

# CUINAP | Argentina

Año 4 • 2023 | Cuadernos del INAP

## Ingeniería y desarrollo en el sector nuclear

El CAREM-25: primer reactor nuclear  
de potencia íntegramente argentino

Jorge Salvador Zappino

125

Capacitar e investigar para fortalecer las capacidades estatales



# CUINAP | Argentina

## **Ingeniería y desarrollo en el sector nuclear**

El CAREM-25: primer reactor nuclear  
de potencia íntegramente argentino

Jorge Salvador Zappino

# 125

## **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

---

<b>Introducción</b>	<b>10</b>
<b>1 La energía nuclear en el contexto de la crisis y la transición energética</b>	<b>13</b>
<b>2 Los <i>Small Modular Reactors</i> (SMR): el futuro de la energía nuclear</b>	<b>15</b>
<b>3 El sector nuclear argentino y los reactores de potencia</b>	<b>28</b>
<b>4 El CAREM-25</b>	<b>32</b>
<b>5 Los combustibles del CAREM</b>	<b>53</b>
<b>6 Del CAREM-25 al CAREM Comercial</b>	<b>72</b>
<b>7 El presente del CAREM</b>	<b>77</b>
<b>A modo de conclusión</b>	<b>83</b>
<b>Glosario</b>	<b>85</b>
<b>Referencias bibliográficas</b>	<b>90</b>

## **Ingeniería y desarrollo en el sector nuclear**

### **Primer reactor nuclear de potencia íntegramente argentino**



**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

La historia del crecimiento económico está signada por la Revolución Industrial, iniciada en Gran Bretaña en el siglo XVIII para luego extenderse al resto de Europa y los Estados Unidos.

Hacia fines del siglo XIX, se generalizó el uso del petróleo como combustible, lo cual provocó, a su vez, una modificación drástica de las estructuras productivas. Este uso generalizado permitió la creación de los motores para el transporte, el desarrollo del automóvil y de la industria petroquímica. Luego, la energía eléctrica aumentó significativamente el nivel de vida de las sociedades.

El acceso a la energía se convirtió, de esta manera, en una variable geopolítica y geoeconómica central. Cada nación elige su matriz energética en función de la disponibilidad de fuentes primarias. Pero las consecuencias derivadas de la producción de energía a partir de los combustibles fósiles —vinculadas a las emisiones de gases de efecto invernadero y a los problemas de salud relacionados con la contaminación del aire— llevaron a que prácticamente todas las partes involucradas en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático acordaran en preparar contribuciones determinadas a nivel nacional para adoptar medidas urgentes.

Resulta evidente que el cambio climático representa un desafío. La reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero es urgente si pretendemos evitar las consecuencias catastróficas de un planeta cuya temperatura crece cada día más. El uso de energías renovables, como la eólica y la solar, está aumentando, mientras que la energía nuclear contribuye al suministro de energía, a la seguridad energética y a la estabilidad de las redes de transmisión.

En este sentido, las nuevas tecnologías desarrolladas en reactores nucleares, en particular los reactores modulares pequeños (SMR, por su sigla en inglés [*small modular reactors*]), ofrecen diseños que no solo sirven para producir energía eléctrica para su distribución, sino también para generar energía limpia y descarbonizada para el transporte, la construcción, la desalinización, etc.

En este contexto, la Argentina, con la construcción del CAREM-25 (Central Argentina de Elementos Modulares), se perfila como uno de los líderes mundiales en el segmento de este tipo de reactores. El prototipo se está montando en Lima (provincia de Buenos Aires), anexo al Complejo Nuclear Atucha, y es el primer SMR del mundo en proceso de construcción.

### **Palabras clave**

CAREM, SMR, energía nuclear, transición energética, reactores pequeños.

### **Abstract**

The history of economic growth is marked by the Industrial Revolution, which began in Great Britain in the 18th century and then spread to the rest of Europe and the United States.

Towards the end of the 19th century, the use of oil as a fuel became widespread, leading to a radical change in production structures. This was followed by the advent of electricity, which greatly improved the standard of living societies.

Access to energy became a key geopolitical and geoeconomic variable. Each nation would choose its energy matrix based on the availability of primary

sources. The consequences of producing energy from fossil fuels, in terms of greenhouse gas emissions and health problems linked to air pollution, led all the parties to the United Nations the Framework Convention on Climate Change to agree to prepare determined contributions at the national level with the aim of adopting urgent measures in this area.

It is clear that climate change is a challenge. The use of renewable energy, such as wind and solar, is increasing. Meanwhile, nuclear energy contributes to energy supply, energy security and the stability of transmission networks, providing clean and safe energy.

Currently, new technologies being developed in nuclear reactors, in particular Small Modular Reactors (SMR) show appropriate designs to produce electrical energy for distribution.

In this context, with the construction of CAREM-25 (Central Argentina de Elementos Modulares), Argentina is becoming as one of the world leaders in the segment of this type of reactor.

The CAREM-25 prototype is being built in Lima, Buenos Aires province, attached to the Atucha Nuclear Complex. CAREM-25 became the first SMR in the world under construction.

### **Key words**

CAREM, SMR, nuclear energy, energy transition, small reactors.

## Introducción

La historia del crecimiento económico está signada por la Revolución Industrial, iniciada en Gran Bretaña en el siglo XVIII para luego extenderse al resto de Europa y Estados Unidos durante el siguiente siglo. En esa revolución, se produjo un salto tecnológico y productivo a partir de la máquina de vapor y la transformación del calor en energía mecánica, lo que generó una capacidad productiva mayor a la existente en ese momento.

Hacia fines del siglo XIX, el uso del petróleo como combustible se generalizó, hecho que provocó, a la vez, una alteración radical de las estructuras productivas. Este uso generalizado permitió la creación de los motores para el transporte, el desarrollo del automóvil y de la industria petroquímica. Luego, llegaría la energía eléctrica, que aumentó significativamente el nivel de vida de las sociedades. De aquí se desprende que la vinculación entre generación de energía y desarrollo económico es uno de los rasgos principales del mundo actual<sup>1</sup>.

El acceso a la energía se convirtió, de esta manera, en una variable geopolítica y geoeconómica central. Cada nación elige su matriz energética en función de la disponibilidad de fuentes primarias. Pero las consecuencias derivadas de la producción de energía a partir de los combustibles fósiles —vinculadas a las emisiones de gases de efecto invernadero y a los problemas de salud relacionados con la contaminación del aire— llevaron a que prácticamente todas las partes involucradas en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático convinieran en preparar

---

<sup>1</sup> Para un desarrollo de la historia de la energía nuclear, véase Zappino (2022a).

contribuciones (determinadas a nivel nacional) con el objetivo de adoptar medidas urgentes<sup>2</sup>.

Resulta evidente que el cambio climático representa un desafío. La reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero se torna urgente si pretendemos evitar las consecuencias catastróficas de un planeta cuya temperatura crece cada día más. El uso de energías renovables, como la eólica y la solar, está aumentando, mientras que la energía nuclear contribuye al suministro de energía limpia, a la seguridad energética y a la estabilidad de las redes de transmisión.

Actualmente, las nuevas tecnologías desarrolladas en reactores nucleares, en particular los reactores modulares pequeños (SMR, por su sigla en inglés [Small Modular Reactors]) ofrecen diseños que no solo sirven para producir energía eléctrica para su distribución, sino también para generar energía limpia y descarbonizada para el transporte, la construcción, la desalinización, etc.

En este contexto, la Argentina, con la construcción del CAREM-25 (Central Argentina de Elementos Modulares), se perfila como uno de los líderes mundiales en el segmento de este tipo de reactores, ya que sus orígenes se pueden rastrear en la década de 1980.

El prototipo está siendo construido en Lima (provincia de Buenos Aires), anexo al Complejo Nuclear Atucha. La obra comenzó el 8 de febrero de 2014 y, a partir de ese día, el CAREM-25 se convirtió en el primer SMR

---

2 La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático fue adoptada en Nueva York el 9 de mayo de 1992, abierta a la firma el 4 de junio de 1992 en Río de Janeiro y entrada en vigor el 21 de marzo de 1994. Permite, entre otras cosas, reforzar la conciencia pública, a escala mundial, de los problemas relacionados con el cambio climático. Fue ratificada por 197 países, denominados «partes» en la Convención.

del mundo en proceso de construcción (Comisión Nacional de Energía Atómica [CNEA], 2023).

En este trabajo se analiza, en primer lugar, el desarrollo de la tecnología de los SMR y sus principales características, para luego describir la historia del CAREM-25 desde sus orígenes, sus características de diseño, combustible y seguridad, hasta llegar a la situación actual en la que está por finalizar su construcción. Se indagan, además, las distintas alternativas previstas para el salto entre el prototipo y el desarrollo y construcción de un CAREM Comercial que pueda brindar soluciones energéticas, tanto a nivel nacional como internacional, mediante la exportación a distintos países.

## La energía nuclear en el contexto de la crisis y la transición energética

En los últimos años, el sector de la energía nuclear en el mundo se encuentra frente a uno de los mayores retos de su historia: ser identificado como una opción rápida, limpia y segura para conseguir el objetivo de reducir los niveles de emisión de carbono (CO<sub>2</sub>) y su efecto invernadero. Y todo eso debe hacerlo en un contexto energético cambiante. Actualmente, la situación se encuentra marcada por dos hechos: la fuerte suba del precio del gas como consecuencia de la guerra en Ucrania y el aumento del precio de los derechos de emisiones de carbono. A esta situación hay que agregarle el aumento de la demanda mundial de energía producto del crecimiento económico mundial en 2021, luego de la pandemia por COVID-19.

Con el objetivo de llevar estos planes a la realidad, deben ponderarse las acciones también desde el punto de vista del análisis económico de cada fuente, por lo cual tanto gobiernos como empresas y centros de investigación intentan conseguir que la energía nuclear muestre valores competitivos. A esto apuntan las tecnologías de los SMR.

Mientras tanto, el sector nuclear debe lidiar aún con los impactos negativos del accidente de la central nuclear japonesa de Fukushima en 2011, lo cual provocó, entre otras consecuencias, que Alemania tomara la drástica decisión

de cerrar todos sus reactores nucleares, con el objetivo de desnuclearizar su producción eléctrica para finales de 2022.

Europa ha sido, hasta el momento, el único continente en disminuir la producción nuclear, mientras que, en el resto del mundo, el tamaño del parque permanece constante o en crecimiento, especialmente en China, donde en los últimos diez años se han conectado 37 reactores nucleares a la red, lo que representa más del 70 % de su parque nuclear. Otro caso es el de Japón que, tras Fukushima, apagó todos sus reactores (Durán Vinuesa *et al.*, 2022).

Incluso empresarios como Bill Gates y Elon Musk han intervenido en el debate para solicitar un papel más destacado para la energía nuclear en la transición. Las dos barreras principales para expandir el acceso a la energía son la falta de infraestructura de red (por ejemplo, en áreas rurales) y los costos de conexión a la red eléctrica (altos para la electrificación rural). Según el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA [IAEA, por su sigla en inglés]), una sola planta de energía, de cualquier tipo, no debe representar más del 10 % de la capacidad total instalada de la red. Por lo tanto, en áreas que carecen de líneas de transmisión y capacidad de red, los SMR podrían ser una buena opción para conectarse a la red o funcionar de manera remota fuera de ella para proporcionar energía baja en carbono destinada a la población y la industria locales. Mientras que los reactores nucleares brindan una fuente de carga base consistente de energía limpia, las energías renovables como la eólica y la solar son fuentes de energía variables que dependen del clima y la hora del día. Por lo tanto, los SMR podrían combinarse con fuentes renovables en un sistema de energía híbrido para aumentar su eficiencia (Gordon, s.f.).

## Los *Small Modular Reactors* (SMR): el futuro de la energía nuclear

### 2.1 Orígenes de la energía nuclear, funcionamiento de una central de potencia y generaciones de reactores

A partir del siglo XIX, se producen descubrimientos importantes en los campos de la física y la química, iniciados en 1879 con Crookes, quien ionizó un gas por descarga eléctrica. A partir de ese momento, se sucedieron descubrimientos, como los rayos X y gamma, y el electrón.

A fines de ese mismo siglo, el matrimonio Curie aislaba el elemento radiactivo radio, mientras que la teoría de la relatividad de Albert Einstein data de 1905. También por esos años, Rutherford y Bohr dieron a conocer que el átomo neutro se componía de una carga negativa constituida por los electrones que rodean a un núcleo central de carga positiva, la cual contiene la mayor parte de la masa total del átomo.

Ya en los años treinta del siglo XX, Bothe bombardeó berilio con partículas alfa provenientes del polonio, y detectó una irradiación que al principio fue descrita como rayos gamma, hasta que, en 1932, Chadwick demostró que se trataba de partículas desconocidas hasta ese momento, los neutrones,

de masa aproximadamente igual a los protones, pero con carga eléctrica nula. Neutrones y protones unidos constituyen el núcleo atómico.

En 1939, los alemanes Hahn y Strassmann obtuvieron bario de la irradiación de uranio con neutrones. De esta manera, se llegó al concepto principal de la fisión nuclear. Más adelante, el italiano Fermi demostró que, durante ese proceso, también se emitían neutrones, lo que llevaba a pensar en una reacción en cadena para producir grandes cantidades de energía. Dos años después, Seaborg descubrió el plutonio que, como el uranio, es fisible.

Luego de numerosos experimentos, Fermi pudo construir el primer reactor nuclear (denominado «pila atómica») y el 2 de diciembre de 1942 logró el primer éxito: producir una reacción en cadena controlada.

Una vez que el desarrollo nuclear se convirtió en una realidad, surgieron los temores de que la tecnología fuera utilizada únicamente para la industria armamentística. Las políticas de no proliferación nuclear se hicieron efectivas a través de dos instituciones: por un lado, el OIEA, creado en 1957 como un órgano autónomo de la Organización de las Naciones Unidas (ONU); por otro, el Grupo de Suministradores Nucleares (GSN), conformado en 1975<sup>3</sup> por los países exportadores de material nuclear. Además, el temor de la comunidad internacional llevó a promover la firma de dos tratados relevantes: el Tratado de Tlatelolco y el Tratado de No Proliferación Nuclear (TNP). El primero data de 1967 y tiene como objetivo lograr la proscripción del armamento nuclear en América Latina. El TNP, de 1968, se planteó evitar la proliferación de armas nucleares a nivel mundial. Ambos dieron paso al uso de la energía nuclear con fines pacíficos.

---

3 Su creación es consecuencia de las pruebas nucleares llevadas a cabo por la India un año antes, las cuales evidenciaron que la tecnología nuclear transferida para propósitos pacíficos podía ser fácilmente derivada a usos bélicos.

La Marina de los Estados Unidos fue pionera en el uso de reactores nucleares en submarinos para recorrer largas distancias sin necesidad de recargar combustible y permitir períodos más prolongados en inmersión, ya que estos reactores no requieren consumo de oxígeno<sup>4</sup>.

En el sector privado, la empresa estadounidense Westinghouse llevó a cabo experimentos con un reactor como fuente de energía para una planta de generación eléctrica, conocida como «central nuclear»<sup>5</sup>. En aquel momento, el combustible utilizado era dióxido de uranio enriquecido y se empleaba agua liviana como refrigerante. Posteriormente, con la introducción del uso de agua presurizada, este tipo de reactor pasó a ser conocido como PWR (por su sigla en inglés [*Pressurized Water Reactor*]). Por otro lado, en 1960, General Electric desarrolló los reactores de ciclo directo BWR (por su sigla en inglés [*Boiling Water Reactor*]) o reactores de agua en ebullición. De esta manera, tanto Westinghouse como General Electric incursionaron en el mercado de centrales nucleares de 500 MWe y comenzaron a competir con las centrales que utilizaban combustibles fósiles.

Asimismo, la empresa privada Siemens (Alemania) y la empresa estatal Framatome (Francia) desarrollaron sus propios diseños de reactores. Siemens creó reactores que funcionaban con dióxido de uranio natural como combustible y agua pesada como moderador. Por su parte, Canadá desarrolló el reactor CANDU (*Canadian Deuterium Uranium*), basado en el PWR. Además, existen otros tipos de reactores refrigerados por gas de origen inglés y soviético.

---

4 El primer submarino nuclear fue el Nautilus, construido en 1955.

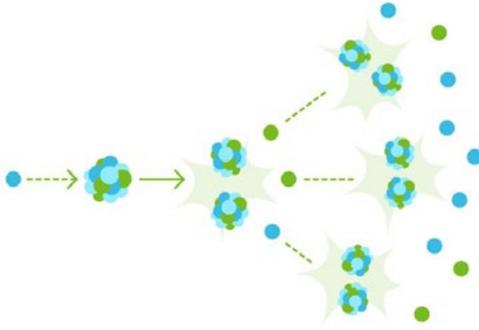
5 Esta central comenzó a operar en 1957 con una potencia de 60 Mwe. Fue el primer reactor comercial.

La energía nuclear es aquella que se produce mediante una reacción nuclear y puede ser de dos tipos: fisión y fusión. Uno de los usos más comunes es la generación de energía eléctrica.

Para producir energía es necesario generar calor. Una central nuclear no tiene un funcionamiento muy distinto al de otras centrales eléctricas. La diferencia es que el calor se genera mediante el proceso de fisión de átomos de uranio, proceso que se origina en una reacción en cadena producida por el bombardeo de neutrones sobre el núcleo del reactor. Los neutrones existen intrínsecamente en el reactor, en los átomos del uranio presente en las barras de combustible. Cuando se quiere arrancar un reactor, se extraen las barras de control (que absorben neutrones) para que se origine la reacción en cadena. Estas barras interrumpen o inician la reacción.

Cuando un neutrón golpea un átomo de uranio 235 ( $^{235}\text{U}$ ) y divide su núcleo, libera dos o tres neutrones que, a su vez, a una velocidad adecuada, golpean otros átomos de uranio, de manera que inicia una reacción en cadena controlada (Figura 1).

## Figura 1. Fisión nuclear

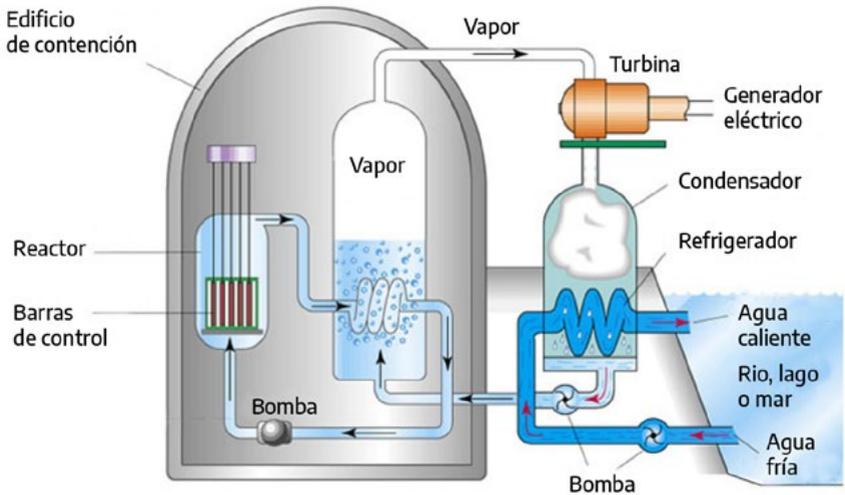


Fuente: <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-energia-nuclear/como-se-realiza-una-reaccion-nuclear/>

En el interior del reactor, el agua pesada se mueve mediante bombas, y a medida que ocurre el proceso de fisión, el agua se calienta y transfiere ese calor al generador de vapor. De esta manera, el vapor generado impulsa las turbinas, las cuales están conectadas a un generador eléctrico, convirtiendo así la energía mecánica en energía eléctrica para completar el proceso de generación de electricidad. Posteriormente, el vapor se dirige hacia el condensador, donde se enfría y se condensa, y el agua condensada vuelve al generador de vapor para repetir el ciclo (Figura 2)<sup>6</sup>.

<sup>6</sup> Para acceder a más información sobre la historia de la energía nuclear y el funcionamiento de las centrales, ver Zappino (2022a).

Figura 2. Esquema aproximado de una central de potencia



Fuente: <https://energicitateconnatalia.wordpress.com/energia-nuclear/componentes-de-una-central-nuclear/>

En la historia de las centrales nucleares cuenta ya con cuatro generaciones de reactores, cuyas diferencias se deben al grado de desarrollo de la tecnología utilizada para su construcción.

La Generación I data de los orígenes de la energía nuclear de las décadas de 1950 y 1960. Se basaban, esencialmente, en los conocimientos de física nuclear que habían adquirido los científicos durante la década anterior.

A partir de los años sesenta, comenzaron a aparecer reactores que pertenecen a la Generación II, que son la mayor parte de aquellos que están funcionando en la actualidad. Las diferencias fundamentales respecto de los reactores de la Generación I se basaban en el aprendizaje que permitió

resolver los problemas derivados de la degradación de los materiales durante los procesos de fisión. Además, este deterioro se veía incrementado como consecuencia de los refrigerantes utilizados. Estos reactores tenían una vida útil de aproximadamente 40 años extensible a 80 años.

En los últimos 30 años, surgieron los reactores de la Generación III que tomaron las mejoras realizadas en los de la Generación II y les sumaron grandes adelantos en seguridad, operatividad, control y fiabilidad. Incluyen, además, una mejor tecnología de combustibles que implica un mayor rendimiento térmico. Estos adelantos permitieron aumentar la vida útil de las centrales a 60 años de operación extensible a 120 años, con inclusión de una revisión para extensión de vida. Por otro lado, gracias a los avances tecnológicos, la construcción de estos reactores implicó una fuerte disminución en las inversiones respecto a los reactores de la generación anterior.

Algunos cambios llevaron a la existencia de una denominada «Generación III+», la cual introdujo algunas mejoras que no justifican un cambio de generación en sí. Entre esos avances, pueden citarse los sistemas de seguridad pasivos que entran en acción cuando el reactor muestra alguna posible falla o cambio de funcionamiento. En las generaciones anteriores, estos sistemas dependían de equipos externos e intervención humana.

Los diseños de la Generación IV se basan en adelantos que permiten solucionar algunas deficiencias de las anteriores generaciones. Es aquí donde surgen los SMR.

Durante la Conferencia Internacional sobre el Cambio Climático y el Papel de la Energía Nuclear, celebrada en septiembre de 2019, muchas naciones consideraron a los SMR como una posible opción nuclear viable para

contribuir a mitigar los efectos del cambio climático. Después de esta conferencia, en abril de 2021, el OIEA lanzó una plataforma sobre pequeños reactores modulares y sus aplicaciones (Plataforma SMR), cuyo objetivo es coordinar las actividades del organismo en este campo y proporcionar una suerte de «ventanilla única» que ofrece toda la experiencia relevante para el desarrollo, el despliegue y la supervisión de los SMR y sus aplicaciones (International Atomic Energy Agency [IAEA], 2022).

## **2.2 Antecedentes, características y aplicaciones de los SMR**

El concepto de *SMR* existe desde hace casi 50 años y la Argentina fue una de las pioneras desde la década de 1980. Esencialmente, este tipo de reactores tienen los mismos principios que las generaciones anteriores, pero se diferencian por sus nuevos conceptos de tamaño, seguridad y usos.

Se denomina SMR a aquellos reactores con una potencia de hasta 300 MWe por unidad. Estos niveles de potencia significan la tercera parte de la capacidad de los reactores de energía nuclear de las generaciones previas.

Una de las características de estos reactores es que pueden fabricarse en pequeñas instalaciones industriales y, una vez finalizados, llevarse como módulos al sitio donde serán utilizados, lo cual los convierte en un nuevo paradigma escalable para la energía nuclear. Esta característica resulta sumamente importante a la hora de su adaptación a la red eléctrica. El agrupamiento de varios módulos permite crear instalaciones de mayor potencia que se adaptan fácilmente a las infraestructuras de transporte y distribución de energía.

Las características principales de los SMR son las siguientes:

- Son pequeños en comparación con los reactores de potencia convencionales. Esta es la principal innovación que los convierte en una opción económicamente más competitiva, ya que permite crear grupos de módulos más versátiles en redes de energía compartidas con otras fuentes de generación como las renovables.
- Son modulares, lo cual representa una ventaja desde el punto de vista de la seguridad energética, ya que las recargas de combustible pueden realizarse en forma independiente en cada módulo. Esto redundante en una significativa reducción de las pérdidas de producción energética de las centrales.
- Tienen la capacidad de generar calor y energía al mismo tiempo.
- Pueden erigirse en una herramienta para la generación de hidrógeno libre de emisiones.
- En aquellos lugares aislados y sin redes de transmisión eléctrica, pueden conectarse fuera de la red, incluso en forma remota, para proporcionar energía baja en carbono tanto para poblaciones como industrias.
- Poseen requisitos reducidos de combustible, es decir que necesitan recargas menos frecuentes.

El concepto de *seguridad* se basa en los sistemas pasivos, lo cual los hace inherentemente más seguros al no requerir la intervención humana o de equipos externos para apagar todos los sistemas. Los sistemas pasivos están basados en fenómenos físicos, como la gravedad.

Estos diseños más seguros permiten reducir fuertemente la probabilidad de ocurrencia de daños, debido a factores como una menor cantidad de componentes, los sistemas de refrigeración pasiva, etc. Los últimos

actúan tanto durante la operación normal como en caso de accidente, lo cual aumenta la eficiencia de la evacuación del calor del núcleo del reactor.

Respecto de los accidentes producto de eventos ajenos a la central, los SMR incluyen barreras capaces de resistir impactos de aeronaves, fenómenos naturales, entre otros.

Las aplicaciones de estos reactores son varias, ya que sirven no solo para la generación de energía eléctrica, sino también para cogenerar calor. Esta es una de las principales aplicaciones en el contexto del aumento mundial de la demanda de energía, pues permite la cogeneración junto con las energías renovables. Con esto se consigue, además, una mayor eficiencia en la utilización del combustible, lo que influye en una gran reducción de la emisión de CO<sub>2</sub>. El calor generado por estas centrales se puede utilizar para la calefacción de ciudades, domicilios, la alimentación de plantas para desalinización de agua de mar y la producción de hidrógeno.

En cuanto al factor económico más competitivo de los SMR, Durán Vinuesa *et al.* (2022) analizan el papel del costo nivelado de energía o LCOE (Levelized Cost of Energy) como una medida del costo total de construcción y operación de una instalación de generación durante su vida útil, expresado en euros/MWh (o en USD/MWh). De acuerdo con la autora y los autores, el último informe conjunto de la Agencia Internacional de la Energía sobre competitividad energética con bajas emisiones de CO<sub>2</sub> muestra que los bajos costos de la electricidad, en comparación con otras fuentes de energía, colocarán a la energía nuclear en una posición económicamente favorable.

Aunque siguen siendo los países más poderosos los que están desarrollando esta nueva tecnología, las características de los SMR los hace viables

para países pequeños que no pueden acceder presupuestariamente a las grandes centrales para generación de energía.

En la actualidad, existen más de 80 diseños en desarrollo que corresponden a 18 Estados miembros del OIEA. Se han alcanzado hitos importantes, como la unidad de energía flotante Akademik Lomonosov en la Federación Rusa, que se conectó a la red en diciembre de 2019 y comenzó su operación comercial en mayo de 2020. Por su parte, en China se encuentra el ACP100 en etapa de diseño. Por otro lado, el NuScale, en los Estados Unidos, recibió la aprobación de la Nuclear Regulatory Commission (NRC), pero aún no está en construcción (IAEA, 2022). A estos proyectos, se suma el CAREM-25, de la Argentina, el cual será descrito a lo largo del trabajo. A continuación, analizaremos brevemente los de origen chino y estadounidense.

### 2.2.1 ACP100

Se trata de un diseño PWR, realizado por la Corporación Nuclear China y preparado para generar una potencia eléctrica de 125 MWe. Adapta sistemas de seguridad pasiva para hacer frente a posibles accidentes. La convección natural es utilizada para enfriar el reactor, lo cual permite la instalación de los principales componentes del circuito primario dentro de la vasija de presión. Sus posibles usos son la producción de electricidad, calefacción, vapor o la desalinización de agua de mar y es adecuado para áreas remotas que tienen opciones de energía o infraestructura industrial limitadas (IAEA, 2022).

**Figura 3. Esquema del SMR ACP100**



Fuente: Foro Nuclear (2022)

## 2.2.2 NuScale Power Module (NPM)

Pequeño reactor de agua a presión (PWR) enfriado por agua liviana, creado por la empresa estadounidense NuScale Power Corporation. Sus plantas son escalables y se pueden construir para acomodar una cantidad variable de módulos para satisfacer las demandas de energía solicitadas. Las plantas estándar incluyen la VOYGR4 de 308 MWe, la VOYGR 6 de 462 MWe y la VOYGR12 de 924 MWe. Una configuración de seis módulos es el tamaño de planta de referencia para las actividades de licencia y de planta estándar. Cada NPM es un módulo autónomo que funciona independientemente de los demás módulos en una configuración de varios módulos. Todos los módulos se gestionan desde una única sala de control. Los posibles usos son la producción de electricidad y la cogeneración de calor y electricidad (IAEA, 2022).

Figura 4. Esquema del SMR NuScale



Fuente: [https://www.foronuclear.org/wp-content/uploads/2022/02/Monografia\\_reactores-\\_modulares\\_pequenos-002.pdf?x13653](https://www.foronuclear.org/wp-content/uploads/2022/02/Monografia_reactores-_modulares_pequenos-002.pdf?x13653)

# 3

## El sector nuclear argentino y los reactores de potencia

Argentina inicia su proceso de industrialización en la primera mitad del siglo xx, hecho que puso en debate el abastecimiento de energía, en el cual las Fuerzas Armadas mostraban su preocupación por la dependencia del carbón británico.

En 1948, llegó al país el físico austríaco Ronald Richter, quién convencería al entonces presidente Juan Domingo Perón de que podía lograr el dominio de la fusión nuclear controlada y, de esta manera, obtener una fuente ilimitada de energía. Atendiendo a estas intenciones, el 31 de mayo de 1950 se creó la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) con el objetivo de promover el desarrollo pacífico de la energía nuclear, además de estudiar temas como nucleoelectricidad y radioquímica.

La CNEA fue puesta bajo la órbita de las Fuerzas Armadas, y Richter fue designado como su director, además de quedar a cargo de los laboratorios de la isla Huemul, en San Carlos de Bariloche. Al año siguiente, el físico anunció que había logrado una fusión controlada, lo que fue aprovechado por Perón para comunicarlo al mundo. Sin embargo, la falta de pruebas suficientes hizo que el gobierno creara una comisión de científicos argentinos, entre ellos se encontraba el Dr. José Antonio Balseiro para que evaluara la veracidad o no de la afirmación de Richter. El dictamen de la comisión sería

lapidario en sus conclusiones: todo había sido una farsa. Finalmente, en noviembre de 1952, el proyecto de la isla Huemul sería desmantelado. Sin embargo, los equipos adquiridos y las aspiraciones nucleares no serían dejados de lado<sup>7</sup>.

Una vez finalizada la Segunda Guerra Mundial, luego de las explosiones nucleares de Hiroshima y Nagasaki en 1945 y de que aumentarían las tensiones que darían comienzo a la Guerra Fría y la amenaza nuclear, en 1953, el presidente estadounidense Eisenhower lanzó el programa «Átomos para la Paz», cuyo objetivo era el uso pacífico de la energía nuclear. Mediante este programa, además, los Estados Unidos comenzaría a ofrecer reactores nucleares al mundo.

En 1954 se crea, dentro de la CNEA, la División de Metalurgia, que fue puesta al mando del tecnólogo Jorge Sábato<sup>8</sup>. El objetivo era el desarrollo de materiales en el país y la solución de aquellos problemas vinculados con la industria. Este hecho resultaría fundamental al momento de la fabricación de los combustibles nucleares<sup>9</sup>.

En 1957, el contraalmirante Quihillalt (por entonces presidente de la CNEA) consiguió, en los Estados Unidos, los planos de un reactor que había sido desarrollado en el Argonne National Laboratory de Chicago. Con ese plano comenzaría la construcción del primer reactor de investigación nacional. Este hecho diferenció a la Argentina del resto de las naciones en desarrollo, muchas de las cuales los habían comprado «llave en mano». Con este hecho, nuestro país iniciaba un accionar conocido como la «apertura del paquete tecnológico», mediante el cual la CNEA elegiría los componentes

---

7 Para más información sobre el proceso de la isla Huemul, véase Mariscotti (1985) y Hurtado (2014).

8 Sobre la metalurgia en CNEA, ver Zappino (2022c).

9 Sobre el ciclo del combustible nuclear, ver Zappino (2022c, 2022d).

del reactor que pudieran ser desarrollados por la industria argentina, fomentando así la participación científica y el crecimiento industrial local. Como consecuencia de esta política, el reactor conocido como RA-1, que se instaló en el Centro Atómico Constituyentes (CAC) y que sería el primer reactor de investigación de América Latina, alcanzó su máxima potencia el 17 de enero de 1958. En su construcción, participaron 32 empresas nacionales. Además, la CNEA desarrolló innovaciones en los combustibles originales, luego patentadas, que llevaron a la primera exportación de combustibles nucleares a la entonces República Federal Alemana<sup>10</sup>.

A medida que crecía la demanda de energía como consecuencia del proceso de industrialización sustitutiva, se hacía necesario una diversificación de las fuentes de la matriz energética. Esta necesidad llevaba directamente a la posibilidad de contar con una central nuclear de potencia. Además, ingresar en esa etapa era visto como una oportunidad para que los aprendizajes científicos y tecnológicos alcanzados por la CNEA pudieran derramarse en la industria local. En este sentido, en 1963 se creó el Comité para el Estudio de Factibilidad de Centrales Nucleares, el cual tuvo como objetivo realizar los estudios de factibilidad para la instalación de la mencionada central.

Uno de los principales temas de debate era el que se relacionaba con el tipo de combustible a emplear en las centrales nucleoelectricas. La decisión de comenzar a producir los elementos combustibles (EECC) dentro del país —para evitar su importación— tuvo un gran impacto en el aspecto económico. La decisión que faltaba era si la tecnología iba a ser uranio enriquecido y agua liviana o uranio natural y agua pesada. El primero contaba con un diseño más económico, pero la desventaja era el

---

<sup>10</sup> Luego del RA-1, siguieron el RA-0 en 1960, el RA-2, en 1966 y el RA-3 en 1967, todos construidos íntegramente en el país, cada vez con una mayor cantidad de proveedores industriales locales. Para más información sobre los reactores de investigación argentinos, véase De Dicco (2013) y Zappino (2022a).

abastecimiento externo, ya que la Argentina no dominaba la tecnología de enriquecimiento de uranio en ese momento, proceso que, además, implicaba una fuerte inversión de capital<sup>11</sup>. Finalmente, la primera central nuclear de potencia Atucha I (CNA I) sería puesta en funcionamiento el 13 de enero de 1974. Posteriormente, se construirían la Central Nuclear de Embalse (CNE), puesta a crítico en enero de 1984, y la Central Nuclear Atucha II (CNA II), que se comenzó a construir en 1981, fue paralizada en 1994 y puesta a crítico el 3 de junio de 2014, luego de que el presidente Néstor Kirchner ordenara la reanudación de su construcción en 2006<sup>12</sup>.

---

11 Sobre la historia de la fabricación del combustible nuclear en la Argentina, véase Zappino (2022c). Sobre el enriquecimiento de uranio en Argentina, véase Santos (2022).

12 Para más información sobre la construcción de las tres centrales nucleares argentinas, véase Zappino (2022a).

# 4

## El CAREM-25

### 4.1 Orígenes del proyecto

En el apartado anterior, hemos visto cómo la Argentina tomó la decisión de comenzar a producir energía eléctrica a partir de sus propias centrales nucleares. Estas tenían una gran participación nacional, pero los diseños eran extranjeros y provenían de Alemania (CNA I y CNA II) y Canadá (CNE)<sup>13</sup>. Además, desde 1958, el país había construido varios reactores de investigación y producción de radioisótopos para uso nacional, y exportaba, a la vez, este tipo de reactores a diversos países, como Argelia, Australia, Egipto y Perú, entre otros<sup>14</sup>.

En 1979, mediante el Decreto 302/1979, se aprobó la construcción de cuatro centrales nucleoelectricas (del orden de los 600 MWe de potencia cada una) del tipo PHWR (por su sigla en inglés [*Pressurized Heavy-Water Reactor*]). Durante los años ochenta, la CNEA y la Empresa Nuclear Argentina de Centrales Eléctricas S.A. (ENACE S.A.)<sup>15</sup> planificaron el diseño

---

13 Para más detalles sobre la construcción de las centrales nucleares de potencia argentinas, ver Zappino (2022a).

14 Para más información sobre reactores de investigación argentinos, ver De Diccó (2013).

15 ENACE S.A. fue una empresa mixta con mayoría estatal, creada en la Argentina en 1980 para la construcción de centrales nucleares eléctricas. Tuvo a su cargo la obra de Atucha II. Fue disuelta en los años noventa en el marco de las privatizaciones.

y la construcción de nuevos reactores nucleares de potencia. En este marco se planteó el desarrollo de los siguientes proyectos:

- En 1983, la CNEA desarrolló el concepto CAREM, un reactor de baja potencia (en principio de 15 MWe) para el suministro de electricidad a regiones aisladas. El proyecto fue presentado en público por primera vez al año siguiente, en el marco de una conferencia realizada por el OIEA en Lima, Perú, y posteriormente se contrató la ingeniería y construcción de varias instalaciones de soporte al diseño con INVAP<sup>16</sup> junto con la participación activa de profesionales de la CNEA.
- En 1983, la CNEA realizó un estudio de factibilidad para construir una central nucleoelectrica de 600 MWe de potencia del tipo PHWR (tecnología tubos de presión) de características similares a la CNE.
- En 1985, la CNEA inició los estudios de preingeniería para actualizar la ingeniería conceptual y básica de una central nucleoelectrica de 700 MWe del tipo PHWR.
- En el bienio 1986-1987, ENACE S.A., a pedido de la CNEA, elaboró y completó la ingeniería conceptual y básica del Proyecto ARGOS PHWR 380, una central nucleoelectrica de 380 MWe de potencia, que compartía características similares a la CNA I y la CNA II.

A excepción del CAREM, los restantes proyectos fueron cancelados durante la presidencia de de Raúl Alfonsín (De Dicco, 2015).

Los orígenes del proyecto del CAREM-25 se ubican a principios de los años ochenta. En ese momento, la CNEA decidió poner en marcha un diseño propio para un reactor nuclear de potencia. El primer hito se produjo en junio de 1997, en el Complejo Tecnológico Pilcaniyeu (CTP), cuando el reactor

---

16 Sobre INVAP S.E., véase Zappino (2021a, 2021b).

experimental RA-8<sup>17</sup>, diseñado y construido por INVAP para la CNEA, alcanzó su primera criticidad. El propósito principal de este reactor era su utilización como facilidad crítica para pruebas del prototipo CAREM-25.

En un trabajo para la Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias (AAPC), Gil Gerbino (2022) analiza los orígenes del proyecto. Allí describe que, el entonces presidente de la CNEA, el contraalmirante Carlos Castro Madero le pidió al presidente de INVAP, el Dr. Conrado Varotto, analizar la posibilidad de desarrollar un reactor que permitiera incluir propulsión nuclear en un submarino nacional. En efecto, Varotto derivó la tarea a un grupo mixto de CNEA e INVAP que se constituyó en el CAC. Este equipo realizó, en menos de un año, el bosquejo de un reactor nuclear que respetaba las dimensiones del casco de un submarino.

Cuando asumió el gobierno de Alfonsín en 1983, el proyecto comenzó a ser analizado en detalle por el Ministerio de Defensa. En ese momento, el grupo de estudio comenzó a observar que el reactor operando a baja potencia podía refrigerarse por convección natural sin necesidad operar las bombas del primario, una fuente importante de ruido. De esta manera, surgió la idea de construir un reactor que operara totalmente por convección natural. Sin embargo, esta tecnología llevaba a que el reactor solo pudiera generar una muy baja potencia para los estándares de la época. Pero una de las ventajas que veían era que los márgenes de seguridad eran muy superiores a los reactores convencionales, debido a que su diseño incluía los generadores de vapor dentro del recipiente de presión (RPR), con lo cual no necesitaba bombas de refrigeración y era autopresurizado. De esta manera, nació el concepto CAREM que, aunque el tamaño requerido

---

17 El objetivo del RA-8 fue realizar verificaciones de cálculo neutrónico aplicables al diseño del reactor de potencia CAREM-25 y testear la calidad de diseño de los EECC y del diseño del núcleo. Estuvo operativo entre 1997 y 2001 (De Dico, 2013).

para la convección natural lo hacía imposible de instalar en un submarino, podía ser utilizado para la generación de energía eléctrica.

A fines de 1984, la CNEA e INVAP enviaron especialistas a la OIEA para asistir a un seminario sobre SMR<sup>18</sup>. Mientras esto ocurría, INVAP avanzaba en la ingeniería conceptual y comenzaba a generar proyectos de validación experimental. Con este fin, fueron firmados varios contratos para el desarrollo de la ingeniería básica y para la construcción de dispositivos experimentales. El principal fue el armado de una facilidad crítica llamada RA-8 para estudiar el efecto de los venenos quemables (incluidos en las barras combustibles)<sup>19</sup> en la reactividad del reactor, los coeficientes de seguridad y los límites de concentración de boro en el moderador. Estos ensayos permitieron verificar y ajustar los cálculos neutrónicos. Por otro lado, se crearía el Laboratorio de Ensayos Termohidráulicos con circuitos de agua de alta presión y temperatura, el cual tenía como objetivo el estudio y análisis de la estabilidad de la refrigeración por convección natural, los coeficientes de vacío a la salida del núcleo y otros conceptos innovadores que luego caracterizarían al CAREM-25.

En diciembre de 1999, se aprobó la Ley 25.160 para el financiamiento del proyecto CAREM, mediante la que se establecían los mecanismos básicos para financiar la fase ejecutiva de la construcción del prototipo con una inversión de 132 millones de pesos. Finalmente, esto no fue llevado a la práctica, pero ayudó a darle visibilidad política e institucional al proyecto.

Resulta claro que, desde un principio, el CAREM-25 era visto como integrante principal de un plan nuclear nacional y como fomento clave de una industria

---

18 En ese momento, la sigla significaba *Small and Medium Reactors*. Más adelante, se modificaría *Medium* por *Modular*.

19 Trataremos este tema más adelante, en el apartado 5 sobre los combustibles del CAREM.

nuclear nacional con orientación exportadora. En efecto, INVAP llevaría adelante una difusión internacional del proyecto al presentarlo en varios países, entre ellos Turquía, Perú, Argelia, Egipto, Irán, Cuba, Checoslovaquia, Tailandia, Siria e Indonesia. En su momento, estas presentaciones lograron una amplia repercusión, ya que, por ejemplo, en el caso de Turquía, se llegó a formar una empresa binacional para la construcción conjunta de un prototipo en la Argentina y otro en Turquía (Gil Gerbino, 2022).

En un reportaje realizado por la Asociación de Jóvenes Nucleares Argentinos, el ingeniero Juan Pablo Ordoñez, presidente del directorio de INVAP y uno de los integrantes del equipo de diseño del CAREM, brinda algunos detalles de los orígenes del proyecto:

En ese momento, estábamos trabajando en un proyecto que se canceló y quedamos sin rumbo, sin objetivo. Entonces, empezamos a investigar ideas, y una de las cosas que empezamos a pensar fue cómo sería un reactor nuclear si hubiera que empezar a diseñarlo de cero. Los primeros reactores tenían muy pocos sistemas de seguridad y se les fueron sumando sistemas de seguridad al diseño en una forma un poco parche. Y ahí fue donde diseñamos el CAREM. Comenzamos a pensar que tendría que tener sistemas de seguridad pasivos, características de diseño que lo hicieran menos propenso a tener accidentes, que si metíamos todo dentro de un mismo recipiente entonces no se podía romper ninguna cañería y, por lo tanto, no hay accidente de pérdida de refrigerante. Si funciona por convección natural, entonces no hay una bomba que se pueda parar y no hay un accidente de pérdida de caudal, y así fuimos mirando cuáles eran los eventos iniciantes y viendo cómo, por diseño y no por sistemas de seguridad que actuaran, se podían tener en cuenta. Y ahí llegamos al diseño del CAREM, que, como contrapartida a tener esta seguridad, tenía una potencia muy baja. Hoy, el ACP100 presenta características similares a las que postulamos nosotros,

pero a una potencia mucho más alta. Y tan mal no lo hicimos, porque los principios de diseño que elegimos para el CAREM son esencialmente los mismos que mantiene el proyecto, y son los mismos principios que la mayoría de los reactores de III Generación+ han adoptado como base (Argentine Youth Nuclear Generation AYNG, 2016).

Sobre las novedades del nuevo diseño, el ingeniero Aníbal Blanco, asesor y vocero de la Gerencia de Articulación Institucional de la CNEA, explica:

En los años ochenta, hubo un auge de la construcción de reactores de potencia cada vez más grandes con una potencia cada vez mayor. Aparece, en ese momento, el diseño de un reactor pequeño, menos de la décima parte de los reactores que estaban funcionando en ese momento. Y ese diseño traía consigo varias novedades: convección natural, la integración de los generadores de vapor en el RPR, la autopresurización, también integrada al RPR, nuevos sistemas de control de las barras, etc. (Comunicación personal, 15 de diciembre de 2022).

Asimismo, sobre la seguridad y la importancia del proyecto en lo que respecta a la crisis del cambio climático, la actual presidenta de la CNEA, la doctora Adriana Serquis, afirma:

Cuando comenzó a desarrollarse el CAREM en la Argentina, se lo pensó como una gran variante tecnológica que podía garantizar sobre todo el tema de la seguridad pasiva intrínseca en la cual están basados los sistemas del reactor. Pero no se vislumbraba el tema del cambio climático ni la importancia de poner en agenda que la energía nuclear es parte de la solución para las transiciones energéticas necesarias hacia sistemas energéticos libres de emisiones de dióxido de carbono. Entonces, es necesario que, a pesar de que muchos movimientos abogan solamente por energías renovables, como

pueden ser la solar o la eólica, no se van a poder cubrir todas las necesidades que en un tiempo razonable necesita el mundo para transicionar desde los combustibles fósiles hacia esas energías renovables. Y, por otro lado, las energías renovables no nos garantizan con sus ciclos de funcionamiento y su intermitencia natural el tener la cantidad de energía necesaria en los momentos que necesita ser consumida (Comunicación personal, 7 de diciembre de 2022).

Hasta 1999, el proyecto estuvo en manos de INVAP con la permanente supervisión de CNEA. Sin embargo, durante esos años, el desmantelamiento del sistema de ciencia y tecnología, la reducción o retiro de presupuesto y la pérdida de recursos humanos provocó que el proyecto siguiera solamente por el empecinamiento del personal que quedaba y que siguió aportando conocimiento y valor a la empresa.

El estado de situación del proyecto hacia 2001 registraba la consolidación de la ingeniería conceptual y básica del reactor, la realización de ensayos de caracterización de los componentes críticos y avances en los aspectos de seguridad nuclear. En 2002<sup>37</sup>, si bien se detecta la continuidad de ciertas actividades de desarrollo y modelado, en términos generales, el ritmo del Proyecto CAREM-25 disminuyó drásticamente (De Dicco, 2015). La crisis económica y social terminó por ahogar el proyecto y, en 2001, fue abandonado por las autoridades.

Al asumir el gobierno de Néstor Kirchner en 2003, el Ministerio de Planificación Federal promueve la recuperación de las capacidades tecnológicas y de gestión del Proyecto CAREM-25. Entre ese año y 2005 se dio continuidad a las evaluaciones y los estudios del proyecto, al desarrollo e implementación de una metodología de optimización del diseño considerando aspectos de seguridad, la preparación de ensayos

de comportamiento dinámico de los EECC, la actualización de costos del prototipo, y se avanzó en la ingeniería y provisión de componentes del circuito de alta presión para ensayo de mecanismos.

En agosto de 2006 se firmó el Decreto 1107/2006 que declaraba de interés nacional la construcción y puesta en marcha del prototipo reactor CAREM-25 para la generación nucleoelectrónica. Durante 2006 y 2007 se recuperó y clasificó la información de ingeniería.

La expresidenta de la CNEA, la licenciada Norma Boero, el 12 de julio de 2011 firmó la escritura que formalizaba la «transferencia de dominio y constitución de servidumbre de tránsito de Nucleoelectrónica Argentina Sociedad Anónima a favor del Estado Nacional Argentino, Comisión Nacional de Energía Atómica». Los trabajos de recuperación habían empezado en 2009, cuando la CNEA le asignó el predio al Proyecto CAREM, pero fue necesario el traspaso formal para que la institución pudiese presentar la documentación ante los distintos organismos (como la ARN o el OPDS).

Hacia mediados de 2008, el licenciado Heriberto José Boado Magan asumió la Gerencia CAREM, quien venía de trabajar durante varios años en el OIEA, en Viena (llegó a CNEA en 2007 y fue durante casi un año gerente de Relaciones Institucionales antes de asumir en el CAREM). Al año siguiente, se inició la ingeniería civil del proyecto, la preparación del informe preliminar de seguridad y se firmó un convenio con la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) para la ejecución del estudio de impacto ambiental. Además, se continuó la fabricación del prototipo de los EECC para validar su ingeniería, y se efectuó un convenio con la empresa Combustibles Nucleares Argentinos S.A. (CONUAR S.A.) para su desarrollo y la adquisición del equipamiento necesario para la fabricación de las pastillas de combustible.

En 2009, comenzó la construcción del edificio para el simulador de la sala de control en el Centro Atómico Bariloche (CAB) y, a fines de ese año, se promulgó la Ley 26.566 que regulaba el Plan Nuclear Argentino. La inclusión del Prototipo CAREM-25 en esta norma fortaleció el proyecto y lo colocó en la planificación estratégica de la CNEA, lo cual abrió la posibilidad de un régimen de exenciones impositivas y beneficios especiales.

Ese mismo año, la CNEA remitió a la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) el *Manual de Calidad de la Gerencia de Área CAREM-25* y el *Informe preliminar de seguridad (IPS)*, ambos imprescindibles para la obtención de la licencia de construcción.

En 2010, la ARN aprobó un esquema para el licenciamiento de prototipos destinado a nuevos diseños de reactores nucleares. Al año siguiente, se completó la ingeniería básica del reactor y la ingeniería de detalle de la obra civil, y se determinaron las especificaciones técnicas del RPR. Al mismo tiempo, se concluyeron las pruebas de prototipo de elemento combustible (EC) y se iniciaron los ensayos de vibraciones y desplazamientos para evaluar su comportamiento dinámico en condiciones similares a las presentes en el reactor. Se desarrollaron y fabricaron las vainas y pastillas combustibles de uranio enriquecido y de uranio con gadolinio para su utilización en las barras combustibles experimentales que se enviarían a irradiar en el reactor de Halden de Noruega. Por último, CNEA entregó el estudio de impacto ambiental a las autoridades de la Provincia de Buenos Aires (De Dicco, 2015).

Al año siguiente, finalizó la ingeniería básica de los EECC y de las barras de control. Además, se completó el diseño del RPR y la ingeniería de detalle de los generadores de vapor. Por otro lado, se llevaron las pastillas

combustibles al reactor de Halden para ser sometidas a las pruebas de comportamiento bajo irradiación.

En 2013, comenzó el análisis de las opciones para el proyecto de transmisión con la Compañía Administradora del Mercado Eléctrico Mayorista S.A. (CAMMESA)<sup>20</sup> y Transba S.A.<sup>21</sup>, la contratación de las ingenierías conceptuales para la turbina del reactor y otros temas relativos al diseño (Baschar, 2014). Por otro lado, y con el objetivo de cumplir con el mínimo de 70 % de integración de componentes nacionales, comenzaron a firmarse contratos con varias empresas de la cadena de valor de la CNEA, como INVAP, CONUAR S.A. y Dioxitek S.A., y con la red de empresas nacionales pertenecientes a las industrias metalúrgica y metalmeccánica. Ese año también se adjudicó la construcción del RPR a la empresa IMPSA.

Finalmente, en enero de 2014, inició la obra civil con el vertido del primer hormigón estructural del edificio del reactor. En octubre, la CNEA traspasó a CONUAR S.A. el desarrollo propio de los procesos de fabricación de las pastillas combustibles y se aprobó la especificación técnica de los forjados principales del RPR presentada por IMPSA.

En relación con las obras civiles, en agosto de 2015, continuó el hormigonado con hormigón H40, certificado por el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) en el nivel 12,7 metros de profundidad. Se trató del primer hormigonado en la zona de la isla nuclear. También en agosto culminó la negociación del cronograma definitivo de la ingeniería del RPR, y a fines

---

20 Es el organismo encargado del despacho del Sistema Argentino de Interconexión (SADI) y entre sus funciones principales se encuentra coordinar la operación de los generadores, transportistas y demandantes de energía eléctrica para maximizar la seguridad de la operación y la economía del despacho (<https://cammesaweb.cammesa.com/>).

21 Concesionaria del servicio de Transporte de Energía Eléctrica por distribución troncal en la provincia de Buenos Aires (<https://www.transba.com.ar/>).

de ese mes se negoció el cronograma definitivo de la provisión completa (De Dicco, 2015).

## 4.2 Características de seguridad y funcionamiento

El CAREM-25 representa el primer reactor nuclear de potencia diseñado y construido totalmente en la Argentina. Su concreción establece un nuevo logro en la capacidad nacional para el desarrollo y la puesta en marcha de centrales nucleares de potencia, capacidad lograda en más de 70 años de investigación y desarrollo de la CNEA. Este proyecto sitúa al país a la vanguardia en el mercado de los SMR.

El edificio principal tiene una superficie de 18.500 m<sup>2</sup>, de los cuales 14.000 m<sup>2</sup> corresponden al edificio del reactor denominado «módulo nuclear» que, además, incluirá la estructura de contención, la sala de control y los sistemas de seguridad y operación. Cómo se aclaró oportunamente, su construcción comenzó en 2014 y actualmente es el único de su categoría en estado de construcción en el mundo.

A continuación, resumiremos sus principales parámetros técnicos (Comisión Nacional de Energía Atómica [CNEA], 2022):

- Potencia instalada: térmica de 100 MWt y eléctrica de 32 MWe
- Tipo de combustible: uranio enriquecido (3,1 % y 1,8 %) y 61 EECC de sección hexagonal<sup>22</sup>
- Refrigerante y moderador: agua liviana

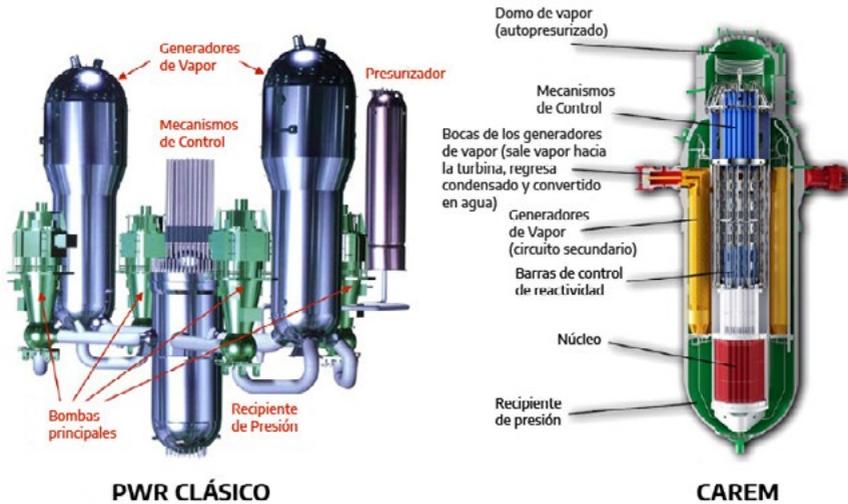
---

<sup>22</sup> Este tema se desarrolla extensamente en el apartado 5, correspondiente al combustible del CAREM.

- Tipo de reactor: reactor modular pequeño (SMR) y reactor de agua a presión (PWR)
- Vida útil: 40 años
- Seguridad:
  - ◇ defensa en profundidad y
  - ◇ sistemas pasivos de seguridad
- Estándares nacionales e internacionales
- Diseño innovador: sistema Integrado
- Modularización: permite incrementar la capacidad eléctrica. Los reactores comparten infraestructura y equipamiento
- Desarrollo nacional: el 70 % de los materiales, componentes y servicios son provistos por empresas nacionales

En la Figura 5 se comparan un reactor PWR convencional y el CAREM-25.

Figura 5. Comparación entre un reactor PWR convencional y el CAREM



Fuente: Alonso (2022)

## 4.2.1 Principales características de funcionamiento y operación del CAREM

### 4.2.1.1 Generación de energía nucleoelectrónica y calor

Este tipo de reactores resulta sumamente apto para el abastecimiento eléctrico de zonas alejadas de los grandes centros urbanos y cuya cantidad de habitantes hace que el transporte de la energía generada por las grandes centrales ubicadas en otros puntos del país (nucleares, hidroeléctricas, térmicas, etc.) encarezca sensiblemente el costo de la electricidad (CNEA, 2023). De esta forma, es posible descentralizar la generación creando

redes cuasi independientes del sistema interconectado. Además, aparecen como fuentes de generación ideales para parques industriales con alto consumo de energía. De esta manera, se puede diferenciar el consumo industrial del doméstico. Ofrecen también prestaciones, como la provisión de vapor para diversos usos industriales, o la alimentación de plantas de desalinización de agua de mar (instalaciones que demandan un consumo eléctrico alto y constante).

El prototipo CAREM-25 será capaz de generar una potencia eléctrica superior a los 32 MWe, lo que permitiría abastecer, por ejemplo, a una población de unos 120.000 habitantes.

La relativa simpleza del diseño de este reactor lo vuelve ideal para países que estudian dar sus primeros pasos en materia de nucleoelectricidad o bien para regiones que buscan incorporar cantidades relativamente bajas de energía eléctrica.

#### **4.2.1.2 Tamaño pequeño**

Respecto del tamaño del CAREM, Blanco explica:

Un reactor compacto, con un sistema de refrigeración por convección natural, no es algo extraño para los reactores de investigación, pero sí lo es para los reactores de potencia, ya que la misma potencia exige que la convección sea ayudada por motores externos que impulsan el agua de refrigeración, cualquiera sea. El reactor de investigación argentino RA-6 funciona con un sistema de convección natural (Comunicación personal, 15 de diciembre de 2022).

### 4.2.1.3 Sistemas pasivos de seguridad

Estos sistemas hacen que los circuitos no requieran alimentación eléctrica externa. Sobre este tema, el ingeniero Ignacio de Arenaza, Gerente de Ingeniería del Proyecto CAREM, aclara:

Estos sistemas de seguridad hacen que el reactor sea inherentemente más seguro, porque no necesita de sistemas externos activos para —en algún caso de evento de pérdida de refrigerante, de pérdida de energía o algo que no permita controlar el reactor— asegurar las funciones básicas de seguridad como extinguir el reactor, mantenerlo apagado y refrigerado. Lo que queda integrado es el sistema primario. Normalmente, ese sistema primario está impulsado por bombas, hace pasar el agua por el núcleo, la saca del reactor, la hace circular por un generador de vapor y la devuelve al reactor. En el CAREM-25 están integrados dentro del reactor los 12 generadores de vapor. Al tenerlos integrados dentro del RPR, podemos hacer que el primario nunca salga del reactor. En realidad, sale del reactor, pero por motivos de purificación, control de química del agua, extracción de algún producto de fisión y para control de volumen, pero no para operar y para generar vapor (Comunicación personal, 25 de enero de 2023).

Y sobre aspectos de la redundancia en seguridad, afirma:

En los sistemas de seguridad hay redundancias, es decir, otro sistema idéntico que cumple la misma función. Y, en los casos en que no es posible tener una redundancia, existen sistemas diversos, es decir, otro sistema que cumple la misma función, pero con una tecnología diferente. Por ejemplo, para lo que sería el sistema de extinción del reactor, tenemos un primer sistema de extinción que consiste en las barras que ingresan y absorben los neutrones. Si por algún motivo eso llegara a fallar porque las barras, o

algunas de ellas, se traban (aunque es poco probable), existe un segundo sistema de extinción que inyecta una solución de ácido bórico que se disuelve en el sistema primario y con eso se controla la actividad, puesto que el boro también es un elemento absorbedor de neutrones. Todos los sistemas de seguridad, que apagan y mantienen refrigerado el reactor y que reponen inventario de agua, son pasivos, no necesitan energía eléctrica (Comunicación personal, 25 de enero de 2023).

A su vez, Blanco amplía el concepto:

Como comparación, las perforaciones más grandes del reactor de la CNA I y de la CNA II son la salida del circuito primario, que van justamente hacia el generador de vapor y donde uno de los eventos posibles es una rotura de esos caños gigantes de salida del RPR. Eso no existe en el CAREM-25, porque no hay salida del circuito primario. Entonces, se reducen las perforaciones del RPR con el circuito secundario adentro y el sistema de control integrado. Esto significa una serie de mejoras que lo hacen mucho más seguro. Ante un evento, el sistema apaga el reactor por indicaciones de diseño. Sin embargo, el reactor sigue caliente pues existe un calor residual que queda en el núcleo y que sigue calentando el agua. Esa agua seguirá circulando por convección natural, pero como ya es de circulación natural, el reactor tiene menos potencia para generar. Finalmente, esto produce que el reactor se refrigere, que se vaya enfriando por mucho más tiempo y más lentamente, es decir, dando tiempo a que los operadores o los sistemas auxiliares tengan más tiempo de actuación (Comunicación personal, 15 de diciembre de 2022).

#### 4.2.1.4 Integración de componentes

El concepto de *integración* que caracteriza al CAREM-25 se refiere a que en el circuito primario, los mecanismos de control de la fisión nuclear y la parte

del circuito secundario dedicada a la generación del vapor se encuentran contenidos en el RPR, que es una gran «vasija» diseñada para trabajar a alta temperatura y presión, y que, a su vez, es rodeada por una gruesa estructura de hormigón y acero que actúa como contención y blindaje, lo que lleva prácticamente a cero la posibilidad de escape al exterior (como poseen casi todas las centrales nucleares del mundo). La integración también abarca los innovadores mecanismos hidráulicos que accionan las barras de control y los generadores de vapor e intercambiadores de calor que forman parte del circuito secundario y tienen la función de convertir el agua que circula a través de ellos en vapor. Este desarrollo es muy novedoso porque, en general, los mecanismos de control son electromagnéticos y, por eso, no pueden estar dentro de un ambiente húmedo como lo es el interior de un recipiente de presión.

Esta integración genera varias ventajas, entre las que se destaca la reducción significativa de caños y otras conexiones hacia el exterior del RPR (la mayor penetración del RPR tiene un diámetro de 38 mm), lo que, en consecuencia, minimiza la posibilidad de ocurrencia de sucesos, como la pérdida de refrigerante, asociados habitualmente a las roturas de cañería. De Arenaza amplía el tema:

Se minimiza o reduce la cantidad de penetraciones al RPR, es decir, si existen 25 mecanismos, estos implican 25 agujeros menos que hay que hacer y por los cuales podría producirse alguna rotura. Otra ventaja es que se elimina un accidente típico que es el accidente de eyección de barra, es decir, si se produce una despresurización repentina que extrae las barras del núcleo. El CAREM-25 no está conectado a la atmósfera, con lo cual no se puede producir esa despresurización. Resumiendo, la frecuencia de daño del núcleo es más baja comparada con el hecho de tener mecanismos convencionales. El hecho de que funcione por convección natural hace

que nosotros tengamos que desfasar la fuente de calor, que es el núcleo, con lo que enfría el primario, que son los generadores de vapor y están arriba. Entonces, esa diferencia de alturas es lo que proporciona la fuerza boyante para que la convección pueda funcionar. Esto hace que tengamos un RPR grande para la potencia que tenemos, pero también redundante en otra ventaja y es que disponemos de una cantidad de agua adentro del recipiente que nos da muchísimo tiempo para actuar también en caso de algún evento de pérdida de refrigerante. Si se rompe un caño y se empieza a liberar vapor, al tener tanta agua dentro del primario, contamos con mucho tiempo hasta que el núcleo se empiece a descubrir. Sin embargo, todo esto tiene probabilidad de ocurrencia ínfima, menos de una vez en un millón (Comunicación personal, 25 de enero de 2023).

#### 4.2.1.5 Operación de las barras de control

El CAREM-25 posee dos conjuntos de barras: uno que actúa durante la operación (sistema de ajuste y control) insertando o retirando el material absorbente según la necesidad de subir o bajar la potencia del reactor; y otro que actúa solo en caso de que sea necesario «apagar» el reactor: son barras que caen por gravedad y que detienen completamente la reacción nuclear (sistema de extinción rápida). Sobre este mecanismo, De Arenaza explica:

En cuanto a la integración, en CAREM-25 se ha llegado a un punto que no lo tienen todos los demás SMR, que es integrar también en el RPR los mecanismos de control. Entonces, todas las barras, ya sean de extinción o de control, están comandadas por mecanismos hidráulicos que están en la parte superior del mismo. Es decir, no están del lado de afuera como en las centrales convencionales (Comunicación personal, 25 de enero de 2023).

#### 4.2.1.6 Autopresurización

La integración de componentes en el RPR hace que no sea necesario utilizar dispositivos de acción externa como bombas (como se dijo, el agua se desplaza dentro del RPR por convección natural) o presurizadores (ya que el CAREM-25 es autopresurizado, es decir que trabaja a alta presión para evitar que el agua hierva, a pesar de que su temperatura supera los 300 °C). El circuito secundario es refrigerado mediante otro circuito independiente compuesto por agua de una fuente natural (típicamente, un río o un lago). Es importante destacar que el agua del circuito secundario nunca entra en contacto directo con la del primario (que es la única que atraviesa el núcleo); y a su vez, el agua del circuito refrigerante no se cruza en ningún momento con la del secundario. Es decir, hay tres corrientes de agua que circulan en forma independiente entre sí (CNEA, 2023).

### 4.3. Aspectos económicos del CAREM

En la actualidad, existen numerosos países del continente africano, del Caribe y otros de medianos o bajos ingresos que muestran intenciones de comprar reactores pequeños y modulares. De hecho, el director del OIEA, el argentino Rafael Grossi, afirmó que «hay un millonario mercado para reactores de características similares al CAREM» y precisó que se trata de «un mercado estimado a futuro de 300.000 millones de dólares» (Del Pozzi, 2022). En el mismo sentido, Serquis en una nota para el diario *Río Negro* destacó:

... la importancia del proyecto CAREM en la generación de trabajo y para la agenda de la transición energética. La idea es trabajar junto con todo

el sector, para visibilizar lo que se hace en Argentina, ponerlo en valor en conjunto con el cuidado del ambiente (Serquis, 2022).

Todas las centrales nucleares de potencia tienen el objetivo de maximizar el aprovechamiento del combustible nuclear, obtener la mayor cantidad posible de energía, reducir al máximo los residuos radiactivos, ser lo más seguras posible y, por último, reutilizar la energía térmica generada en aplicaciones secundarias que van más allá de la obtención de energía eléctrica. Todos estos objetivos pueden ser cumplidos por los SMR. Y el CAREM-25 argentino es uno de ellos.

En el mundo actual, la energía nuclear también tiene un futuro que depende de su viabilidad económica. Las grandes obras de centrales de 10.000 o 12.000 millones de dólares son muy difíciles de financiar. En este sentido, Blanco argumenta que

El mundo está dividido en aquellos países que pueden pagar, pueden comprar centrales grandes y aquellos países que no, como Argentina. Estamos esperando el crédito para pagar una central nuclear cuando India acaba de cerrar un contrato con Rusia para la construcción de 6 reactores de potencia de los grandes. Y China está construyendo de a 30 reactores. El futuro de Argentina pasa por aportar con el diseño del CAREM-25 (Comunicación personal, 15 de diciembre de 2022).

En la misma línea de pensamiento, Serquis afirma que

El mundo ve a la energía nuclear como una necesidad. Entonces, a partir de esa, digamos, quienes piensan en los negocios se han volcado a pensar en cuáles son los nuevos sistemas nucleares y existen un montón de propuestas. Hay más de 80 propuestas en el mundo, de diferentes sistemas y conceptos

de estos SMR, que presentan la posibilidad de construir centrales de pequeña escala en vez de grandes monstruos de 1000, 1200 MWe (Comunicación personal, 7 de diciembre de 2022).

Por último, en relación con los aspectos económicos y los procesos de transición energética, De Arenaza asegura:

La transición energética ya es una realidad. No podemos negar que el mundo tiene que ir hacia una red con emisiones cero. Llegar al objetivo de emisiones cero en la generación de energía para 2050 es bastante exigente, pero solo con las renovables es imposible, por su intermitencia y porque ocupan mucho espacio aún. Además, en el transporte de energía se pierde muchísimo dinero por las pérdidas de energía. Los reactores como el CAREM-25 son la combinación ideal para acoplarse a las renovables. Porque si se tiene SMR funcionando y, de repente, comienza a soplar el viento, es posible realizar una fácil transición de generación de energía eléctrica a un uso alternativo. El reactor no hay que apagarlo nunca. Tiene que estar encendido todo el tiempo mientras sea posible, porque allí es donde radica su economía. Esta es su característica de energía de base. Pero si se cuenta con la posibilidad de despachar una renovable, siempre hay que darle prioridad, porque, una vez instaladas, son gratis y no contaminan. Entonces, se pueden despachar las renovables y, en lugar de apagar el reactor, se lo pone a desalinizar agua de mar, por ejemplo, o hidrógeno (Comunicación personal, 25 de enero de 2023).

## Los combustibles del CAREM

La Argentina es uno de los 12 países (junto con los Estados Unidos, el Reino Unido, la Federación de Rusia, Francia, China, Alemania, Pakistán, Corea del Norte, Japón, India y Brasil) que lograron completar el ciclo del combustible nuclear<sup>23</sup>.

Según Sábato, la clave para la autonomía y la autosuficiencia de la producción de la energía nuclear era desarrollar el «ciclo de combustibles del uranio» (Instituto de Tecnología Sábato, 1998). Superada la prueba de construir reactores, el paso siguiente era lograr alimentarlos en forma permanente y continua durante toda su vida útil con los EECC. En esta línea, analizaremos el proceso de fabricación de los EECC del CAREM, el cual es llevado a cabo en el CAC y en la empresa CONUAR S.A.

El reactor CAREM tiene, bajo la nómina del diseño de sus combustibles de dióxido de uranio ( $\text{UO}_2$ ), un quemado de extracción medio de 25000 MWd/TonU aproximadamente, ya que se utiliza uranio enriquecido. Además, algunos de sus combustibles cuentan con la presencia de gadolinio como veneno quemable para compensar la reactividad del núcleo a lo largo de la vida útil del combustible. Los reactores nucleares, durante la etapa de inicio de ciclo, están diseñados para tener un gran exceso de reactividad tanto para

---

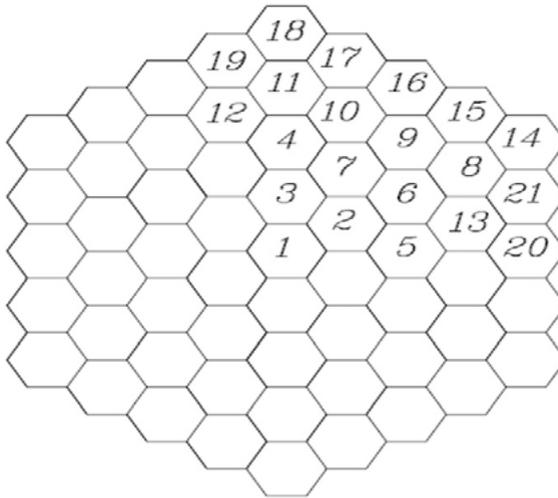
<sup>23</sup> Sobre el ciclo del combustible nuclear argentino, véase Zappino (2022c, 2022d).

compensar su pérdida dada por el quemado propio del material fisil como para poder compensar la aparición de los productos de fisión con gran absorción neutrónica o los cambios de reactividad dados por los cambios de temperatura en los combustibles. Existen distintas vías para controlar el mencionado exceso durante la operación del reactor en su ciclo; una de estas soluciones es emplear venenos quemables como opción de control. Estos tienen una gran sección eficaz de absorción neutrónica y una tasa de consumo similar a la del uranio, de forma tal que, a medida que se pierde reactividad por quemado del combustible, se compensa consumiendo veneno donde el producto de la reacción no tiene una considerable sección eficaz de absorción neutrónica. El reactor CAREM utiliza polvo de óxido de gadolinio ( $Gd_2O_3$ ) como veneno quemable (Debandi, 2018).

El núcleo del reactor CAREM contiene 61 barras de EECC compuestas cada una de ellas por 108 vainas de zircaloy-4 con las diferentes pastillas de uranio que serán descriptas más adelante. En la Figura 6 puede observarse un esquema del núcleo del reactor y la ubicación de los diferentes tipos de EECC.

El proceso de fabricación de los EECC comienza con la producción de las pastillas de uranio que luego se insertarán en las vainas de zircaloy-4 para, finalmente, formar las barras de combustibles finales. El proceso de fabricación de las pastillas está dividido en dos partes: por un lado, las pastillas de uranio natural mezclado con los venenos quemables, las cuales se fabrican en el CAC; y, por otro lado, las pastillas de uranio enriquecido al 3,1 % y al 1,8 % que se fabrican en CONUAR S.A. Finalmente, esta última recibe las pastillas de uranio natural mezclado con venenos quemables y, junto con las de uranio enriquecido, fabrica las barras finales de EECC. Trataremos cada uno de estos dos momentos en los apartados siguientes.

Figura 6. Esquema del núcleo del reactor CAREM



Notas: 1) EECC de uranio enriquecido al 1,8 %; 6) EECC de uranio natural más venenos quemables; el resto de los números representa a los EECC de uranio enriquecido al 3,1 %.

Fuente: Estévez (2022)

## 5.1 El proceso de fabricación de los EECC en el CAC

Los EECC del CAREM tienen condiciones de diseño muy innovadoras en función del tipo de reactor que es, conceptualmente, como un PWR. Desde el punto de vista del combustible, se asemeja al de un PWR, pero cuenta con condiciones de quemado y *performance* más limitadas. Es decir, no tiene un gran quemado. En relación con este punto, el licenciado Federico Kaufmann, gerente del Área Ciclo del Combustible Nuclear, afirma:

Es un combustible de primera generación, de un primer prototipo y una puesta a prueba, para después avanzar en una optimización de esos combustibles.

De esta manera, tiene condiciones de seguridad conservadoras en términos del diseño (Comunicación personal, 23 de noviembre de 2022).

La Planta Piloto de Combustibles Avanzados (PPCA), sita en el CAC, tiene su origen en los años sesenta con los desarrollos de combustibles para los reactores de potencia. En aquellos años, se produjo un gran salto cuando se asoció con el desarrollo de combustible en Alemania para la CNA I, en ese momento para reactores de agua pesada. Además, esta experiencia permitió el desarrollo, sin una gran transferencia por parte de Canadá, de los EECC tipo CANDU para la CNE.

La PPCA tiene una historia de desarrollo en función de los combustibles de los PHWR, pero los inicios de la tecnología pueden rastrearse ya en el RA-8, facilidad crítica para probar el concepto del CAREM. Al respecto, Kaufmann amplía:

En ese grupo se inicia la fabricación exploratoria de ciertas condiciones del combustible, en particular, el manejo del uranio enriquecido. Allí se realiza la investigación, el desarrollo y la fabricación a pequeña escala de pastillas combustibles para reactores de potencia. Existen dos plantas separadas físicamente: el Laboratorio de Venenos Quemables, donde se trabaja con venenos quemables, y la Planta Piloto de Núcleos Cerámicos, donde no está permitido ingresar venenos neutrónicos. En cuanto al proceso, son equivalentes. En el PHWR, por la naturaleza del tipo de reactor, existe una máquina de carga con un continuo entrar y salir de combustibles mientras el reactor está funcionando. En cambio, en los PWR, la lógica es armar un núcleo, cerrarlo, utilizarlo durante un tiempo lo más prolongado posible y técnicamente compatible con ese combustible, abrirlo, cambiar una parte con combustibles frescos y seguir operando. Es decir, es necesaria una parada del reactor (Comunicación personal, 23 de noviembre de 2022).

De esta manera, se trata de generar condiciones para un período largo del combustible, el cual va a tener distintos grados de quemado, diferentes estadios del combustible y donde hay que lograr un grado de estabilidad del sistema parecido entre el primer y el último día de operación antes de recambio. Es decir, conseguir que la reactividad en el reactor sea pareja. En efecto, existen elementos para controlar la actividad del reactor, pero el propio combustible tiene elementos para controlar esa reactividad. Y allí es donde se introduce el concepto de *veneno quemable*.

El veneno es un absorbedor neutrónico, es decir que tiene una gran área de captura de neutrones. Pero, a su vez, se va quemando, en el sentido de que al absorber un neutrón pasa a tener menos captura. De esta manera, se va quemando a medida que deja de tener ese envenenamiento. Vale aclarar que no es el mismo que la moderación que realiza el agua pesada, porque esta mantiene su condición, mientras que el veneno quemable se va agotando. En este sentido, el veneno quemable que se utiliza para los EECC del CAREM es el gadolinio, que en un primer momento absorbe mucho y después va perdiendo capacidad de moderación. Sobre este tema, Kaufmann amplía:

Al inicio, tenemos el combustible fresco, con el uranio fresco, y todo el veneno listo para absorber. La idea es que, a medida que el combustible se va desgastando, también el veneno va perdiendo su capacidad de absorción de neutrones, es decir, va perdiendo capacidad de envenenamiento para bajar la reactividad. Este es un elemento distintivo con respecto a los otros combustibles. El otro elemento distintivo es el uranio enriquecido. En particular, en el CAREM, algunas pastillas se componen de uranio natural con veneno quemable y otras pastillas solo con uranio enriquecido. Algunas barras de EECC del CAREM tienen pastillas de uranio natural con gadolinio combinadas con otras pastillas de uranio enriquecido. Es decir, no todos

los elementos combustibles tienen barras con gadolinio (Comunicación personal, 23 de noviembre de 2022).

Y sobre el grado de enriquecimiento del uranio, asegura:

El 3,1 % es el porcentaje final de trabajo del combustible. El primer núcleo tiene 61 elementos combustibles. La lógica de cambio es de a mitades. Hay uno que siempre va a ser del 1,8 %, que es el central. Y la lógica de recambio es, una vez que está estabilizado el núcleo y distribuido de determinada forma, dejar la mitad con combustibles viejos y la otra con combustibles frescos. Entonces, en el primer núcleo, para simular los combustibles ya gastados, están sin venenos y con un enriquecimiento menor (1,8 %). Eso solo para el primer núcleo. Después, se supone que va a trabajar con 3,1 % de enriquecimiento. Y el del medio siempre se cambia y es de uno 1,8 % de enriquecimiento. El núcleo es un arreglo medio hexagonal (Comunicación personal, 23 de noviembre de 2022).

Para la combinación del uranio natural con gadolinio, la empresa pública Dioxitek S.A. provee el polvo de dióxido de uranio que luego se mezcla con los venenos. En este punto, un aspecto clave es el tipo de polvo, que depende de la vía utilizada para su obtención. Generalmente, estas vías son dos: AUC o ADU. Dioxitek utiliza AUC. Por su parte, el uranio enriquecido al 3,1 % proviene en parte de Brasil, ya que tiene la misma tecnología que la Argentina, y otra parte proviene de la empresa Westinghouse. En el total de los EECC, el uranio natural significa una proporción de aproximadamente el 10 %.

Respecto al uranio enriquecido, la innovación con respecto a los PHWR no es solamente el enriquecimiento. En este sentido, Kaufmann asevera:

Al tener más enriquecimiento, más tiempo de estadía, más quemado, más exposición, más tiempo en el reactor, más flujo neutrónico, etc., el resultado es que se generan más gases de fisión. Esto hace que la pastilla tenga que tener formadores de poros. En las etapas del proceso, lo importante es lograr una microestructura, los tamaños de poros, lo cual determina cómo va a funcionar la pastilla, cómo va a desalojar los gases, si se va a romper o no. La densidad indica cuánto uranio se puede poner en cada barra de combustible. Se trata, entonces, de lograr simular condiciones para verificar que cuando las pastillas ingresan en el reactor esos poros no desaparezcan y colapse la pastilla. Esto se trabaja en los dos tipos de pastillas, pero en las de uranio enriquecido, como están más tiempo en el reactor, existen condiciones más exigentes de homogeneidad. La porosidad es lo que nosotros aportamos. Es todo un desarrollo propio. Es decir, es una consecuencia de la experiencia acumulada en los PHWR (Comunicación personal, 23 de noviembre de 2022).

La ingeniera María Florencia Parrado, jefa del Departamento de Combustibles Avanzados de la Gerencia de Área Ciclo del Combustible Nuclear, perteneciente a la Gerencia de Combustibles Nucleares (GCCN), explica las etapas de producción de las pastillas de uranio natural y venenos quemables:

Primero, recibimos las materias primas, que son el polvo de dióxido de uranio ( $\text{UO}_2$ ) en un tambor listo para usar, el polvo de óxido de gadolinio ( $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ) y los lubricantes. En ese momento, caracterizamos todos estos insumos y pasamos a la etapa de mezclado mecánico de polvos, es decir, mezclamos el  $\text{UO}_2$  con el  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  y los aditivos lubricantes que ayudan a mejorar el proceso posterior de prensado.

Una vez obtenida la mezcla, se procesa y se prensa para conformar los compactos de polvo a los que llamamos «pastillas en verde». Esa pastilla

está todavía fresca y simplemente se le aplica un proceso de prensado que consiste en colocar el polvo a compactar dentro de la cavidad de una matriz cilíndrica y aplicar por medio de dos punzones (uno superior y otro inferior) una presión, obteniendo el compacto de polvo o «pastilla en verde».

Luego, en la siguiente etapa, sometemos a esas pastillas a un proceso de sinterizado, que es un tratamiento térmico a una temperatura inferior a la de fusión dentro de un horno de atmósfera controlada durante un determinado tiempo. Este proceso se lleva a cabo en un horno de alta temperatura tipo batch. Una vez finalizado, se abre el horno, se sacan las pastillas y se coloca otro lote. El horno está, aproximadamente, a  $1850^{\circ}$  en una atmósfera reductora de hidrógeno. La diferencia entre las pastillas de  $UO_2$  comunes y las de venenos quemables es que introducimos una mezcla de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) en una etapa del proceso como para lograr una atmósfera levemente oxidante y, de esta manera, mejorar las características microestructurales de la pastilla final.

Una vez obtenidas las pastillas ya sinterizadas, desde el punto de vista de la microestructura, la pastilla ya está lista, pero es necesaria una etapa final, denominada «rectificado», para poder llevar la pastilla al diámetro final que cumple con las especificaciones que permitan colocarlas dentro de la vaina de zircaloy-4. La rectificadora cuenta con una piedra de desbaste de carburo de silicio que tiene su eje paralelo a la guía de las pastillas a rectificar y sirve como uno de los tres puntos de apoyo. El eje de la piedra de arrastre (de menor diámetro que la anterior) no es paralelo a la guía, lo cual permite que el movimiento de rotación de la piedra provoque el avance de las pastillas a lo largo del canal de rectificado. Los puntos de apoyo son la piedra de arrastre, la piedra de desbaste y la cuchilla. Las pastillas ingresan a la rectificadora, que les va «comiendo» todo el perímetro para llevarla al diámetro final. Finalmente, salen las pastillas, se limpian y se secan. La

limpieza es para sacarle mayoritariamente barros que pueden quedar o suciedad del propio proceso de rectificado.

Una vez que las pastillas están listas, se realiza una última etapa de inspección visual para detectar defectos superficiales. En ese momento, se extraen aquellas que no cumplen con las especificaciones. Una vez verificadas, ese lote queda ya liberado.

Este no es el único control. Existen controles de proceso en cada etapa, por ejemplo, control de homogeneidad en la mezcla, control de prensado midiendo densidad en verde, control de los parámetros de operación del horno, control de diámetro en el rectificado, etc. Una vez liberado el lote, se le realiza una batería de controles mecánicos, microestructurales, físicoquímicos, etc. (Comunicación personal, 23 de noviembre de 2022).

Finalmente, vale aclarar que la GCCN recibe el proyecto y, además, participa en la etapa de ingeniería junto con el Departamento de Combustibles Avanzados. Parrado agrega:

Respecto de las pastillas de uranio enriquecido, hicimos todo el desarrollo, el cambio de escala, obtuvimos una tecnología de fabricación y le transferimos toda esa tecnología a CONUAR, que es el que actualmente va a fabricar esa línea del combustible. Por otro lado, en paralelo, en la parte de las pastillas con veneno quemable, hicimos el desarrollo, evaluamos los proveedores de gadolinio, distintas temperaturas, parámetros de proceso, tipos de mezclas, etc. En esta etapa, hubo varios problemas microestructurales que tuvimos que resolver en la etapa de desarrollo. Una vez que obtuvimos buenos parámetros de pastillas, pasamos a un cambio de escala, de equipos y mejoras en la instalación. Y después de ese cambio de escala, con los

nuevos equipos, pasamos a la etapa actual de calificación y fabricación (Comunicación personal, 23 de noviembre de 2022).

## **5.2 El proceso de fabricación de los EECC en CONUAR S.A.**

Una vez recibidas las pastillas de uranio natural y gadolinio por parte del CAC y el uranio enriquecido entregado por proveedores externos, comienza la etapa final de fabricación de las barras de EECC.

En CONUAR S.A. se fabrican los EECC de enriquecimiento de 1,8 % y de enriquecimiento de 3,1 %. Los EECC de enriquecimiento de 3,1 % son los que poseen algunas barras combustibles con pastillas de uranio natural y gadolinio (fabricadas en el CAC).

Cuando el reactor arranca por primera vez, en el primer núcleo, todos los EECC son frescos, es decir que el núcleo no está en equilibrio. Si tomamos el hipotético caso de que debemos utilizar EECC frescos solo para la primera etapa del inicio de operación del reactor, allí deberían implementarse algunos métodos de control para poder compensar esa reactividad en exceso que solo va a existir al inicio. Normalmente, esto no es lo que se hace, sino que se generan combustibles con un enriquecimiento menor, los cuales simulan el quemado de combustible. Para el caso del CAREM en el primer núcleo y, en los sucesivos recambios que se realicen hasta alcanzar el núcleo de equilibrio, se utilizará una mayor cantidad de EECC de enriquecimiento de 1,8 %. Luego de alcanzar el núcleo de equilibrio, los recambios de combustibles serán 30 EECC de enriquecimiento 3,1 % y 1 EC de enriquecimiento 1,8 % que va en el centro del núcleo. Esto tiene que ver con la necesidad de disminuir el factor de pico, que es el cociente

entre la potencia máxima y la potencia media. Cuanto más plana es el perfil de potencia, los EECC se quemarán de manera más pareja.

## 5.2.1 Fabricación de pastillas

El proceso de fabricación es casi idéntico al de los combustibles para las tres centrales nucleares en operación.

Como primer paso, se recibe el polvo de dióxido de uranio enriquecido, que proviene de Brasil o Suecia, según el proveedor. Una vez recibido, se lo mezcla con óxido de uranio ( $^{238}\text{U}$ ) como formador de poros. Al respecto, el ingeniero Mariano Ordoñez, jefe de Control de Calidad del Área Productiva de Combustibles del CAREM de la empresa CONUAR S.A., asevera:

Con respecto a las pastillas para los combustibles de la CNA I y la CNA II, las del CAREM tienen menos densidad, es decir, tienen más poros, los cuales sirven para alojar los gases de fisión y que no se liberen. El polvo de  $\text{U}_3\text{O}_8$  se genera recuperando pastillas que salieron con algún defecto, rotura, etc. Se colocan en unas estufas a  $400^\circ$  con aire y se transforma el dióxido de uranio ( $\text{UO}_2$ ) en  $\text{U}_3\text{O}_8$  (Comunicación personal, 10 de marzo de 2023).

Con estos componentes se hace una mezcla homogeneizada donde se agrega como lubricante estearato de zinc. Este lubricante es utilizado para favorecer la fluidez del polvo en la matriz.

En este aspecto, CONUAR S.A. debió hacer cambios en el proceso productivo respecto de los EECC para la CNA I y la CNA II. Al respecto, Ordoñez amplía:

En el caso de CNE, CNA I y CNA II, el enriquecimiento del uranio es menor al 1 %. Para esa condición, no es posible mantener una reacción en cadena durante el procesamiento de dicho material, haciendo inexistente el riesgo de producir un accidente de criticidad. Pero en CAREM, donde el enriquecimiento es mayor, existe el riesgo. Para minimizar dicho riesgo, se emplean diferentes métodos de control, algunos de carácter intrínsecos como controles por geometría o volumen, y otros administrativos como limitación en cantidad de material. En consecuencia, se realizaron análisis de criticidad desde inicio al fin de la fabricación considerando condiciones normales de operación y accidentales (doble contingencia) requiriendo modificaciones en los procesos y equipamientos respecto a las líneas de producción CNE, CNA-1 y CNA-2 como, por ejemplo, el homogeneizador (Comunicación personal, 10 de marzo de 2023).

Luego del mezclado, el proceso es igual a las pastillas de los EECC de las centrales en operación. Hay un prensado con una prensa rotativa. Luego, un sinterizado en los hornos y, después, el rectificado para obtener el gap (distancia o diferencia que existe entre elementos relacionados entre sí) entre las pastillas y la vaina de zircaloy-4. El rectificado se realiza en una máquina que tiene dos «muelas»<sup>24</sup>, una de arrastre, que hace avanzar la pastilla, y otra muela que va «comiendo». El diámetro, en los sinterizados, se reduce drásticamente: se pasa de una densidad de 6 g/cm<sup>3</sup> a 10,5 g/cm<sup>3</sup>. Ordoñez ofrece más detalles sobre este proceso:

Debido a las deformaciones que sufre dentro del proceso de sinterizado, el diámetro no queda tan parejo como se necesita. Hay como un efecto de aplastamiento en el medio (cintura). Por lo estricto de las tolerancias de

---

24 «La muela es una pieza fundamental en la rectificadora cilíndrica, pues se trata de una herramienta abrasiva que permite el arranque de virutas diminutas en el mecanizado por abrasivos» (<https://www.hellermquinaria.com/importancia-de-la-muela-en-la-rectificadora-cilindrica/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20la%20muela%20de,en%20el%20mecanizado%20por%20abrasivos>).

diámetro, se requiere hacer el proceso de rectificado. Luego del rectificado hay un control visual para extraer todas las pastillas defectuosas (de donde después se saca el  $U_3O_8$ ) (Comunicación personal, 10 de marzo de 2023).

A continuación, se realiza el control final que incluye controles de isotopía, ceramografías (para ver el tamaño del grano de las pastillas), etc.

Estas pastillas, finalmente, serán colocadas dentro de vainas de zircaloy-4, con las cuales, sumados algunos otros componentes, se arman los EECC.

### 5.2.1.1 Componentes de EECC de enriquecimiento 3,1 %

- 102 barras combustibles de uranio enriquecido al 3,1 % (Figura 8).
- 6 barras combustibles con pastillas de uranio natural más venenos quemables (Figura 7). Consta de una zona central (1,1 m) con pastillas de uranio natural y venenos quemables, y los extremos (150 mm para cada lado con pastillas de 3,1 %).
- 4 separadores.
- 19 tubos guía (para conjuntos de control e instrumentación).
- Conjunto cajón (parte superior).
- Conjunto boquilla (parte inferior).

### 5.2.1.2 Componentes de EECC de enriquecimiento 1,8 %

- 108 barras combustibles de uranio enriquecido al 3,1 % (Figura 8).
- 6 barras combustibles con pastillas de uranio natural más venenos quemables.
- 4 separadores.
- 19 tubos guía (para conjuntos de control e instrumentación).
- Conjunto cajón (parte superior).

- Conjunto boquilla (parte inferior).

### **5.2.1.3 Componentes de barras combustibles de enriquecimiento 3,1 % (Figura 8)**

- Vaina de zircaloy-4
- Tapón superior
- Tapón inferior
- Pastillas aislantes
- Resorte (para compensar dilataciones térmicas)
- Tubo espaciador, cuya función es generar volumen dentro de la vaina para que cuando se liberen gases de fisión no aumente mucho la presión interna, lo cual provoca una expansión de la vaina.
- Pastillas combustibles de uranio enriquecido al 3,1 % (175 aproximadamente).

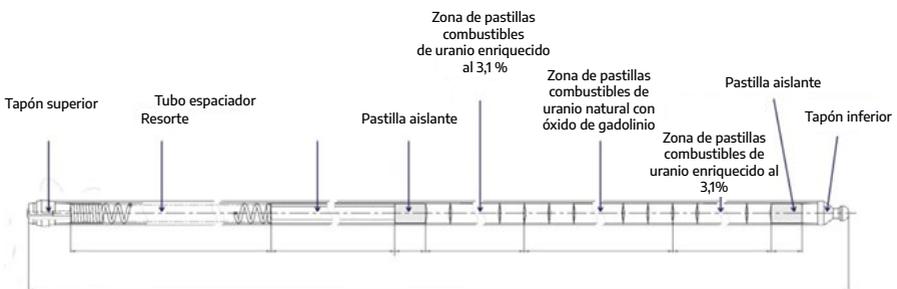
### **5.2.1.3 Componentes de barras combustibles de enriquecimiento 1,8 % (Figura 8)**

- Vaina de zircaloy-4
- Tapón superior
- Tapón inferior
- Pastillas aislantes
- Resorte (para compensar dilataciones térmicas)
- Tubo espaciador, cuya función es generar volumen dentro de la vaina para que cuando se liberen gases de fisión no aumente mucho la presión interna, lo cual provoca una expansión de la vaina.
- Pastillas combustibles de uranio enriquecido al 1,8 % (175 aproximadamente).

### 5.2.1.4 Componentes de barras combustibles uranio natural + venenos quemables (Figura 7)

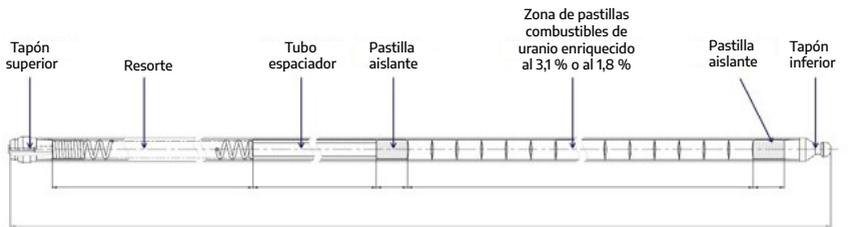
- Vaina de zircaloy-4
- Tapón superior
- Tapón inferior
- Pastillas aislantes
- Resorte (para compensar dilataciones térmicas)
- Tubo espaciador, cuya función es generar volumen dentro de la vaina para que cuando se liberen gases de fisión no aumente mucho la presión interna, lo cual provoca una expansión de la vaina.
- Pastillas combustibles de uranio natural y venenos quemables (137 aproximadamente)
- Pastillas combustibles de uranio enriquecido al 3,1 % (38 aproximadamente)

Figura 7. Barras combustibles con venenos quemables



Fuente: Estévez (2022)

**Figura 8. Barras combustibles con 3,1 % o 1,8 %**



Fuente: Estévez (2022)

## 5.2.2 Armado de las barras de EECC

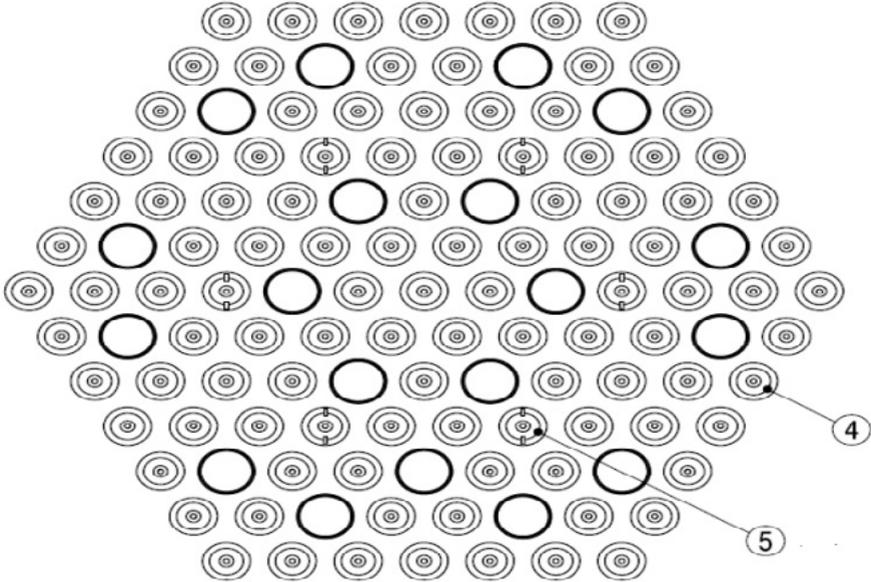
En la fabricación de las barras combustibles, la primera etapa es mecanizar los extremos donde se determina la longitud final y darle una geometría para que se claven bien los tapones. A continuación, se suelda el tapón inferior mediante una soldadura TIG. El procedimiento se realiza con un electrodo fijo, el cual, al girar la vaina con el tapón clavado en una atmósfera de argón, lo va soldando. Se realiza en una atmósfera protectora para que no se oxide el material. Una vez soldada, hay que esperar un tiempo para el enfriado, luego se abre la cámara de manera que quede en contacto con el aire. El proceso continúa, explicado por Ordoñez:

Luego se realiza la carga de los internos de la barra combustible: la pastilla aislante del extremo inferior, las pastillas combustibles (de acuerdo con la configuración de cada tipo de barra combustible), la pastilla aislante del extremo superior, el tubo separador y el resorte. Posteriormente, se hace la soldadura del tapón superior con el mismo proceso que la del tapón inferior. El tapón superior cuenta con una perforación pasante para poder trabajar con la atmósfera interna que tiene la vaina. En todos los combustibles, la

atmósfera es de helio, que es un gas noble y no se va a combinar con nada a la temperatura que tiene el combustible en servicio. De los gases nobles, es el que mejor transferencia térmica tiene. Se carga con 25 atmósferas de helio y se sella la perforación con soldadura TIG. Luego, viene el control final con un equipo de *gamma scanner* que mide la radiación que emite el uranio y con eso determina longitud de las pastillas, si tienen defectos, si el nivel de enriquecimiento está bien, si no se mezclaron las pastillas, etc. Además, se realiza una verificación por RX digital de las soldaduras de los tapones y sellado. Otro control importante es el de estanqueidad [que] se realiza al 100 % de las barras combustibles. Para verificarla, se colocan las barras combustibles en una cámara donde se hace vacío y con un espectrómetro en el equipo que mide la tasa de fuga de helio. Si está por debajo de un límite significa que esas barras cumplen los parámetros de estanqueidad (Comunicación personal, 10 de marzo de 2023).

En la Figura 9, puede observarse un corte transversal de la barra final de elemento combustible.

**Figura 9. Corte transversal del elemento combustible con uranio enriquecido al 3,1 %**



Nota: 4) 102 posiciones de las vainas combustibles de uranio enriquecido al 3,1 %; 5) 6 posiciones correspondientes a vainas de combustibles con venenos quemables. Los círculos blancos representan 19 posiciones de los tubos guías (18 para barras de control y 1 de instrumentación).

Fuente: Estévez (2022)

Por último, en la Figura 10, se observa una barra de elemento combustible terminada.

Figura 10. Barra de elemento combustible reactor CAREM



Fuente: provista al autor por gerencia carem

# 6

## Del CAREM-25 al CAREM Comercial

Al mismo tiempo de la construcción del prototipo del CAREM-25 que describimos en los apartados anteriores, la CNEA está desarrollando el diseño conceptual del denominado «CAREM Comercial».

En un trabajo publicado en un número de la *Revista CNEA* (Delmastro *et al.*, 2017), se desarrolla un análisis para diseñar al reactor CAREM de escala comercial a partir del prototipo CAREM-25. Allí se proponen las bases de diseño para el desarrollo de una central nuclear CAREM-480, compuesta por cuatro módulos de 120 MWe cada uno.

Un objetivo es que la versión comercial del CAREM sea una central nuclear multimodular y que mantenga las mismas bases de diseño de seguridad, incluso con mejoras basadas en las realimentaciones del diseño del prototipo.

Un criterio es aumentar la potencia de cada módulo a 120 MWe para hacer uso de la economía de escala relacionada con el tamaño en pos de bajar los costos de capital y de operación. Otro criterio es analizar la posibilidad de tener sistemas o partes de ellos en común para disminuir el costo total del MWe generado. Además, se analizan opciones para mejorar la implementación de los criterios de seguridad nuclear del prototipo.

Las características más notables del CAREM-25, y que se mantienen en el CAREM Comercial, son que el circuito primario es integrado y que el refrigerante se transporta por circulación natural. Uno de los objetivos buscados con el núcleo para el CAREM Comercial es aumentar la duración del ciclo de combustible.

Cada módulo de 120 Mwe cuenta con su RPR y su contención, porque permite una construcción y puesta en marcha escalonadas. Por otra parte, algunos sistemas están dedicados exclusivamente a cada módulo, mientras que otros o parte de ellos se compartirán. El diseño de cada módulo de 120 MWe está basado en el CAREM-25, pero existen diferencias debidas a las mejoras en la implementación de los sistemas de seguridad y al hecho de que se comparten algunos sistemas. La ventaja de esta configuración es que permite la modularidad, es decir, posibilita que coexistan módulos en operación con otros en fase de construcción. Esto hace más atractivo al diseño para competir en el mercado internacional de energía nuclear.

Los cuatro módulos de 120 MWe están dispuestos en arreglo rectangular. Hay una pileta de combustibles quemados compartida cada dos módulos, como puede observarse en la Figura 11. Los elementos de combustibles quemados se transportan a estas piletas por medio de un canal de transferencia que tiene cada módulo y que desembocan en la pileta correspondiente. Mientras algunos sistemas y servicios se comparten entre dos o más módulos, otros serán de uso general para toda la central. También habrá sistemas dedicados exclusivamente para cada módulo.

Existirán dos edificios nucleares paralelos. Cada uno de ellos alojará dos módulos con sus contenciones correspondientes, una pileta de elementos de combustibles gastados con sus respectivos canales de transferencia y los sistemas nucleares correspondientes a los módulos. Entre ambas



En el marco de este diseño, el prototipo CAREM-25 no tendrá como función, durante una primera etapa, la generación de energía eléctrica, sino probar los conceptos aplicados en el diseño de esta nueva generación de reactores. Luego de un período de pruebas y validación del diseño, sí podría generar electricidad, ya sea para la red o para el consumo interno del complejo nuclear. De esta manera, la realización de diversas pruebas a las que será sometido el prototipo permitirá consolidar los diseños de ingeniería necesarios para el CAREM Comercial, además de sentar las bases para la licencia de las futuras versiones.

En este sentido, la Dra. Serquis amplía:

La construcción del prototipo de 32 MWe es el primer paso para hacer realidad el proyecto de un CAREM Comercial de entre 100 y 120 MWe, con módulos que se puedan integrar, por ejemplo, hasta cuatro módulos que sumen 480 Mwe. De esta manera, la CNEA está pensando en reactores pequeños que puedan brindar la seguridad necesaria, porque el mundo está proyectando tener, en los próximos 20 años, hasta 300 de estos nuevos reactores. Si nuestro mercado pudiera abarcar el 10 % de eso e incluso exportar algunos de estos reactores con diseño íntegramente nacional, sería una oportunidad muy importante para el país (Comunicación personal, 7 de diciembre de 2022).

Por otro lado, y refiriéndose específicamente al diseño del CAREM Comercial y sus diversos usos en el marco de la transición energética, el ingeniero De Arenaza afirma:

Estamos en pleno proceso de diseño del reactor comercial. En algún momento, se hizo una propuesta de hacer una central con un módulo de 100 a 120 MWe de potencia individual, con una configuración ideal de cuatro módulos,

conformando una central de 400 a 480 MWe. Es un trabajo que se hizo en el que daba que esa configuración que resulta bastante económica. Ahora vamos a trabajar en los requisitos básicos de las centrales, los criterios de diseño, teniendo en cuenta las lecciones aprendidas del CAREM-25, especialmente en algunos ítems que no estaban incorporados en el análisis inicial. La idea es hacerlo más económico, más fácil de construir. Todo el conocimiento del CAREM-25 hay que capitalizarlo. Otra cuestión es cuáles son los nichos de mercado a los que queremos apuntar. Por supuesto que el más claro es la generación eléctrica, que es el que más demanda, pero hay otros como desalinización de agua de mar, producción de hidrógeno, cogeneración, calefacción urbana, etc. El tema es que no es posible, con un mismo diseño, poder abarcar todos los nichos. Hoy, la desalinización es el nicho más atractivo, porque el agua está desapareciendo y hay muchos países que tienen cada vez menos agua dulce. Desalinizar agua con los métodos actuales es muy costoso en términos energéticos. Entonces, aparece la idea de acoplar centrales nucleares para eso (Comunicación personal, 25 de enero de 2023).

## El presente del CAREM

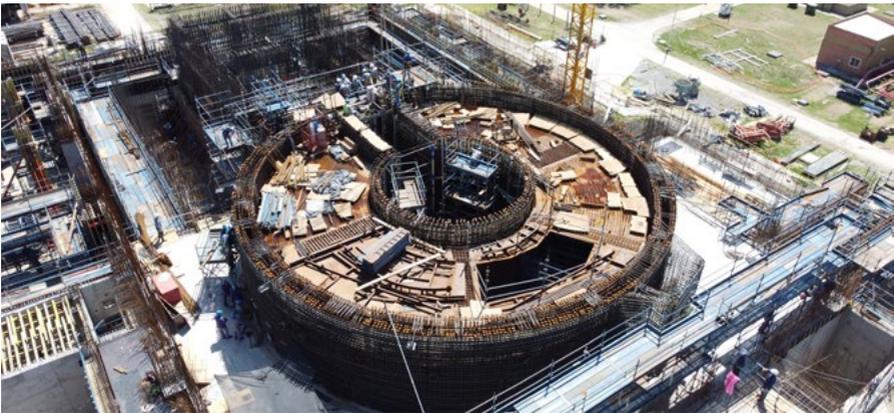
En abril de 2023, el prototipo del CAREM-25 superaba el 78 % y el avance físico total del proyecto estaba en el orden del 62 %. Los componentes mostraban diversos grados de avance, como, por ejemplo, el RPR que se hallaba cerca del 70 %. En las Figuras 12 y 13, se presenta el edificio del reactor. Obsérvese, en el centro, el liner metálico de contención. En la Figura 14, puede apreciarse el conjunto de la obra. Arriba, en el centro, asoman las centrales Atucha I, Atucha II y el río Paraná de las Palmas.

**Figura 12. Obras del reactor CAREM-25<sup>25</sup>**



Fuente: imagen provista por la Gerencia CAREM

**Figura 13. Obras del reactor CAREM-25**



Fuente: imagen provista por la Gerencia CAREM

---

25 El autor pudo visitar las obras y obtener las fotografías gracias a la colaboración de las siguientes personas del Proyecto CAREM: Luciano Turina (responsable de Comunicaciones de la Gerencia CAREM), Gustavo Fresia (jefe de la División Inspección de Obra) y Augusto Manzi (integrante de la división Seguridad e Higiene de Obra).

**Figura 14. Obras del reactor CAREM-25**



Fuente: imagen provista por la Gerencia CAREM

En palabras del ingeniero De Arenaza,

Tenemos el diseño prácticamente cerrado. Tenemos la obra civil a punto de terminar, la fabricación de los principales componentes iniciada, incluido el RPR, que no es algo menor. Y todo lo estamos haciendo en Argentina. Lo que resta es avanzar más con los suministros como los componentes eléctricos de instrumentación. Tenemos que terminar la obra e iniciar el montaje electromecánico. Básicamente, eso es lo que nos falta con respecto al prototipo. Las cuestiones políticas hicieron que el proyecto existiera y no existiera varias veces hasta que, en el año 2006, se decidió empezar a avanzar de manera seria. Y estamos en un momento del mundo en el que pasaron un montón de cosas, comenzando por la guerra de Ucrania, lo cual produjo un gran impacto en el tema energía. Y ahora estamos en un momento en el que no sólo Estados Unidos, sino también China y Rusia, aparecieron con

diseños. Y, con lo de Fukushima, los reactores chicos empezaron a tomar más importancia, porque lo que pasó fue que se quedaron sin energía eléctrica. Debido a lo nuclear, no murió absolutamente nadie, pero, al quedarse sin energía eléctrica, no pudieron refrigerar el reactor, se produjo el accidente y se fundió el núcleo. La explosión, en realidad, no tiene nada que ver con el reactor, sino con las piletas. A raíz de esto, los reactores SMR, con sus sistemas de seguridad pasivos, cobraron muchísima relevancia.

El momento a nosotros nos sirve, porque comenzó a generarse un mercado que no existía. Lo que el mundo nuclear tiene que asegurar de acá al 2030 es poder establecer una cadena de suministros estable y confiable, porque la cantidad de reactores que hay que vender es impresionante. Y hay lugar para el CAREM. Con la nueva gestión, comenzamos a hacer los estudios económicos que no existían sobre lo que el mundo necesita, a qué nichos, la estrategia comercial, etc. Después de eso, ver qué ofrecemos y hacer el diseño (Comunicación personal, 25 de enero de 2023).

Con respecto a los atrasos producidos durante el gobierno del macrismo, en una entrevista, el ingeniero Mauricio Bisauta sostiene que «El problema fundamental que tiene el proyecto son las deudas que generó Cambiemos con los contratistas y el retiro de dos de los más importantes: TECHINT (obra civil) y TECNA (secundario). Esto ha generado atrasos en el cronograma de ejecución y obligó replantear una nueva manera de llevar la obra» (OCIPEX, 2020).

Finalmente, sobre el presente del CAREM y sus posibilidades productivas y comerciales, la Dra. Serquis amplía:

Tenemos que pensar en reactores pequeños que puedan llegar a darle seguridad al mundo. Se proyecta tener, en los próximos 20 años, hasta 300

de estos nuevos reactores. Y otro aspecto importante es la participación nacional. El tema de los generadores de vapor fue un desafío inmenso y CONUAR ya terminó de fabricar el primero, demostrando que es posible y que cumple con las especificaciones técnicas. Esto fue un gran desafío para la industria argentina, sobre todo, porque contamos con estas grandes industrias como CONUAR-FAE, como IMPSA, que son capaces de proveer componentes calificados con estampa nuclear, o sea, con certificación ASME Nuclear y con estas características de seguridad. Cuando uno compara el CAREM-25 con otros proyectos de la competencia, por ejemplo, el NuScale, vemos que ese proyecto estadounidense tiene aprobada la licencia de construcción, pero todavía ni siquiera tiene un sitio donde empezar a construirlo. Toda la parte de licenciamiento en las áreas nucleares es muy importante, porque hasta que no se cumple con los requisitos que piden las autoridades regulatorias de cada país, no se pueden llevar adelante. El CAREM-25 está muy avanzado en ese sentido, no sólo en la parte de construcción, sino también en todas las licencias. El CAREM-25 tiene solo 600 y le faltan unos 300 para completarse. Un prototipo siempre es muchísimo más caro porque uno está pagando todo el desarrollo y la inversión. La industria local tiene o tuvo más de 1000 contratos, lo cual lo convierte en un generador de desarrollo. Se espera que tenga un 70 % de integración nacional. Algunas partes, obviamente, no se pueden desarrollar todavía acá como, por ejemplo, la turbina para generación eléctrica, que es de Siemens, y algunos componentes o *software* que es necesario importar. Necesita ahora personas que quieran sumarse al proyecto. Tenemos menos de 200 ingenieros trabajando en el sistema, mientras que NuScale tiene 600. NA-SA es la principal contratista para la obra civil. Se han volcado varias toneladas de concreto este año. Y se ha reactivado el laboratorio del Instituto Nacional de Tecnología Industrial [INTI], que es quien certifica que cada una de las coladas de hormigón cumpla con las especificaciones que pide la industria nuclear. Realmente es una obra impresionante, y la cantidad

de conocimiento que se está generando va a marcar una diferencia y nos va a posicionar en el mundo, donde nos ven con expectativas de poder demostrar que este tipo de reactores funciona (Comunicación personal, 7 de diciembre de 2022).

## A modo de conclusión

Como se ha expuesto, el CAREM-25 es un reactor diseñado para la producción de energía nuclear en ubicaciones aisladas. Tiene diversas aplicaciones, como desalinización de agua de mar, calefacción, producción de hidrógeno y, por supuesto, generación de energía eléctrica. Su naturaleza modular lo convierte en una opción altamente útil para aumentar la producción de electricidad según la demanda fluctuante. Este proyecto ha sido completamente diseñado y desarrollado en Argentina y es actualmente el único en construcción a nivel mundial.

Los reactores modulares pequeños, especialmente el CAREM-25 argentino, representan una innovación revolucionaria tanto en el sector energético en general como en la industria nuclear en particular. Sus diseños mejorados en cuanto a seguridad y su menor contaminación los convierten en protagonistas del futuro de la energía nuclear. Esto adquiere mayor relevancia en el contexto de la transición energética que debe llevar a cabo el mundo entero utilizando todas las herramientas disponibles para lograr una descarbonización total en la producción de energía. En este sentido, los SMR, incluido el CAREM-25 argentino, demuestran ser capaces de lograrlo, además de presentar una viabilidad económica superior a las grandes centrales nucleares históricas.

Argentina es uno de los 32 países del mundo que incluye la energía nuclear en su matriz energética y forma parte de un selecto grupo que domina el ciclo completo del combustible nuclear. La generación de energía nuclear desempeña un papel fundamental en la transición energética, ya que es una fuente de baja emisión de gases de efecto invernadero, asequible,

confiable y sostenible, lo que permite que nuestro país cumpla con los Objetivos de Desarrollo Sostenible establecidos por las Naciones Unidas<sup>26</sup>.

En resumen, el CAREM-25 posicionará a la Argentina en los primeros puestos del mercado internacional de reactores nucleares de baja y mediana potencia. Será, además, el primer reactor de potencia diseñado y construido por en el hemisferio sur. De esta manera, a casi 40 años de la concepción inicial del proyecto y luego de muchas interrupciones, el reactor se halla en la recta final de su construcción. Es, sin lugar a dudas, uno de los proyectos nacionales más innovadores en el ámbito de la energía nuclear. Su finalización y posterior puesta en marcha significarán un paso más en la larga historia del sector nuclear argentino y fijará al país como uno de los líderes mundiales en el uso pacífico de la energía nuclear.

---

26 Para más información, ingresar a <https://www.argentina.gob.ar/noticias/el-carem-y-su-cadena-de-valor-en-la-conferencia-ministerial-internacional-sobre-energia>

## Glosario

*AUC-ADU*: las formas usualmente utilizadas para la fabricación de pastillas de óxidos mixtos con venenos quemables pueden ser dos. Por un lado, mediante mezcla mecánica, consistente en la distribución física del gadolinio a través de una mezcla macroscópica en seco entre polvos de dióxido de uranio y trióxido de digadolinio. Por otro lado, mediante rutas de coprecipitación, un proceso húmedo donde se genera la precipitación de una sal que contiene al uranio y al veneno quemable simultáneamente. A partir de estas, existen dos vías usuales para la obtención de  $UO_2$ : una donde el precipitado es ADU (diuranato de amonio) y otra donde es AUC (uranil carbonato de amonio) (Debandi, 2018).

*Circuitos primario, secundario y terciario*: sistema que facilita la circulación del refrigerante, cuya función es enfriar el núcleo que contiene los EECC. Por un lado, el circuito primario es radiactivo, pero es cerrado porque no entra en contacto con el secundario. Está formado por la vasija del reactor, las bombas del refrigerante del reactor y un presurizador. Por otro lado, el circuito secundario extrae el calor del circuito primario y forma vapor, el cual mueve una turbina antes de reutilizarse. Contiene agua limpia y está cerrado. Está compuesto por generadores de vapor, turbinas, recalentadores y separadores de humedad, generador o alternador y condensador. Por su parte, el circuito terciario refrigera al secundario. El agua empleada proviene de un río, mar o lago. (<https://www.revistanuclear.es/en/divulgacion/como-funciona-una-central-nuclear/#:~:text=Una%20central%20PWR%20tiene%203,un%20r%C3%ADo%2C%20mar%20o%20lago>).

*Convección natural*: mecanismo o tipo de transporte de masa y calor en donde el movimiento del fluido se genera por diferencias de densidad que se producen debido a gradientes de temperatura, y no por una fuente externa

(bomba, ventilador, dispositivo de succión, etc.). En la convección natural, el fluido que rodea una fuente de calor, lo recibe y, por expansión térmica, se vuelve menos denso y se eleva (<https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-conveccion-natural-conveccion-libre-definicion/>).

*Criticidad*: término utilizado en física de reactores para describir la condición en la que el número de neutrones producidos por la fisión coincide con el número de neutrones absorbidos (por materiales fisibles y no fisibles) y fugados del reactor. Por ende, un reactor es «crítico» cuando se establece en él una reacción nuclear en cadena automantenida (<https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/glosario-de-terminos/criticidad/>).

*Derechos de emisiones de carbono*: intentan controlar la contaminación producida por las diferentes industrias mediante un canon que se debe abonar previamente. Fueron establecidos por la Unión Europa en 2005 y afectan al transporte y a las industrias más contaminantes. El funcionamiento tiene un modelo de subasta donde se fija un límite y el total de emisiones no puede ser más elevado que el máximo subastado. Esto tiene un impacto importante no solo para el medioambiente, sino también para los precios. Al tratarse de una oferta limitada, que además va en descenso, puesto que cada año se disminuye el máximo que sale a subasta, la alta demanda hace que los precios vayan en constante aumento. (ACS Recycling, 2022).

*Elemento físil*: un elemento es fisionable, fisible o físil cuando su núcleo es capaz de experimentar una fisión con neutrones libres de cualquier energía (<https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/glosario-de-terminos>).

*Enriquecimiento de uranio:* el uranio es un elemento químico (U). En su estado natural, es una mezcla de tres isótopos:  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$ , y es levemente radiactivo, lo cual facilita su minería, transformación y fabricación como combustible nuclear. Se encuentra principalmente en la corteza terrestre (<https://www.foronuclear.org/actualidad/a-fondo/etapas-para-la-obtencion-del-combustible-nuclear-a-partir-del-uranio/>). El enriquecimiento es un procedimiento que aumenta la concentración de un isótopo determinado de un elemento. El uranio del combustible nuclear es enriquecido para aumentar el porcentaje del isótopo  $^{235}\text{U}$  desde el 0,7 % natural al 3 o al 5 % necesario para el funcionamiento del reactor. Los métodos de enriquecimientos son la difusión gaseosa, la ultracentrifugación, la separación isotópica mediante toberas, rayo láser o intercambio químico, entre otros (<https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/glosario-de-terminos/enriquecimiento/>).

*Facilidad crítica:* se trata de un reactor de investigación de muy baja potencia en el cual se produce una reacción nuclear controlada, la cual es utilizada con fines de investigación, experimentación y/o docencia.

*Fisión:* división de un núcleo de un átomo pesado (como el uranio o el plutonio) como consecuencia del impacto de un neutrón. Este impacto genera una reacción en cadena que libera energía en forma de calor.

*Fusión:* unión de los núcleos de isótopos de hidrógeno que libera gran cantidad de energía térmica. Este proceso de liberación de energía es el que ocurre en las estrellas, entre ellas, el Sol.

Gadolinio (Gd): elemento químico metálico, cuyo número atómico es 64 y su peso atómico 157.25. Está compuesto de ocho isótopos y forma

parte del grupo de las «tierras raras» (<https://www.lenntech.es/periodica/elementos/gd.htm>).

*MWth*: megavatios térmicos. Unidad de medida de la potencia térmica de un reactor. Se refiere a la energía de entrada necesaria para la producción de energía eléctrica.

*MWe*: megavatios eléctricos. Potencia eléctrica extraída de un reactor nuclear (<https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/glosario-de-terminos>).

*MWd/TonU*: megavatios diarios sobre tonelada de uranio.

*Reactor de agua a presión (Pressurized Water Reactor [PWR]) - Reactor de agua en ebullición (Boiling Water Reactor [BWR]) - Reactor CANDU (Canadian Deuterium Uranium)*: electrón-volts los principales tipos de reactores nucleares. Para más información sobre cada uno de ellos, visitar <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/centrales-electricas-convencionales/que-es-la-radioactividad>

*Reacción en cadena*: al fisiónar un núcleo impactado por un neutrón, se liberan otros neutrones que impactan en otros núcleos para producir nuevas fisiones. La energía que liberan explosivos clásicos (por ejemplo, la dinamita o el TNT) a nivel molecular son del orden de decenas de electrón volts (unidad de energía utilizada a nivel atómico). En cambio, la fisión libera valores del orden de los millones de electrón volts ([https://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/glosario\\_nuclear.html](https://rinconeducativo.org/contenidoextra/radiacio/glosario_nuclear.html)).

*Quemado de los EECC*: relación entre la energía obtenida de una carga de combustible al finalizar su vida útil y la masa inicial de esa carga. Suele

expresarse en megavatios eléctricos por día (MWd) generados por tonelada de combustible gastado. Al retirar los EECC del reactor, es muy importante, a nivel económico, haber alcanzado el mayor grado de quemado posible (<https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/glosario-de-terminos/quemado-grado-de/#:~:text=Referido%20al%20combustible%20de%20un,por%20tonelada%20de%20combustible%20gastado>).

*Sección eficaz:* la capacidad de fisión de los núcleos se mide a través del valor de la «sección eficaz» que presentan para la fisión (a mayor sección eficaz, mayor probabilidad de fisión), la cual depende de la energía de los neutrones que interactúan con los núcleos. A medida que esa energía disminuye, la sección eficaz aumenta y, por ende, también la capacidad de fisión (<https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-energia-nuclear/como-se-realiza-una-reaccion-nuclear/>).

*Soldadura TIG:* también denominada «soldadura de gas inerte de tungsteno», es un proceso de soldadura por fusión con propiedades especiales que permiten producir cordones de soldadura precisos y de alta calidad. Esta técnica es utilizada en la industria nuclear, la aeronáutica y la aeroespacial, entre otras (<https://www.lorch.eu/es/productos/soldadura-manual/soldadura-tig#:~:text=La%20soldadura%20TIG%20o%20soldadura,la%20industria%20aeron%C3%A1utica%20y%20aeroespacial>).

## Referencias bibliográficas

- ACS Recycling (26 de mayo de 2022). *Mercado de derechos de emisiones de CO2: qué es y cómo funciona*. <https://acsrecycling.es/mercado-de-derechos-de-emision-de-co2-que-es/#:~:text=Los%20derechos%20de%20emisi%C3%B3n%20de,el%20funcionamiento%20de%20este%20mercado>
- Alonso, M. (6 de septiembre de 2022). CAREM, el reactor modular. *TSS-Universidad Nacional de San Martín*. <https://www.unsam.edu.ar/tss/carem-el-reactor-modular/>
- Argentine Youth Nuclear Generation AYNG (3 de julio de 2016). *¿Cómo fueron los comienzos del proyecto CAREM?* [Video]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=G4lCOpPSdIs&ab\\_channel=ArgentineYouthNuclearGenerationAYNG](https://www.youtube.com/watch?v=G4lCOpPSdIs&ab_channel=ArgentineYouthNuclearGenerationAYNG)
- Baschar, I. (2014). *La Argentina a la vanguardia del desarrollo tecnológico nuclear: el caso del reactor CAREM-25*. OETEC-CLICET. <https://www.oetec.org/informes/bascharcaremsmr190514.pdf>
- Comisión Nacional de Energía Atómica (s.f.). *Reactor argentino CAREM*. Argentina.gob.ar. <https://www.argentina.gob.ar/cnea/carem>
- Debandi, A. (2018). *Fabricación y caracterización de pastillas combustibles de (U,Gd)O<sub>2</sub> nanoparticulado obtenido por coprecipitación inversa* [Proyecto integrador de la carrera de Ingeniería Nuclear, Instituto Balseiro, Comisión Nacional de Energía Atómica, Universidad Nacional de Cuyo]. RICABIB: Repositorio Digital Institucional del Centro Atómico Bariloche e Instituto Balseiro. <https://ricabib.cab.cnea.gov.ar/708/1/1Debandi.pdf>
- [Decreto 1107 de 2006 \[Poder Ejecutivo Nacional\]](#). *Por el cual se declara el prototipo de reactor CAREM de interés nacional*. 28 de agosto de 2006. <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/decreto-1107-2006-119215/texto>
- De Dicco, R. (2013). *Breve historia de los reactores nucleares de investigación y producción de la CNEA* (Documento de trabajo del Departamento de Tecnología Nuclear). CLICET.
- De Dicco, R., Deluchi, F. y Ferrer, J. (2015). *Argentina puesta a crítico: Resultados y desafíos del Plan Nuclear Argentino*. Planeta.

- Delmastro, D., Gil Posadas, C., Di Pace, M., Chocron, M., Conti, M. e Irigaray, M. (2017). CAREM escala comercial. *Revista CNEA, XVII*(67/68). [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/51/100/51100330.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/51/100/51100330.pdf)
- Del Pozzi, M. (19 de octubre de 2022). Destacaron el potencial del reactor nuclear de diseño nacional CAREM. *Diario Río Negro*. <https://www.rionegro.com.ar/energia/destacaron-el-potencial-internacional-del-reactor-nuclear-de-diseno-nacional-carem-2551481/amp/>
- Durán Vinuesa, L., Larriba del Apio, S. y Jiménez Carrascosa, A. (2022). Pequeños reactores modulares: el futuro de la energía nuclear. *Ingeniería Civil*, (201). <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2468>
- Estévez, E. A. (14-18 de noviembre de 2022). *Ingeniería, desarrollos y fabricación del Elemento Combustible y el Conjunto de Barras Control de Reactividad para el Reactor CAREM* [Ponencia]. 19º Reunión de la Gerencia Ciclo del Combustible Nuclear, Buenos Aires, Argentina.
- Foro Nuclear (2022). *Reactores Modulares Pequeños* (Monografía). [https://www.foronuclear.org/wp-content/uploads/2022/02/Monografia\\_reactores-\\_modulares\\_pequenos-002.pdf?x13653](https://www.foronuclear.org/wp-content/uploads/2022/02/Monografia_reactores-_modulares_pequenos-002.pdf?x13653)
- Gil Gerbino J. J. (2022). *Breve historia del CAREM*. AAPC. <https://aargentinapciencias.org/breve-historia-del-carem/>
- Gordon, O. (s.f.). *Small Modular Reactors: What is Taking so Long?* Energy Monitor. <https://www.energymonitor.ai/sectors/power/small-modular-reactors-smrs-what-is-taking-so-long/>
- Hurtado, D. (2014). *El sueño de la Argentina atómica: Política, tecnología y desarrollo nacional (1945-2006)*. Edhasa.
- International Atomic Energy Agency (2022). *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A suplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)*. [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_booklet\\_2022.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf)
- Instituto de Tecnología Sabato (1998). *Sabato en CNEA*. CNEA. <https://repositorio.esocite.la/472/1/UNSAM-CNEA1998-SabatoCNEA.pdf>

- Ley 25.160 de 1999. Ley de Financiamiento para el Proyecto CAREM. 27 de septiembre de 1999. <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/60000-64999/60297/norma.htm>
- Ley 26.566 de 2009. Ley de Actividad Nuclear. 24 de diciembre de 2009. <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/verNorma.do?id=162106>
- Mariscotti, M. (1985). *El secreto atómico de Huemul: Crónica del origen de la energía atómica en la Argentina*. Sudamérica-Planeta.
- OCIPEX (27 de noviembre de 2020). *La nucleoelectricidad debe definirse como política de Estado*: Entrevista a Mauricio Bisauta. <https://ocipex.com/articulos/la-nucleoelectricidad-debe-definirse-como-politica-de-estado>
- Santos, E. (2022). *Un diablo en Pilcaniyeu: Cómo se logró la producción de uranio enriquecido en Argentina*. Lenguaje Claro Editora.
- Zappino, J. S. (2021a). Empresas públicas y mixtas, tecnología y desarrollo II. El caso INVAP S.E. Parte 1. *Cuadernos del INAP (CUINAP)*, 2(78). <https://publicaciones.inap.gob.ar/index.php/CUINAP/issue/view/125>
- Zappino, J. S. (2021b). Empresas públicas y mixtas, tecnología y desarrollo II. El caso INVAP S.E. Parte 2. *Cuadernos del INAP (CUINAP)*, 2(79). <https://publicaciones.inap.gob.ar/index.php/CUINAP/issue/view/126>
- 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/article/view/275/251>
- 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/issue/view/144>
- 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/issue/view/>

## CUINAP | Argentina, Cuadernos del INAP

Año 4 - N.º 125 - 2023

### 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](mailto:dinvesti@jefatura.gob.ar)

**ISSN 2683-9555 (impreso) | ISSN 2683-9644 (en línea)**

### Editor responsable

Leandro Bottinelli

### Coordinación editorial

Leticia Mirás

### Edición y corrección

Eugenia Caragunis

### Arte de tapa

Roxana Pierri

Federico Cannone

### Diseño y diagramación

Lucía Fernández Carrascal

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](http://publicaciones.inap.gob.ar)

Agosto 2023





Secretaría de  
Gestión y Empleo Público



Jefatura de  
Gabinete de Ministros  
**Argentina**