a usar en la producción final (<https://glosario.mott.pe/marketing/palabras/dummy>).

Física de materia condensada: abarca el estudio de los estados sólidos, líquido, gel y otros en que la materia se presenta en conglomerados de enorme número de átomos. Aunque cada átomo es eléctricamente neutro, en la materia condensada están tan cerca unos de otros, que se influyen considerablemente mediante interacción electromagnética. Decimos que entre átomos vecinos se forman enlaces, mediante los cuales los átomos de un trozo de materia condensada se unen entre sí y manifiestan un comportamiento colectivo. Propiedades físicas como la dureza, el color o la densidad de un material son parte de este comportamiento colectivo (Recuperado el 7 de agosto de 2023 de <https://fisica.usm.cl/investigacion/>

[materia-condensada/?lang=en#:~:text=La%20f%C3%ADsica%20de%20materia%20condensada,de%20enorme%20n%C3%BAmero%20de%20%C3%A1tomos\).](#)

Fisión nuclear: es una reacción en la cual un núcleo pesado, al ser bombardeado con neutrones, se convierte en inestable y se descompone en dos núcleos, cuyos tamaños son del mismo orden de magnitud, con gran desprendimiento de energía y la emisión de dos o tres neutrones. En una pequeña fracción de segundo, el número de núcleos que se han fisionado libera una energía un millón de veces mayor que la obtenida. Estos neutrones, a su vez, pueden ocasionar más fisiones al interactuar con nuevos núcleos fisionables que emitirán nuevos neutrones y así sucesivamente. Este efecto multiplicador se conoce como «reacción en cadena». Si se logra que solo uno de los neutrones liberados produzca una fisión posterior, el número de fisiones que tienen lugar por segundo es constante y la reacción está controlada. Este es el principio de funcionamiento en el que está basado los reactores nucleares (<https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-fisica-nuclear/que-es-la-fision-nuclear/>).

Flujo neutrónico: magnitud utilizada en el estudio de las interacciones de los neutrones con los átomos de un medio material en un punto determinado del espacio, que se calcula mediante el producto de la densidad neutrónica por el módulo de la velocidad de los neutrones. Se suele medir en neutrones por cm^2 y por segundo (https://www.sne.es/diccionario-nuclear/flujo-de-neutrones-rev-1/#:~:text=Magnitud%20utilizada%20en%20el%20estudio,la%20velocidad%20de%20los%20neutrones.)).

Fuente Europea de Espalación: se está construyendo en Lund (Suecia) y entrará en funcionamiento en 2027. Cuando alcance plenamente sus

especificaciones, su flujo y rango espectral sin precedentes la convertirán en la fuente más potente y versátil de neutrones con fines científicos de todo el mundo. Su objetivo es crear 15 líneas de haces diferentes de neutrones para su empleo con fines científicos (<https://elpais.com/ciencia/2023-06-12/el-humilde-neutron-que-ayudara-a-desvelar-algunos-de-los-mayores-misterios-del-universo.html?ssm=whatsapp>).

Gap: distancia o diferencia que existe entre elementos relacionados entre sí.

Georadar: radar de penetración terrestre. Su principal función es localizar objetos, estructuras o cavidades por debajo del nivel del suelo. Se trata de una técnica moderna no destructiva y ecológica, por lo que actualmente se utiliza en multitud de sectores, como trabajos de ingeniería, agrónomos, geofísicos, arqueólogos, geólogos, profesionales, ambientales, etc. (<https://www.todoelectronica.com/blog-electronica/que-es-un-georadar-como-funciona-y-para-que-se-utiliza.html>).

Grados Kelvin: unidad de temperatura de la escala creada por William Thomson en 1848, sobre la base del grado Celsius, estableciendo el punto cero en el cero absoluto (-273,15 °C) y conservando la misma dimensión. Thomson, quién más tarde sería Lord Kelvin, introdujo la escala de temperatura termodinámica, y la unidad fue nombrada en su honor (<https://www.quimica.es/enciclopedia/Kelvin.html>).

Iones: en química, se define al ion como una especie química, ya sea un átomo o una molécula, cargada eléctricamente. Esto se debe a que ha ganado o perdido electrones de su dotación, originalmente neutra, fenómeno que se conoce como «ionización». También suele llamársele «molécula libre» cuando se trata de una molécula (<https://www.quimica.es/enciclopedia/Ion.html>).

MW: símbolo que se utiliza para designar una unidad de potencia que se corresponde a 1 millón de vatios o a mil kilovatios que se producen en una central eléctrica que funciona ininterrumpidamente durante 1 hora (<https://blog.energygo.es/glosario/definicion-mw-megavatio/>).

Neutrones: partículas con carga neutra que se encuentran en el núcleo de los átomos, junto con los protones con carga positiva. El número de neutrones en un núcleo determina qué isótopo es el núcleo (https://energyeducation.ca/Enciclopedia_de_Energia/index.php/Neutr%C3%B3n).

Neutrones fríos y neutrones térmicos: los neutrones libres se pueden clasificar según su energía cinética. Esta energía generalmente se da en electronvoltios (eV). El término «temperatura» también puede describir esta energía que representa el equilibrio térmico entre un neutrón y un medio con cierta temperatura. Neutrones fríos: (0 eV; 0.025 eV) neutrones en equilibrio térmico con entornos muy fríos como el deuterio líquido. Este espectro se utiliza para experimentos de dispersión de neutrones. Neutrones térmicos: neutrones en equilibrio térmico con un medio circundante. La energía más probable a 20° C (68° F) para la distribución Maxwelliana es 0,025 eV. (~ 2 km / s). Esta parte del espectro de energía de neutrones constituye la parte más importante del espectro en los reactores térmicos (<https://www.radiation-dosimetry.org/es/que-es-el-neutron-rapido-neutron-de-alta-energia-definicion/>).

Número atómico: número entero positivo que es igual al número total de protones en un núcleo del átomo. Se suele representar con la letra Z. Es característico de cada elemento químico y representa una propiedad fundamental del átomo, es decir, su carga nuclear (https://www.quimica.es/enciclopedia/N%C3%BAmero_at%C3%B3mico.html).

Policristales: no todos los sólidos son monocristales (por ejemplo, semiconductores de silicio). La mayoría de los sólidos cristalinos se componen de una colección de muchos cristales pequeños o granos de diferente tamaño y orientación. Estos tienen orientaciones cristalográficas aleatorias. Cuando un metal comienza con la cristalización, el cambio de fase comienza con pequeños cristales que crecen hasta fusionarse y formar una estructura policristalina. En el bloque final de material sólido, cada uno de los pequeños cristales (llamados «granos») son un verdadero cristal con una disposición periódica de átomos, pero todo el policristal no tiene una disposición periódica de átomos, porque el patrón periódico se rompe en los límites del grano. Los granos y los límites de los granos ayudan a determinar las propiedades de un material (<https://material-properties.org/es/que-es-la-estructura-policristalina-materiales-policristalinos-definicion/>).

Radiación gamma: tipo de radiación electromagnética producida generalmente por elementos radioactivos o procesos subatómicos como la aniquilación de un par positrón-electrón. Este tipo de radiación de tal magnitud también es producida en fenómenos astrofísicos de gran violencia. Debido a las altas energías que posee constituye un tipo de radiación ionizante capaz de penetrar en la materia más profundamente que la radiación alfa o beta y puede causar grave daño al núcleo de las células, por lo tanto es utilizada para esterilizar equipos médicos y alimentos (https://www.quimica.es/enciclopedia/Rayos_gamma.html).

Radioisótopos: forma inestable de un elemento que emite radiación para transformarse en una forma más estable. La radiación se puede rastrear fácilmente y causar cambios en la sustancia que la recibe. Estos atributos especiales hacen que los radioisótopos sean útiles en la medicina, la industria y otras esferas. La mayoría de radioisótopos se producen

artificialmente en reactores de investigación y aceleradores, donde exponen un blanco a partículas como neutrones o protones, tras lo cual se llevan a cabo distintos procesos químicos para que adopten la forma química requerida (<https://www.iaea.org/es/temas/radioisotopos#:~:text=Los%20radiois%C3%B3topos%20son%20la%20forma,la%20sustancia%20que%20la%20recibe>).

Reflectografía: técnica de examen con la que se obtiene el registro del dibujo subyacente en las pinturas. Se viene utilizando desde hace algunas décadas con mucho éxito en el estudio de pinturas sobre tabla, esencialmente de los siglos xv y xvi (https://ge-iic.com/files/Artecontemporaneo1/Pilar_Bustinduy.pdf).

Spin: propiedad física de las partículas subatómicas, por la cual toda partícula elemental tiene un momento angular intrínseco de valor fijo. Se trata de una propiedad intrínseca de la partícula como lo es la masa o la carga eléctrica. En 1920, los químicos analíticos llegaron a la conclusión que para describir a los electrones en el átomo, además de los números cuánticos, se requería de un cuarto concepto, el llamado «*spin* del electrón». Este, al girar sobre su propio eje, genera un campo magnético, el denominado *spin* ([https://www.quimica.es/enciclopedia/Esp%C3%ADn.html#:~:text=El%20esp%C3%ADn%20\(del%20ingl%C3%A9s%20spin,masa%20o%20la%20carga%20el%C3%A9ctrica\)](https://www.quimica.es/enciclopedia/Esp%C3%ADn.html#:~:text=El%20esp%C3%ADn%20(del%20ingl%C3%A9s%20spin,masa%20o%20la%20carga%20el%C3%A9ctrica))).

Termografía infrarroja: técnica que permite medir temperaturas a distancia y sin necesidad de contacto físico con el objeto a estudiar mediante la captación de la intensidad de radiación infrarroja que emiten los cuerpos (<https://visiontir.com/es/termografia-infrarroja-camaras-termografias-y-termometros-infrarrojos/#:~:text=La%20termograf%C3%ADa%20infrarroja%20es%20una,infrarroja%20que%20emiten%20los%20cuerpos>).

Tev (tera electrón voltio): un billón de electrón voltios. El electrón voltio es la energía cinética que adquiere un electrón al atravesar en el vacío una diferencia de potencial de un voltio. Es una unidad de energía que se emplea en física corpuscular (<https://www.sne.es/diccionario-nuclear/electronvoltio/>).

Tiempo de vuelo: tiempo que tarda una partícula en recorrer una distancia determinada (<https://www.sne.es/diccionario-nuclear/tiempo-de-vuelo/#:~:text=Tiempo%20que%20tarda%20una%20part%C3%ADcula%20en%20recorrer%20una%20distancia%20determinada>).

Uranio 235: isótopo del uranio que se diferencia del otro común isótopo del elemento, uranio 238, en su capacidad para provocar reacción en cadena de fisión que se expande rápidamente, es decir, que es fisible (<https://www.quimica.es/enciclopedia/Uranio-235.html>).

Uranio enriquecido: la concentración del isótopo del uranio fisionable ^{235}U en el uranio natural es de alrededor del 0,70 %, siendo prácticamente el resto del uranio natural del isótopo ^{238}U . Esta baja proporción natural de ^{235}U es inferior a la requerida para iniciar una reacción nuclear de fisión en las centrales nucleares. Por ello, debe ser enriquecido para aumentar su proporción de uranio fisionable ^{235}U para hacer viable su uso como combustible nuclear. El concentrado de uranio se purifica mediante sucesivas disoluciones y precipitaciones, y se convierte en hexafluoruro de uranio. Este se somete a un proceso de enriquecimiento (por difusión gaseosa o ultracentrifugación) para aumentar la proporción de uranio 235 con respecto al uranio 238. El resultado es la obtención de óxido de uranio enriquecido (<https://www.csn.es/enriquecimiento>).

Referencias bibliográficas

- Briozzo, F., Sbaffoni, M., Quilici, D. y Harriague, S. (2007). A 40 años de la inauguración del RA-3: anécdotas, historias y algunas enseñanzas. *Revista CNEA*, 7(27-28), 30-37. <https://www.lateandes.com/late/wp-content/uploads/2016/08/RA3.pdf>
- Carranza, E. (2017). *Una mirada a la producción de radioisótopos por fisión en la Argentina*. (Serie Hojitas de conocimiento). IEDES.
- Comisión Nacional de Energía Atómica (2019). *Planta ECRI: Historia, presente y futuro*. Departamento de Elementos Combustibles para Reactores de Investigación, Centro Atómico Constituyentes (presentación cedida por ECRI al autor).
- Cristini, P., Carranza, E. C., Novello, A., Cestau, D., Bavaro, R., Bravo, C., Bronca, M., Bronca, P., Centurión, R., Fraguas, F., Gualda, E., Ivaldi, L., Milidoni, M., Nieli, F. y Spinelli, H. (12-17 de abril de 2015). *Actividades de producción de radioisótopos por fisión en la Argentina* [Ponencia]. X Congreso Regional Latinoamericano IRPA de Protección y Seguridad Radiológica «Radioprotección: Nuevos Desafíos para un Mundo en Evolución», Buenos Aires, Argentina.
- De Dico, R. (2013). *Breve historia de los reactores nucleares de investigación y producción de la CNEA* (Documento de trabajo). Departamento de Tecnología Nuclear del Centro Latinoamericano de Investigaciones Científicas y Técnicas.
- De Dico, R. (2014). *Proyecto RA-10: Reactor Nuclear Argentino Multipropósito*. OETEC-CLICET, Área de Tecnología Nuclear. <https://www.oetec.org/informes/ra10radioisotopos230414.pdf>
- De Dico, R., Deluchi, F. y Ferrer, J. (2015). *Argentina puesta a crítico. Resultados y desafíos del Plan Nuclear Argentino*. Planeta.
- Granada, J. R. (1987). *Proyecto LATIN: Laboratorio de Técnicas de Investigación Neutrónicas*. Departamento de Investigación Básica-Centro Atómico Bariloche-CNEA (Documento provisto al autor).
- Hurtado, D. (2014). *El sueño de la Argentina atómica: Política, tecnología y desarrollo nacional (1945-2006)*. Edhasa.

- Muñoz Castiñeira, S. (28 de mayo de 2023). Argentina: una referencia internacional en el sector nuclear. *Nota al Pie*. <https://www.notalpie.com.ar/2023/05/28/argentina-una-referencia-internacional-en-el-sector-nuclear/>
- Narvaiz, P. (2009). Irradiación de alimentos: situación en 2009. *Revista CNEA*, 9(33-34).
- Obritzky, A. (2009). Los métodos de ensayos no destructivos para el estudio de bienes culturales. *Revista CNEA*, 9(33-34).
- Organismo Internacional de Energía Atómica (2022). Optimización del control de plagas de los alimentos mediante la irradiación. <https://www.iaea.org/es/bulletin/optimizacion-del-control-de-plagas-de-los-alimentos-mediante-la-irradiacion>
- Proyecto Vectores (16 de marzo de 2021). Reactor Nuclear Argentino Multipropósito RA-10. UBA Investigación-PIUBAD-FIUBA. https://cms.fi.uba.ar/uploads/Gacetilla_Nuclear_RA_10_81d8eec199.pdf
- Zappino, J. S. (2022a). Empresas públicas y mixtas, tecnología y desarrollo III. Trabajo, tecnología y ciencia argentinos: el caso Nucleoeléctrica Argentina S.A. Parte 1. *Cuadernos del INAP (CUINAP)*, 3(84). <https://publicaciones.inap.gob.ar/index.php/CUINAP/issue/view/134>
- Zappino, J. S. (2022b). Empresas públicas y privadas, tecnología y desarrollo: el rol del sector industrial en el complejo nuclear argentino. *Cuadernos del INAP (CUINAP)*, 3(104). <https://publicaciones.inap.gob.ar/index.php/CUINAP/issue/view/165>
- Zappino, J. S. (2022c). Empresas públicas y mixtas, tecnología y desarrollo IV. El ciclo del combustible nuclear argentino: los casos de Dioxitek S.A. y CONUAR S.A. Parte 1. *Cuadernos del INAP (CUINAP)*, 3(93). <https://publicaciones.inap.gob.ar/index.php/CUINAP/article/view/291/270>
- Zappino, J. S. (2022d). Empresas públicas y mixtas, tecnología y desarrollo IV. El ciclo del combustible nuclear argentino: los casos de Dioxitek S.A. y CONUAR S.A. Parte 2. *Cuadernos del INAP (CUINAP)*, 3(94). <https://publicaciones.inap.gob.ar/index.php/CUINAP/article/view/292/271>

CUINAP | Argentina, Cuadernos del INAP

Año 4 - N.º 134 - 2024

Instituto Nacional de la Administración Pública

Av. Roque Sáenz Peña 511, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

CP: C1035AAA - Tel.: 6065-2310 – Correo electrónico: dinvesti@jefatura.gob.ar

ISSN 2683-9644

Editor responsable

Leandro Bottinelli

Coordinación editorial

Leticia Mirás

Edición y corrección

Eugenia Caragunis

Arte de tapa

Roxana Pierri

Federico Cannone

Diseño y diagramación

Edwin Mac Donald

Las ideas y planteamientos contenidos en la presente edición son de exclusiva responsabilidad de sus autoras/es y no comprometen la posición oficial del INAP.

El INAP no asume responsabilidad por la continuidad o exactitud de los URL de páginas web externas o de terceros referidas en esta publicación y no garantiza que el contenido de esas páginas web sea, o continúe siendo, exacta o apropiada.

El uso del lenguaje inclusivo y no sexista implica un cambio cultural que se enmarca en un objetivo de la actual gestión de Gobierno y se sustenta en la normativa vigente en materia de género, diversidad y derechos humanos en la Argentina. En esta publicación se utilizan diferentes estrategias para no reproducir prejuicios y estereotipos que promuevan la desigualdad, la exclusión o la discriminación de colectivos, personas o grupos.



Los Cuadernos del INAP y su contenido se brindan bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial 2.5 Argentina. Es posible copiar, comunicar y distribuir públicamente su contenido siempre que se cite a las/os autoras/es individuales y el nombre de esta publicación, así como la institución editorial. El contenido de los Cuadernos del INAP no puede utilizarse con fines comerciales.

Esta publicación se encuentra disponible en forma libre y gratuita en: publicaciones.inap.gob.ar

Diciembre 2023

Secretaría de
Gestión y Empleo Público



Jefatura de
Gabinete de Ministros
Argentina