

<http://dx.doi.org/10.18232/20073496.1576>

Artículos

La transición energética y su impacto en el desarrollo tecno-productivo: el caso de la industria nuclear en Argentina (2006-2024)

The energy transition and its impact on techno-productive development: the case of the nuclear industry in Argentina (2006-2024)

Manuel José Lugones¹, *  0000-0001-8181-1785¹ Universidad Nacional de Río Negro, Río Negro, Argentina.* Correspondencia: mlugones@unrn.edu.ar

Resumen. La preocupación por impulsar un proceso de transición energética abre nuevas posibilidades de innovación y creación de mercados, lo que demanda la elaboración de políticas públicas orientadas al desarrollo de soluciones tecnológicas. En este marco, la industria nuclear se inserta en este proceso mediante el impulso del desarrollo de nuevos conceptos de reactores orientados a complementarse con fuentes de generación renovables. En este trabajo se analiza el desarrollo de la industria nuclear argentina, tomando como punto de partida la decisión adoptada en 2006 de relanzar un plan de desarrollo nuclear. En particular, interesa identificar cuáles fueron las elecciones tecnológicas realizadas y aportar evidencia para analizar cuáles son los desafíos enfrentan y qué papel van a desempeñar los países de menor desarrollo relativo en dicho proceso.

CÓMO CITAR: Lugones, M. J. (2026). La transición energética y su impacto en el desarrollo tecno-productivo: el caso de la industria nuclear en Argentina (2006-2024). *América Latina en la Historia Económica*, 33(1), e1576. <https://doi.org/10.18232/20073496.1576>



Esta obra está protegida bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional

Palabras clave: industria nuclear; transición energética; modelo de desarrollo.

Abstract. The concern to promote an energy transition process opens new possibilities for innovation and market creation, which demands the development of public policies aimed at the development of technological solutions. In this framework, the nuclear industry is inserted in this process by promoting the development of new reactor concepts aimed at complementing themselves with renewable generation sources. This work analyzes the development of the Argentine nuclear industry, taking as a starting point the decision adopted in 2006 to relaunching a nuclear development plan. In particular, it is interesting to identify what technological choices were made and provide evidence to analyze what challenges they face and what role the relatively less developed countries will play in said process.

Key words: nuclear industry; energy transition; development model.

JEL: N76; N96; O38; Q48.

Recibido: 1 de abril de 2025.

Aceptado: 5 de agosto de 2025.

Publicado: 6 de marzo de 2026.

El presente artículo fue realizando en el marco del Proyecto PI UNRN 40-B-1197, titulado: *Políticas de Ciencia, Tecnología e Innovación en la Argentina del siglo XXI. Un análisis a partir de estudios de casos (energía, salud y telecomunicaciones) sobre las oportunidades y desafíos para implementar una estrategia de desarrollo.*

INTRODUCCIÓN

La transición energética se define como las acciones dirigidas a transformar los sistemas de generación, transmisión y consumo de energía para mitigar los efectos del cambio climático. En las últimas décadas, este proceso se ha convertido en un tema de creciente interés en la agenda global. La preocupación por la sostenibilidad ambiental presiona por patrones más sustentables y abre nuevas posibilidades para generar innovaciones y creación de mercados, lo que demanda por el diseño e implementación de políticas públicas orientadas a promover el desarrollo de soluciones tecnológicas orientadas a dicho objetivo.

A comienzos del siglo XXI, se observa que los principales actores que conforman la industria nuclear buscan revalorizar la energía nuclear e impulsar la expansión de la misma. En función de este objetivo, se destaca que la nucleoelectricidad es una fuente de energía no emisora que, a partir del desarrollo de nuevas tecnologías, puede complementarse con fuentes de generación renovables como la energía eólica y la solar, dando lugar a la conformación de sistemas de generación híbridos. Asimismo, esas nuevas tecnologías pueden emplearse para la producción de hidrógeno, la obtención de agua potable mediante la desalinización de agua de mar y la descarbonización de actividades industriales como la producción de acero, cemento y fertilizantes (mediante la cogeneración de calor y electricidad). De esta forma, en un contexto de resistencia social al tema nuclear, es posible advertir que se buscó incluir en la agenda global de la transición energética la energía nuclear como una opción técnica, económica y ambientalmente viable para impulsar dicho proceso.

En este contexto, se está presenciando una carrera en torno al diseño y puesta en marcha de pequeños y medianos reactores modulares (SMR por sus siglas en inglés)¹ que operan por debajo de los 300 MW, así como también el desarrollo de reactores de altas temperaturas que mejoren la eficiencia de generación, abaraten los costos de operación y reduzcan el volumen de desechos radioactivos. Entre los países que se encuentran inmersos en esta carrera, que no es sólo de carácter comercial, sino también geopolítica, se encuentran Estados Unidos, China, Rusia, Canadá, Corea del Sur, Reino Unido y Argentina, entre otros. Se trata de una dinámica que se define, de acuerdo con Merke (2022), como una “guerra fría verde”, que resulta en un escenario global dividido en bloques compitiendo por el control de recursos naturales, fuentes de energía, tecnologías y el dominio de mercado.

El análisis del desarrollo de una industria nuclear en países como Argentina es una vía de entrada para identificar qué desafíos enfrentan los países de menor desarrollo en términos de qué papel van a desempeñar en el proceso de transición energética, esto es, como exportadores de recursos naturales bajo la forma de bienes *commodities* e importadores de tecnologías, o como países con capacidades tecnológicas y productivas aptos para impulsar un proceso de desarrollo encaminado hacia la producción de bienes y servicios de mayor valor agregado y, de esta forma, avanzar hacia una autonomía tecnológica y energética como sustento para modificar su posición en el escenario internacional.

A partir de una metodología cualitativa de rastreo de procesos y la revisión de fuentes primarias y secundarias, este artículo se propone analizar el desarrollo de la industria nuclear argentina, tomando como punto de partida la decisión adoptada en 2006 de: *a*) finalizar la obra de la central nuclear de Atucha II (CNA-II) paralizada en 1994, *b*) extender la vida útil de la central nuclear de Embalse (CNE) y *c*) construir el prototipo de la Central Argentina de Elementos Modulares (CAEM). En particular, interesa identificar cuáles fueron las elecciones tecnológicas realizadas y discutir sus potenciales impactos en términos de facilitar un proceso de desarrollo tecno-productivo. Se requiere considerar cuáles son las tendencias de desarrollo de la industria nuclear en el escenario internacional y la trayectoria histórica de la industria nuclear argentina para identificar las particularidades de la estrategia adoptada en el relanzamiento del plan nuclear, la cual está determinada por las capacidades tecnológicas y productivas acumuladas a lo largo de su trayectoria, así como por la coyuntura nacional e internacional.

Si bien Argentina incorporó el tema de la transición energética dentro de los planes de desarrollo del sector nuclear elaborados en el periodo bajo análisis, este tema no constituyó el eje central a partir del cual se delineó la estrategia de desarrollo. Los argumentos presentados respecto de los potenciales aportes del sector al proceso de transición energética se incorporaron a la agenda ya avanzado el proceso de reactivación de la industria nuclear, por lo que su inclusión puede entenderse como un recurso utilizado para justificar el programa de inversiones y posicionar el programa nuclear en el escenario internacional.

En función de dichos elementos, en la primera parte se presentan las tendencias recientes de la industria nuclear a nivel mundial. En la segunda y tercera parte se analiza el desarrollo histórico de la industria nuclear argentina y su reciente evolución a partir del relanzamiento del plan nuclear en 2006, focalizando el análisis sobre tres de los principales proyectos implementados. En

¹ El concepto de pequeños reactores modulares (*small modular reactors*) se remonta a la década de 1950, momento en el cual la marina estadounidense estaba avanzando en el diseño de un reactor para aprovechar la energía nuclear como fuente para la propulsión de submarinos.

la cuarta y quinta parte se indaga la estrategia implementada por Argentina y la relación entre nucleoelectricidad y transición energética. Finalmente, en la sexta parte, se presentan las principales conclusiones que emergen del análisis de la trayectoria de la industria nuclear argentina.

LA INDUSTRIA NUCLEAR A COMIENZOS DEL SIGLO XXI

La industria nuclear comenzó a desarrollarse a fines de 1950 al ponerse en operación los primeros reactores comerciales (denominados de segunda generación). En ese momento, la estrategia seguida fue la construcción de reactores con una potencia creciente destinados a generar electricidad de base, es decir, se procuró lograr la competitividad de la nucleoelectricidad a partir de crecientes economías de escala. En ese entonces, dos fueron las estrategias impulsadas por las potencias nucleares de la época: Estados Unidos y la Unión Soviética que se volcaron hacia reactores de uranio enriquecido, puesto que eran los únicos países –en ese entonces– con la capacidad industrial para su producción; mientras que el Reino Unido y Francia, con el objetivo de no depender de proveedores externos de combustible nuclear, se orientaron al desarrollo de reactores de uranio natural como combustible. Por su parte, la firma Atomic Energy of Canadá Limited –en colaboración con la filial canadiense de General Electric– desarrolló entre finales de la década de 1950 y comienzos de la década de 1960, un reactor de uranio natural y agua pesada presurizada como moderador y refrigerante denominado CANDU (reactor del tipo PHWR).

En las siguientes décadas, se produjo una creciente adopción de la tecnología estadounidense de reactores, sobre la base de diferentes estrategias, como la de control por cooperación (Lugones y Vera, 2024). Esto permitió que se consoliden en el mercado internacional los reactores de uranio enriquecido y agua liviana como refrigerante y moderador, siendo los modelos más difundidos: el reactor de agua a presión (PWR) desarrollado por Westinghouse,² y en segundo término, los de agua en ebullición (BWR) fabricados por General Electric (Fernández et al., 2013).³ En la difusión y consolidación de la tecnología estadounidense de reactores también influyó el hecho de que las potencias nucleares europeas avanzaron en el desarrollo de su propia tecnología para la producción de uranio enriquecido, lo que les garantizaba el autoabastecimiento de combustible nuclear.

En la década de 1980, la desaceleración de la economía mundial, así como el creciente rechazo social tras los accidentes de Three Mile Island, en 1979, y Chernobyl, 1986, derivaron en un brusco freno de la industria en Occidente, lo que obligó a las principales empresas del sector a introducir modificaciones tendientes a mejorar la competitividad económica y la seguridad de los reactores (Char y Csik, 1987; Erramuspe, 1988). De esta forma, se buscó mejorar la eficiencia de generación, extender la vida útil de 40 a 60 años (permitiendo, además, incrementar los plazos de amortización del capital invertido) e introducir los sistemas de seguridad redundantes. Asimismo, se buscó simplificar la construcción y operación de las centrales reduciendo el número de sistemas y componentes. Como resultado de las mejoras introducidas, la industria avanzó en la oferta de los denominados reactores de tercera generación (Zappino, 2023).⁴ Estos comenzaron a ser comercializados en la primera década del siglo XXI, principalmente en el sudeste asiático, en particular

² Actualmente, 70 % de los reactores en operación y 80 % de los que se encuentran en construcción son del tipo PWR.

³ Un tercer modelo, cuya adopción fue creciendo en la década de 1960, pero cuya demanda disminuyó de manera abrupta en la década de 1980, con excepción de algunos reactores construidos por India y China sobre la base de adaptaciones al modelo original, son los PHWR tipo CANDU.

⁴ La variante denominada *generación III+* hace referencia a los reactores a los que se le incorporaron los sistemas de seguridad pasivos.

Corea del Sur, China e India, que se constituyeron a partir de la década de 1990 en el principal centro de expansión de la industria nuclear dada la fuerte demanda de energía de economías en franco crecimiento, altamente dependientes de combustibles fósiles importados y en la búsqueda de incrementar su presencia geopolítica.⁵

Según datos de 2024, Asia, Medio Oriente y Europa Central y Oriental concentran 47.1 % de los reactores en operación y 76.1 % de los que se encuentran en construcción. Esto significa que, de los seis principales productores mundiales de electricidad por vía nuclear, cuatro se encuentran en dichas regiones: China (12.4 y 39.7 %, respectivamente), Rusia (8 y 6.3 %, respectivamente), Corea del Sur (5.8 y 3.2 %, respectivamente) e India (4.4 y 11.1 %, respectivamente) (Comisión Nacional de Energía Atómica [en adelante CNEA], 2024).

A comienzos del siglo XXI, la industria nuclear se caracterizaba por una fuerte concentración de la actividad en un número reducido de proveedores de tecnología, agrupados en grandes grupos económicos que operan de forma global en diferentes unidades de negocios que, en algunos casos, trascienden al sector de energía. Entre otras empresas, se pueden mencionar el consorcio Areva, que es el resultado del proceso de fusiones y adquisiciones iniciado por la empresa francesa Framatome con otras compañías europeas, entre estas Siemens de Alemania, y que compite en el escenario internacional con el grupo coreano Kepco,⁶ la Corporación Nuclear Nacional China (CNNC)⁷ y el grupo estatal Rosatom de Rusia,⁸ que adquirieron una posición de relevancia en el mercado nuclear como resultado de la fuerte expansión de la nucleoelectricidad en el sudeste asiático, y que compiten por aumentar su participación e incidencia en otras regiones del globo.

En este contexto, desde el sector se comenzó a impulsar el diseño de nuevos conceptos de reactores que pueden combinarse entre sí.

El desarrollo de SMR como solución para abaratar los costos operacionales (con una recarga de combustible menos frecuente), acortar los plazos de construcción de seis a tres años (mediante el armado en serie) y reducir las barreras financieras derivadas de los altos costos de capital de las unidades más grandes. Asimismo, dado su reducido tamaño, no precisan emplazarse cerca de una fuente de agua para disponer de refrigerante, lo que permitiría instalarlos en lugares en los que no es rentable instalar una central nuclear convencional. Estos reactores incorporan nuevos

⁵ En 2018 entraron en operación el reactor EPR de Areva en la central nuclear de Taishan (China) con una potencia de 1 660 MW, cuya construcción demandó diez años y una inversión de 3 800 millones de euros, y el reactor AP1000 de Westinghouse en la central nuclear de Sanmen (China), de dos unidades de 1 157 MW de potencia cada una, que demandó también diez años de construcción y una inversión de 6 900 millones de euros.

⁶ El grupo Kepco nació en 1898 como la Compañía Eléctrica Hansung. En 1982 se constituyó en la Corporación de Energía Eléctrica de Corea. En 1978 finalizó la construcción de su primera central nuclear (Gori 1), logrando en 1995 su primer contrato en el sector nuclear fuera de Corea al ganar la licitación para operar la Central Nuclear de Malaya (Filipinas).

⁷ La CNNC se constituyó en 1988 como resultado de la reorganización del Ministerio de Industria Nuclear –encargado hasta ese momento del desarrollo del programa nuclear tanto civil como militar– para facilitar la obtención de fondos externos a través de exportaciones, siendo la única empresa de China que ha logrado exportar tecnología nuclear a otros mercados. Por otro lado, fue la primera empresa de ese país en lograr un diseño propio de reactor (el CNP-300 de segunda generación) (Jiménez y Qüeral, 2017).

⁸ El grupo Rosatom es un consorcio de empresas estatales rusas constituido en 2007 que abarca diferentes actividades en el campo nuclear: diseño y construcción de reactores, producción de radioisótopos para medicina y producción de combustible nuclear, entre otras áreas de negocios. El grupo ha exportado su modelo de reactor de agua presión y uranio enriquecido de tercera generación denominado VVER a diferentes países como: Turquía, Bielorrusia, Irán, India, Bangladesh, China y Eslovaquia.

estándares de seguridad pasiva que no requieren de una acción humana en caso de emergencia.⁹ En materia medioambiental, producirían un menor volumen de desechos, reduciendo los costos y riesgos asociados a su manejo a largo plazo. Finalmente, su baja potencia otorgaría flexibilidad operacional ajustando la producción de acuerdo con la demanda de electricidad, posibilitando su combinación con fuentes de energías renovables para compensar sus intermitencias.¹⁰

El desarrollo de reactores rápidos, por ejemplo, los refrigerados por sodio líquido de onda viajera, que funcionan con un ciclo de combustible cerrado que permite consumir el material que de otro modo se consideraría como “combustible gastado”, posibilitan reducir la cantidad y actividad de los desechos que deberán gestionarse, así como extender las reservas de uranio.

Y el desarrollo de reactores de cuarta generación de altas temperaturas (*high-temperature gas-cooled reactors*, HTGR), que incluyen el uso de nuevos refrigerantes (gases, metales fundidos o sales fundidas) y combustibles alternativos al uranio enriquecido (por ejemplo, el torio) con el objetivo de mejorar la eficiencia térmica y disminuir la cantidad de desechos y extender su vida útil a seis décadas reduciendo el impacto en los costos de inversión, que incluyen los gastos derivados de su futuro desmantelamiento. Por otro lado, este tipo de reactores ofrecen como ventaja adicional la generación de calor útil que podría utilizarse en diferentes procesos industriales.¹¹

Por lo tanto, pueden observarse dos tendencias en el desarrollo de los actuales prototipos según el tipo de innovación en la física de los reactores. Por un lado, se encuentran los diseños que trasladan a una escala menor los reactores de uranio enriquecido y agua ligera, ya sea en su versión PWR o BWR. En este caso, la innovación radica en la búsqueda de una reducción de los costos y en un aumento en el grado de seguridad. Por otro lado, los diseños que modifican la física de los mismos, tales como los reactores refrigerados por gas a alta temperatura, los de espectro neutrónico rápido y los reactores que utilizan sales fundidas, entre otros, con el objetivo de obtener mayor energía, reducir la cantidad y duración de los residuos radiactivos generados y obtener calor útil pasible de ser utilizado para otras actividades (International Atomic Energy Agency [en adelante IAEA], 2020).

Diferentes países, como Estados Unidos, Canadá, Reino Unido y China, así como iniciativas multinacionales como el GEN IV International Forum¹² (impulsado por Estados Unidos), están realizando importantes esfuerzos en materia de financiamiento para promover el desarrollo de SMR o reactores de cuarta generación. Dicho impulso está motorizado por un conjunto de empresas emergentes que no integran el *pool* de empresas que estuvieron detrás del desarrollo de la industria nuclear entre los años 1960 y 1980. Tal es el caso de Ultra Safe (Canadá), TerraPower (Bill Gates

⁹ En algunos diseños, se incluye un contenedor de acero como barrera de ingeniería adicional.

¹⁰ En 2019 se conectó a la red el primer SMR de diseño PWR (la central flotante Akademik Lomonosov de Rosatom con dos unidades de 35 MW). Esta central tiene la capacidad de generar energía para una ciudad de 100 000 habitantes y es utilizada también para la desalinización de agua de mar para la obtención de 240 000 metros cúbicos de agua potable por día.

¹¹ Los reactores de alta temperatura refrigerados por gas funcionan a temperaturas de hasta 950 grados Celsius, lo que los hace entre 20 y 33 % más eficientes térmicamente que los reactores refrigerados por agua. En los reactores de sales fundidas, tanto el combustible como el refrigerante son líquidos, de modo que las fisiones del núcleo, en el sentido tradicional, son imposibles. Y los reactores refrigerados por sodio líquido tienen una característica de seguridad incorporada: si se calientan, el sodio líquido se expande y permite que escapen más neutrones a través de los espacios entre los átomos, por lo que la reacción se detiene naturalmente.

¹² En el GEN IV International Forum participan: Estados Unidos, Argentina, Australia, Brasil, Canadá, China, Francia, Japón, Corea del Sur, Rusia, Sudáfrica, Suiza, Reino Unido y Euratom (que representa a 27 países miembros de la Unión Europea). A través de este, se propuso el desarrollo de diferentes tipos de tecnología, comprometiéndose los países participantes a producir al menos una: el reactor rápido refrigerado por plomo, el reactor de sal fundida, el reactor rápido refrigerado por sodio, el reactor refrigerado por agua supercrítica y el reactor de muy alta temperatura.

es uno de sus principales inversores), NuScale Power (Estados Unidos), Oklo (Estados Unidos), X-Energy (con colaboración con Dow Chemical) y U-Battery (empresa dirigida por URENCO, Reino Unido). Estas compiten con otras grandes empresas u organismos que poseen una larga trayectoria en la industria, como la CNNC, que junto con la empresa Huaneng y la Universidad de Tsinghua, pusieron en 2022 en operación un prototipo de reactor de alta temperatura HTGR refrigerado por gas de 200 MW de potencia, destinado a la producción de electricidad, calor e hidrógeno.

En este marco de creciente competencia, en la Conferencia Internacional sobre el Cambio Climático y el Papel de la Energía Nuclear de 2019, se definió a los SMR como una opción viable para contribuir a mitigar los efectos del cambio climático. Adicionalmente, estudios prospectivos sobre la potencial competitividad económica respecto de otras fuentes de energía indicaban que constituyen también una opción viable en términos económicos según las estimaciones de sus costos de construcción y operación, especialmente si se considera la volatilidad de los combustibles fósiles. A partir de lo cual el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA por sus siglas en inglés), avanzó entre 2015 y 2021 en la conformación de una plataforma sobre SMR y sus aplicaciones, con el objetivo de coordinar acciones para asistir en el desarrollo, despliegue y supervisión de los SMR, en otros términos, para garantizar su competitividad y fiabilidad (CNEA, 2021; IAEA, 2022; Zappino, 2023).

En 2024 la Unión Europea aprobó la inclusión de la energía nuclear y los combustibles alternativos como tecnologías estratégicas en su Ley para una Industria de Cero Emisiones. Esto ha conducido que algunos países europeos que habían abandonado el desarrollo de la nucleoelectricidad retomen sus planes de ampliación del parque de generación. Tal es el caso de Italia que anunció la formación de la plataforma nacional para una energía nuclear sostenible, con el objetivo de evaluar el uso de tecnologías innovadoras, como los reactores de cuarta generación.

En consecuencia, se sostiene que al tratarse de una fuente no emisora, comparable a la hidroelectricidad y la energía eólica, la energía nuclear puede utilizarse para sustituir centrales térmicas convencionales con el objeto de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y de otros contaminantes atmosféricos, permitiendo cumplir con las metas y objetivos establecidos en los acuerdos internacionales sobre cambio climático. Por otro lado, permitiría disminuir la dependencia sobre los combustibles fósiles y, para aquellos países que no cuentan con reservas o producción para autoabastecerse, reducir la incertidumbre asociada a la alta volatilidad de sus precios. Además, la energía nuclear, a diferencia de la eólica y solar, no requiere para su ubicación la existencia de emplazamientos específicos para su aprovechamiento (CNEA, 2021).

De esta forma, tanto desde la industria nuclear como desde la IAEA, en la última década se incrementaron los esfuerzos por impulsar el crecimiento del uso de la energía nuclear con el fin de promover la transición energética. En otros términos, se buscó enmarcar el desarrollo de los SRM dentro de la agenda de la transición energética y, de este modo, incluir el desarrollo e implementación de la tecnología nuclear dentro de las políticas de transformación del sistema de generación de energía.

TRAYECTORIA DE LA INDUSTRIA NUCLEAR EN ARGENTINA

El desarrollo de la nucleoelectricidad en Argentina se remonta a finales de la década de 1950, cuando se decidió aprovechar la energía nuclear generada a partir de reactores de uranio natural como combustible, el cual sería producido en el país para no depender de proveedores externos

(Hurtado, 2014; Lugones, 2020). Con la difusión de los primeros reactores comerciales, se determinó que el mercado eléctrico del Gran Buenos Aires-Litoral poseía el tamaño y costo de energía que tornaba factible la inclusión de la nucleoelectricidad (Alegria et al., 1964).¹³ Además, se justificó la construcción de la central por su importancia para el desarrollo industrial, al definirla como una *industria industrializante* (Martin, 1969), es decir, como una industria capaz de incentivar el desarrollo de otros sectores industriales, en particular el metalmecánico y el metalúrgico.

Por lo tanto, en la construcción de las dos primeras centrales nucleares (Atucha I –CNA-I– y CNE) se impusieron como criterios: *a*) que las mismas fueran de uranio natural y agua pesada para garantizar la autonomía tecnológica; *b*) complementar su entrada de operación en función de las fechas previstas de incorporación de las futuras centrales hidroeléctricas en construcción, lo que permitiría contribuir al objetivo de sustituir el uso de combustibles fósiles en la matriz energética, y *c*) fomentar el desarrollo industrial, para lo cual se estableció como condición que un porcentaje de los componentes serían provistos por empresas nacionales (Lugones, 2020).

En relación con el último objetivo arriba mencionado, para la construcción de una red de proveedores nacionales se utilizaron un conjunto diverso de instrumentos: *a*) se establecieron canales de transferencia de tecnológica y capacitación con las empresas proveedoras para que estas pudieran cumplir con los estándares técnicos y de calidad, y *b*) se utilizaron un abanico diverso de instrumentos de política industrial disponibles –en particular, regímenes impositivos– con el propósito de tornar competitivos los insumos de producción nacional respecto de los importados. En este sentido, se buscó complementar la política nuclear con la política industrial (Lugones, 2020; Rodríguez, 2020).

En la segunda mitad de la década de 1970, sobre la base del supuesto de un fuerte crecimiento de la demanda de electricidad, del encarecimiento del precio del petróleo y de que para mediados de la década de 1980 se habría alcanzado la plena utilización de los recursos hidroeléctricos, se propuso ampliar el parque de generación nuclear hasta un total de once centrales. Asimismo, se definió que las futuras centrales serían del tipo CANDU, ya que ese modelo se adecuaba mejor a las capacidades existentes de la industria local, por lo que presentaba las mejores perspectivas para impulsar una red de proveedores locales y, consecuentemente, constituir al país en un proveedor regional de tecnología, insumos y componentes para este tipo de reactores en los mercados externos (Castro, 1976).

En 1979 se aprobó dicho plan en el marco de la compra de la CNA-II y de la Plata Industrial de Agua Pesada (PIAP), aunque con una readecuación en el número y fechas de entrada de operación de las futuras centrales. La aprobación del plan se produjo en un contexto caracterizado por la entrada en vigor de las restricciones impuestas por el club de Londres.¹⁴ Esto obligó a la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) a abandonar la línea de reactores CANDU, asumir la función de subcontratista principal, impulsar la conformación de dos consorcios de empresas proveedoras (Nuclar y Argatom) y acelerar los proyectos de desarrollo de las tecnologías para el dominio del ciclo de combustible. Por otra parte, esto significó asignar recursos financieros adicionales para

¹³ En 1957 se rechazó la oferta de Inglaterra para adquirir un reactor nuclear de potencia. La compra fue desestimada aduciendo que el proyecto no reunía las condiciones adecuadas en cuanto a los costos de instalación y operación, así como también en relación con la participación del personal técnico e industria nacional en el proyecto de construcción (véase Lugones, 2020).

¹⁴ Las restricciones a la transferencia de tecnología, originalmente circunscriptas a la tecnología de enriquecimiento de uranio, se extendió a otras tecnologías del denominado ciclo del combustible nuclear, incluyendo la tecnología de reprocesamiento de los combustibles quemados.

acelerar el proceso de generación de capacidades locales y, con el objetivo de facilitar la gestión administrativa-financiera de las diferentes instalaciones fabriles de tecnología e insumos, se creó en el transcurso del final de la década de 1970 y finales de la década de 1980 un conjunto de empresas asociadas: Investigación Aplicada (INVAP, tecnología nuclear), Nuclear Mendoza (dióxido de uranio), Combustibles Nucleares Argentinos (elementos combustibles), FAE (aleaciones especiales), ENACE (ingeniería y construcción de centrales) y ENSI (agua pesada) (Hurtado, 2014; Lugones, 2020; Rodríguez, 2020).

En la década de 1980, la crisis de la deuda condujo a restricciones financieras con el consecuente atraso de las obras, lo que resultó en un incremento del costo financiero del programa nuclear (Cancio et al., 1990; Carciofi, 1990). Por otro lado, la modificación del escenario energético a partir del crecimiento del gas natural, la reducción en el valor real de las tarifas eléctricas y una tasa inferior a la prevista de crecimiento de la demanda de energía, resultó en un cuestionamiento del programa nuclear al modificarse las prioridades en materia de inversión hacia generación térmica convencional de módulos reducidos y de baja intensidad de capital (Guadagni, 1987; Lapeña, 2014).

Este proceso culminó en 1994 en el marco del proceso de reformas estructurales lo que derivó en una reorganización institucional del sector nuclear. A la par que se privatizaron las principales empresas del sector energético nacional, se produjo la disolución de la empresa ENACE y se transfirió el control de las centrales nucleares a un nuevo actor creado a tal efecto: Nucleoeléctrica Argentina S. A. (NASA), que tenía por función finalizar la obra de la CNA-II y proceder con la privatización de las tres centrales nucleares, proyecto que no pudo ser concretado debido a la ausencia de recursos financieros suficientes para concluir dicha obra y el desinterés de los actores privados por adquirir las otras dos centrales (Hurtado, 2014; Rodríguez, 2015).

De esta forma, el desarrollo de una industria nuclear en Argentina estuvo determinado por el objetivo de la autonomía tecnológica y de contribuir a la solución del déficit del sistema eléctrico nacional y al proceso de industrialización (Lugones, 2020). En este marco, la elección de la línea de reactores basado en uranio natural como combustible se constituyó en un factor decisivo para la persecución de dicho objetivo. En esta dirección, si bien Argentina para principios de la década de 1980 había logrado desarrollar a escala piloto la tecnología para la obtención de uranio enriquecido, esto respondió a un objetivo de posicionamiento en el escenario internacional. Reorientar el programa nucleoelectrico hacia otro tipo de reactores se consideró improcedente, entre otros aspectos, por el volumen de capital requerido para su producción a escala industrial: 1 000 millones para una planta de centrifugado o 4 000 millones de dólares para una de difusión gaseosa, según valores de la época (Araoz, 1982).

EL RELANZAMIENTO DEL PLAN NUCLEAR ARGENTINO

En 2006 se relanzó el plan nuclear al anunciarse las inversiones para finalizar la CNA-II, extender la vida útil de la CNE, avanzar en el desarrollo del CAREM, reanudar la producción de uranio enriquecido y evaluar la factibilidad de incorporar una cuarta central. Este relanzamiento se produjo tras tres años de elevadas tasas de crecimiento económico que empujaron la demanda energética, generando un escenario de restricción en la oferta de energía, impulsando la necesidad de fomentar inversiones para ampliar la capacidad de generación (Rodríguez, 2020).

Este proceso se enmarcó dentro de un conjunto de medidas dirigidas a impulsar el desarrollo de capacidades tecno-productivas, a partir de un Estado nacional que asumió el papel de productor y usuario –a través del subsistema de empresas públicas y el Ministerio de Planificación e Inversión Federal– en torno a un conjunto de grandes proyectos que buscaba aprovechar capacidades tecnológicas y productivas acumuladas no sólo en el sector nuclear, sino también en petróleo y gas y telecomunicaciones. Aunque la capacidad de generar encadenamientos aguas arriba y abajo se vio debilitado por una inadecuada articulación entre las políticas de ciencia, tecnología e innovación y las políticas industriales y de infraestructura (Lavarello y Sarabia, 2015).

A medida que el programa nuclear fue avanzando, quedó inserto en una nueva geopolítica energética por la disputa por el control y acceso a los distintos recursos para generar energía, como de los “corredores energéticos” por lo que dichos recursos llegan a los diferentes mercados. Estados Unidos, en su disputa hegemónica con China, busca revertir el deterioro de su entramado productivo-nuclear y recuperar la incidencia perdida en la configuración global de dicha industria, para lo cual, promueve inversiones para desarrollar innovaciones en la tecnología de reactores y despliega diferentes estrategias para bloquear el desarrollo de tecnologías que le puedan disputar espacio en los mercados internacionales (Ceppi, 2022; Cúneo, 2024).

En este contexto nacional e internacional, la CNEA elaboró el plan estratégico 2010-2019, y su posterior actualización en el plan estratégico 2015-2025, en el cual quedaron plasmados los siguientes objetivos: *a)* contribuir tecnológicamente a la generación eléctrica a través de la energía nuclear, evaluando la incorporación de nuevas centrales de potencia; *b)* construir y operar el prototipo de la Central Nuclear CAREM y avanzar en el diseño del modelo comercial, para insertar a Argentina en el grupo de países diseñadores de centrales nucleares de potencia, y *c)* operar la planta de enriquecimiento de uranio *mock-up* por difusión gaseosa y desarrollar otras tecnologías para el desarrollo de elementos combustibles,¹⁵ con el fin de afianzar el dominio tecnológico de todas las etapas del ciclo de combustible y garantizar la provisión nacional de elementos combustibles (CNEA, 2015).¹⁶

Las centrales de potencia Atucha II y Embalse

La construcción de CNA-II se había iniciado en 1980 tras el contrato firmado entre la CNEA y Kraftwerk Union (KWU), empresa perteneciente al grupo Siemens. Para la ejecución de ese proyecto se fundó la empresa Empresa Nuclear Argentina de Centrales Eléctricas (ENACE, integrada 25 % por Siemens y el restante 75 % por CNEA). A partir de 1982, la obra comenzó a sufrir retrasos por demoras en la ejecución presupuestaria y por la depreciación presupuestaria como resultado de las condiciones macroeconómicas. En el marco de las reformas estructurales de comienzo de la década de 1990, en 1994 la obra fue detenida y se resolvió la disolución de ENACE, quedando a cargo de la misma la empresa NASA.

¹⁵ Incluye el desarrollo de elementos combustibles de mayor quemado para reactores de tercera y cuarta generación, para reactores del tipo PWR y para el reactor CAREM; asimismo comprende introducir mejoras de los elementos combustibles para la central de Atucha II y consolidar la tecnología de fabricación de elementos combustibles de óxidos mixtos.

¹⁶ En 2014 se finalizaron las tareas de recuperación de las capacidades de enriquecimiento de uranio mediante la tecnología de difusión gaseosa en la planta piloto del Complejo Tecnológico Pilcaniyeu. Por otro lado, se impulsaron líneas de investigación y desarrollo para obtener las tecnologías de ultracentrifugación y de separación isotópica por láser para enriquecimiento de uranio.

Durante la década de 1990 no se registran mayores avances en la obra. Los esfuerzos se dirigieron a introducir modificaciones en la CNA-I para que esta opere con elementos combustibles de uranio levemente enriquecido (al 0.85 %), lo que permitió disminuir 40 % el consumo de combustible y, en consecuencia, reducir los costos operativos 30 %. Es decir, los esfuerzos se concentraron en mejorar la competitividad de las centrales en operación comercial.

En 2006, la NASA y la CNEA retomaron la construcción de la CNA-II, lo que implicó reactivar la PIAP para disponer de la primera carga de agua pesada. En 2012 la empresa Combustibles Nucleares Argentinos (CONUAR) entregó los elementos combustibles de la primera carga del núcleo del reactor, mientras que ENSI –empresas encargadas de la administración de la PIAP– completó la entrega del inventario inicial de las 600 toneladas de agua pesada. Esto permitió iniciar en 2013 las pruebas de sincronización con la red eléctrica y entró finalmente en operación comercial en 2015.

En paralelo, en 2007 NASA puso en marcha el proyecto de extensión de la vida útil de la central de Embalse para ampliar su vida operativa por 30 años adicionales, lo que demandó cambiar los tubos de presión, los generadores de vapor, los tubos de calandria y alimentadores, y los sistemas electrónicos. En 2019 se realizó la puesta a crítico y se obtuvo la licencia para reiniciar la operación comercial para su segundo ciclo de vida.

El proyecto CAREM

El proyecto CAREM tiene sus orígenes en 1983 al proyectarse el concepto de un reactor de baja potencia (15 MW) para el suministro de electricidad a regiones aisladas, lo que dio lugar, en 1984, al contrato con la empresa INVAP para la ingeniería y construcción de instalaciones de soporte para el desarrollo del proyecto. En 1987 se realizó el estudio para una central de mediana potencia (380 MW) basada en un reactor de agua presurizada del tipo de recipiente a presión, con la posibilidad de configurarla para un reactor del tipo de tubo a presión, que pudiera utilizar diferentes tipos de combustibles (uranio natural, uranio ligeramente enriquecido y plutonio).¹⁷ En un mercado internacional deprimido por los elevados costos de instalación y una menor demanda producto del accidente de Chernobyl, el proyecto se ofrecía como una alternativa tecnológica orientada hacia países de menor desarrollo por su menor costo financiero, por su impacto sobre la industria local al requerir la fabricación de equipos más pequeños que pueden fabricarse en serie, por los menores gastos en diseño e ingeniería y por presentar una mayor flexibilidad y adaptación a redes de distribución eléctrica con capacidades limitadas para absorber energía adicional (González et al., 1987; Zappino, 2023).

Durante las décadas de 1980 y 1990, dado el contexto de restricción presupuestaria y macroeconómico vigente en aquellos años, la empresa INVAP, que fue el principal contratista de la CNEA para el desarrollo del proyecto hasta 1999, decidió concentrar sus esfuerzos al desarrollo y exportación de reactores multipropósito: el RP-10 (a Perú), el NUR (a Argelia) y el EETR (a Egipto), lo que implicó importantes demoras en la ejecución del proyecto. No obstante, en 1997 se puso en marcha el RA-8, diseñado y construido para utilizarse como facilidad crítica para pruebas de diseño

¹⁷ El estudio de ingeniería conceptual y básica fue realizado por ENACE, y fue denominado Proyecto ARGOS PHWR 380.

del prototipo del CAREM, que funciona en el Complejo Tecnológico Pilcaniyeu (provincia de Río Negro), donde se encuentra instalada la planta piloto de enriquecimiento de uranio desarrollada por INVAP a principios de la década de 1980.¹⁸

A inicios del presente siglo, el proyecto comenzó a redefinirse tras la incorporación de Argentina al GEN IV International Forum. Finalmente, en 2006, el CAREM fue declarado de interés nacional (Decreto PEN 1.107/06), lo que dio lugar a la conformación de la gerencia CAREM dentro de la estructura de la CNEA. Esta área se consolidó en 2012 al establecerse un fideicomiso a cargo del Banco Nación de Argentina para su financiamiento. Esto permitió financiar los estudios de ingeniería tendentes al diseño del prototipo del reactor.

En 2014 se inició la construcción del prototipo del CAREM de 32 MW (con la capacidad de abastecer de energía a una ciudad de 100 000 habitantes) en un predio lindante a las centrales de Atucha I y II. La construcción del prototipo tuvo por objetivo validar el diseño y avanzar en el desarrollo de un modelo comercial, estableciéndose como meta que 70 % de los materiales, componentes y servicios sean provistos por empresas nacionales. De acuerdo con la planificación original, se estipulaba tener el prototipo operativo en 2019.

A lo largo de este proceso se estableció la utilización de uranio levemente enriquecido (entre 1.8 y 3.4 %) como combustible y agua liviana como refrigerante. Por otro lado, se avanzó en la ingeniería de diseño del reactor autopresurizado integrando el circuito primario, los generadores de vapor y los mecanismos de control al recipiente de presión, la circulación del refrigerante por convección natural (sistema de seguridad pasivo), por lo cual no requiere de bombas de refrigeración, para una vida útil estimada de 40 años. Asimismo, se fabricaron los prototipos de los elementos combustibles y, finalmente, se propuso el diseño conceptual del “CAREM comercial” o central nuclear CAREM-480, que se compone de cuatro módulos de 120 MW cada uno, es decir una central multimodular que permitiría aprovechar economías de escala para bajar los costos de capital –mediante la construcción escalonada por módulos, lo cual a su vez facilitaría la fabricación en serie de componentes– y operacionales al tener sistemas compartidos, como, por ejemplo, la pileta de combustibles quemados (Delmastro et al., 2017; Zappino, 2023).

Tanto a nivel internacional como nacional, los ejercicios de estimación de costos son indicativos al no existir aún proyectos que brinden información verificable. No obstante, se realizaron análisis económico-financieros sobre la base de estudios elaborados por otros países –por ejemplo, Canadá– para la construcción y operación de un CAREM-120 y un CAREM-480. Las estimaciones obtenidas –según valores a junio de 2020 del costo promedio de generación– muestran costos nivelados de generación de electricidad competitivos tanto a nivel nacional como internacional: 80 dólares por MWh para un CAREM-120 y 68.2 dólares por MWh para un CAREM-480 (CNEA, 2021). Por lo cual, se definió al CAREM como una alternativa económica y técnicamente competitiva.

Sin embargo, a finales de 2023, la decisión del gobierno recién asumido de Javier Milei de suspender las inversiones en obras públicas significó paralizar la obra del CAREM que, según estimaciones de Zappino (2023), se encontraba avanzada en un 80 % (el avance físico total era del

¹⁸ En el RA-8 se realizaron estudios sobre el efecto de los venenos quemables (incluidos en las barras combustibles) en la reactividad del reactor, los coeficientes de seguridad y los límites de concentración de boro en el moderador. Los ensayos estaban destinados a verificar y ajustar los cálculos neutrónicos (Zappino, 2023).

orden de 60 %), pese a los atrasados registrados entre 2016 y 2019 por la deudas generadas y el consecuente retiro de dos de los principales contratistas (TECHINT y TECNA),¹⁹ y entre 2020 y 2021 por la situación de emergencia sanitaria de la pandemia de COVID-19.

La cuarta y quinta central nuclear de potencia

En 2010 Argentina inició negociaciones con China para adquirir dos reactores de potencia por un costo total estimado de 14.5 mil millones de dólares. Uno del tipo CANDU, copia de los reactores canadienses comprados por dicho país en 2002, lo que permitiría aprovechar las capacidades instaladas en materia de combustibles y agua pesada existentes en el país. El segundo correspondería a un reactor de tercera generación HPR-1000,²⁰ esto es, de uranio enriquecido y agua liviana. En 2014 se firmaron las cartas de intención y memorandos de entendimiento, los cuales fueron objeto de varias revisiones por el gobierno de Mauricio Macri que asumió a fines de 2015. Entre otros aspectos, se cuestionó que el proyecto demandaba una serie de modificaciones para que el reactor CANDU pudiera satisfacer los requerimientos de seguridad pos-Fukushima, lo que podría resultar en un incremento de 800 a 1 000 millones sobre el costo original, lo cual a su vez redundaría en un alto costo de capital por MW instalado (Caro, 2023). Esto condujo a renegociar los acuerdos alcanzados con China, lo que en la práctica implicó la suspensión del proyecto. Sin embargo, en 2018 hubo un cambio de posición. Por un lado, se anunció que se desestimaba la compra de la central de tipo CANDU, y en 2019, se declaró que había interés por avanzar en la compra de la otra central, aunque sin fecha prevista por la situación económica del país.

Por otro lado, dichos contratos fueron objetados por su carácter de llave en mano, por lo que no estaba garantizada la apertura del paquete tecnológico y, por lo tanto, que efectivamente Argentina pudiera acceder a la tecnológica para la producción nacional de los combustibles nucleares. Este cuestionamiento cobró fuerza al darse a conocer las condiciones fijadas para el financiamiento de la central por parte del Banco Industrial y de Comercio de China (ICBC por sus siglas en inglés).

Las marchas y contramarchas que mostró el gobierno argentino entre fines de 2015 y 2019 fueron una respuesta a las presiones ejercidas tanto por China como por Estados Unidos. El retorno al diálogo por las centrales se produce después de la decisión de China de reducir de forma significativa las importaciones de soja y aceite de soja argentino, con su consecuente impacto sobre

¹⁹ Los principales contratistas del proyecto son: IMPSA; TECHINT; Combustibles Nucleares Argentinos; TECNA; SIEMENS; INVAP; Babcock Noell GMBH; Besna; MSF Tech; Secin; Delta 3; Fundación Universidad Nacional de Cuyo; Hochtief Solutions; Ingelsud; Nuclearis; Tecnatom; Vortex Design Solutions; ENSA Equipos Nucleares; Bilfinger; Darchem Engineering y Areva.

²⁰ El HPR o Hualong One es un reactor de tercera generación cuyo diseño fue anunciado en 2014 y es el resultado de la combinación del diseño del reactor ACPR-1000 de la China General Nuclear Power Group (CGN) y del ACP-1000 de la CNNC. Los cuales, son el resultado de mejoras realizadas a la tecnología de los reactores de segunda generación PWR denominados M310 que China adquirió a Framatome en la década de 1980. En 2021 entró en operación comercial el primer HPR: la unidad cinco de la Central Nuclear de Fuqing. Este es ofertado de forma independiente por ambas compañías a través de sus cadenas de suministros. Cada una mantiene sus propias versiones con pequeñas diferencias, aunque se lo considera un modelo estandarizado. El modelo de la CNNC pone más énfasis en los sistemas de seguridad pasiva en competencia con el AP1000 de Westinghouse, mientras que el de CGN en los de seguridad activa compitiendo con el EPR de Areva (Jiménez y Queral, 2017). En 2017 el Reino Unido inició el proceso de evaluación para su posible compra para la Central Nuclear de Bradwell, mientras que en 2015 se inició la construcción de dos de las seis unidades vendidas a Pakistán.

la balanza de comercio exterior (Haro, 2019). En paralelo, Estados Unidos desplegó diferentes estrategias de hostigamiento diplomático en diferentes ámbitos de actuación bilateral (Blinder y Vila, 2023).

En 2021 el gobierno de Alberto Fernández, que asumió a fines de 2019, retomó las negociaciones con China y, a principios de 2022, firmó el contrato de compra de una central del tipo HPR-1000 por un monto de 8 300 millones de dólares, con una participación estimada de la industria nacional en su construcción en torno al 40 %. Este último contrato también fue objeto de críticas, dado el valor y las condiciones de financiamiento pactadas, que implicaba que el costo de la energía generada sea entre 40 y 50 % más alto que el de reactores similares ofrecidos por otros fabricantes, por el ejemplo el AP1000 de Westinghouse o el EPR de Areva (Caro, 2023). Otro punto crítico fue el porcentaje de financiamiento. El contrato estipulaba que China financiará 85 % del costo total de la central. Dado el escenario de restricción externa de la economía, se iniciaron conversaciones en 2023 para elevarlo a 100 %. En ese contexto, a finales de dicho año se decidió prorrogar el contrato hasta 2025.

Por otro lado, este último acuerdo alcanzado con China no implicaba el abandono de la meta de seguir desarrollando la línea tecnológica de reactores del tipo CANDU, aunque sí su postergación y dejó abierta la posibilidad de incorporar una quinta central de este tipo. En este marco, NASA creó un grupo de trabajo para avanzar sobre el diseño de la ingeniería aprovechando la experiencia acumulada en el proceso de extensión de la vida útil de la CNE y en la colaboración realizada –en 2009– con la empresa de Energía Atómica de Canadá en el desarrollo del CANDU-6 y el CANDU avanzado ACR-1000 (CNEA, 2021).

La potencial compra de dichos reactores estuvo atravesada por el interés de China en expandir su influencia en la región (así como el interés por incrementar su participación en el mercado nuclear como exportador de tecnología), lo que implicó, de acuerdo con Caro (2023), vincular el proyecto con otras negociaciones encaradas entre ambos países: un *swap* de monedas, la construcción de dos centrales hidroeléctricas y la instalación de una base de observación espacial en la región patagónica. En otros términos, la cooperación nuclear con China se produjo en el marco de la conformación de una relación bilateral que se elevó al estado de asociación estratégica en 2014 (Haro, 2019), y que ha sido objeto de presiones internacionales, en particular de Estados Unidos que pretende evitar el avance de China en la región, lo que se agrega a la presión ejercida para que Argentina desestime seguir avanzando en el desarrollo del CAREM. A diferencia de la etapa anterior, la presión no sólo fue ejercida a través de los diversos canales diplomáticos, sino que fue acompañada a través de declaraciones en contra del acuerdo en diferentes medios de comunicación es las que se alertaba, por ejemplo, sobre la falta de seguridad de los reactores chinos (Blinder y Vila, 2023).

ESTRATEGIA TECNOLÓGICA ADOPTADA POR ARGENTINA

La finalización de Atucha II y la extensión de la vida útil de Embalse, supuso poner en marcha una estrategia similar a la instaurada desde 1980 a nivel mundial: ampliar el uso de las centrales existentes como una forma de amortizar las inversiones realizadas e incorporar mejoras en los sistemas de seguridad, operación y mantenimiento. Para el caso específico de Argentina, significaba, además, sostener un mercado para las empresas del sector creadas para abastecer de insumos a un parque nucleoelectrico basado en uranio natural y agua pesada. Por otro lado, avanzar sobre la

compra de una central del tipo CANDU, junto con la participación en el desarrollo del CANDU-6 y del CANDU avanzado ACR-1000, suponía retomar los objetivos planteados en el plan nuclear de 1974 de constituir al país en exportador de reactores y componentes para este tipo de centrales.

De forma complementaria, a través del proyecto CAREM y la adquisición de una cuarta central de potencia, se tomó la decisión de avanzar sobre la línea tecnológica de reactores que utilizan elementos combustibles de uranio enriquecido. Esto exigió fortalecer las líneas de investigación y desarrollo de diferentes tipos de combustibles nucleares, como los combustibles mixtos, por lo cual no sólo se buscó garantizar su autoabastecimiento, sino avanzar sobre el dominio completo del ciclo de combustible, lo que permitiría en un futuro seleccionar diferentes alternativas en las tecnologías de reactores sin que este afecte el objetivo de la autonomía tecnológica.

Para avanzar en ambas direcciones, al igual que la estrategia aplicada entre mediados de las décadas de 1960 y 1970, se buscó aprovechar el escenario internacional de creciente competencia entre los principales proveedores de tecnología nuclear para establecer acuerdos de cooperación con socios internacionales que, en su búsqueda por ampliar su presencia en los mercados internacionales, estuvieran dispuestos a otorgar ciertas facilidades financieras para la construcción de nuevas centrales y transferir el paquete tecnológico para la fabricación de los elementos combustibles. Además de los memorándums firmados con China, en 2011 el Ministerio de Planificación e Inversión Federal firmó un acuerdo de entendimiento sobre cooperación para los usos pacíficos de la energía nuclear con el grupo Rosatom, precalificando al mismo como potencial proveedor de una central nuclear.

Sin embargo, es necesario observar que la decisión de avanzar en la línea tecnológica de reactores de uranio enriquecido a partir de los acuerdos firmados con China estuvo condicionada por el contexto macroeconómico de restricción externa que se impuso a partir de 2010. En dicho marco, tanto en 2014 como en 2019, pese a las diferencias política de los gobiernos de turno, se resaltó que el acuerdo nuclear era parte de la construcción de una alianza estratégica integral que incluía, entre otros aspectos, el acuerdo por un *swap* de monedas para reforzar las reservas del tesoro nacional.

Respecto a la decisión de retomar el desarrollo del CAREM, para la CNEA, la energía nuclear, y en particular los SMRS, constituía la oportunidad para posicionar a Argentina en el escenario internacional como un país exportador de una tecnología innovadora, lo que a su vez, contribuiría a reducir la restricción externa de la economía favoreciendo el ingreso de divisas,²¹ y de proporcionar un equipamiento de generación eléctrico que puede utilizarse para garantizar el acceso a la energía en regiones aisladas del sistema eléctrico (CNEA, 2021).

De esta forma, en el marco de las tendencias innovativas a nivel mundial, a lo largo del periodo bajo análisis se buscó construir una estrategia propia aprovechando las capacidades tecnológicas e industriales adquiridas en las etapas anteriores. Sin embargo, la búsqueda de una estrategia autónoma, con el potencial de apalancar el desarrollo de otros sectores productivos, se vio crecientemente condicionada por el deterioro de las condiciones macroeconómicas, los giros políticos e ideológicos y la influencia de las potencias nucleares.

²¹ Según estimaciones de IAEA el mercado potencial a futuro para los SMR asciende a los 300 000 millones de dólares, registrándose un creciente interés por este tipo de reactores de países en vías de desarrollo que no pueden financiar los 10 000 millones o 12 000 millones de dólares de inversión que requieren las grandes centrales nucleares de 1 000 a 1 200 MW (Zappino, 2023).

TRANSICIÓN ENERGÉTICA Y NUCLEOELECTRICIDAD EN ARGENTINA

La preocupación por el medio ambiente puede rastrearse en Argentina hacia finales de la década de 1990. A partir de entonces, se tomaron las primeras medidas tendentes a la incorporación de energías renovables. Avanzado el presente siglo, a partir de 2009 comenzaron a ganar fuerza diferentes programas tendentes a ampliar la producción de energía eólica y solar.²² Posteriormente, en 2019 se sancionó la ley 27.520 de presupuestos mínimos de adaptación y mitigación al cambio climático global, alineando los objetivos del país con los del Acuerdo de París (tratado bajo la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático), que estableció como objetivo no exceder la emisión neta de 349 000 000 de toneladas de dióxido de carbono equivalente para 2030.

En este marco, la CNEA y NASA, además de legitimar el programa nuclear, al igual que en las décadas de 1960 y 1970, en función de su impacto en la reducción del déficit del sistema eléctrico, la diversificación de la matriz energética y el impulso del desarrollo industrial, incorporó como elemento novedoso su potencial contribución al proceso de transición energética, al definir la energía nuclear como una fuente de generación “limpia y segura para el medioambiente” de electricidad e hidrógeno verde, así como la descarbonización de actividades industriales mediante el aprovechamiento de calor (CNEA, 2021).²³

En este sentido, se afirmó que la energía nuclear podría complementarse con otras fuentes renovables considerando, por un lado, que las mismas no pueden cubrir todas las necesidades energéticas en un plazo de tiempo razonable y, por el otro, que, por sus ciclos de funcionamiento e intermitencia, no garantizan la provisión de la cantidad de energía necesaria en los momentos que necesita ser consumida (Sapino, 2023). Asimismo, ampliar la capacidad de generación de energía de base mediante la incorporación al sistema 1 200 MW de origen nuclear, permitiría reducir la demanda de combustibles fósiles y reemplazar sistemas de generación convencionales por otros no emisores de gases de efecto invernadero.

En estos términos, la estrategia a seguir implica incorporar nuevos reactores a gran escala para proveer energía de base y un SMR para complementar la oferta de energía a través de fuentes renovables (sistema de generación híbrido) y, de esta forma, cumplir con las metas establecidas de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Objetivo que no es incompatible con el interés de contar con una tecnología capaz de ser exportada (en referencia al CAREM) y contribuir a la generación de divisas.²⁴

De esta forma, la CNEA y la NASA adoptaron y replicaron a nivel local los principios emanados desde la IAEA y la industria nuclear a nivel mundial respecto a sostener al proceso de transición energética como una ventana de oportunidad para legitimar socialmente la nucleoelectricidad

²² Hacemos referencia al régimen de regulación y promoción para la producción y uso sustentables de biocombustibles, el régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica, el proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa, el programa de abastecimiento de energía eléctrica a partir de fuentes renovables y el régimen de fomento a la generación distribuida de energía renovable integrada a la red pública, entre otros.

²³ No obstante, la industria nuclear a nivel global enfrenta los siguientes retos: a) el rechazo social a la industria nuclear por los cuestionamientos a las condiciones de seguridad y del tratamiento de los desechos nucleares. b) Y que no se ha logrado probar aun que los SMR sean económicamente competitivos frente a otras alternativas tecnológicas disponibles.

²⁴ La central de Embalse se utiliza para obtener cobalto-60 que, a su vez, se comercializa en los mercados externos. Por lo tanto, sostener la central operativa permitiría garantizar la producción de dicho radioisótopo.

como una opción tecnológica, económica y ambientalmente viable. No obstante, los compromisos asumidos en el plano internacional y plasmados en diferentes normativas a nivel nacional, las acciones dirigidas a diversificar la matriz energética y limitar la dependencia sobre los hidrocarburos no fueron consistentes. Por el contrario, a partir de la renacionalización de Yacimiento Petrolíferos Fiscales, los combustibles fósiles fueron adquiriendo una creciente centralidad, en particular la explotación de gas no convencional en la región de Vaca Muerta, provincia de Neuquén, por su importancia para reducir el impacto negativo de las importaciones de gas desde Bolivia sobre la balanza de pagos e incrementar los ingresos de divisas vía exportaciones para reducir la restricción externa de la economía. De esta forma, la política energética se constituyó en un problema de orden macroeconómico (Ceppi, 2022), lo que impidió desarrollar una planificación integral que articulara la incorporación de nuevos equipamientos de generación eléctrica tendientes a incrementar y articular la participación de fuentes no emisoras y energías renovables en la matriz de generación.

En otros términos, si bien en el plano discursivo el proceso de transición energética fue presentado como una de las motivaciones de ampliar la capacidad de generación nucleoelectrónica, esto no fue resultado de un plan a largo plazo que contemplara las distintas opciones en términos de sus costos de oportunidad, las fechas de incorporación de nuevos equipamientos para evitar que una fuente de energía actúe en detrimento de las otras fuentes, etc. Así, por ejemplo, no se evaluó adecuadamente si convenía desarrollar proyectos de energía solar y eólica antes de optar por la compra de una cuarta central.

CONCLUSIONES

El desarrollo de una industria nuclear en Argentina entre 1950 y 1990 se sostuvo en un conjunto de decisiones estratégicas que permitieron alcanzar una relativa autonomía tecnológica pese al contexto de inestabilidad política-institucional de dicho periodo. Esto permitió conformar un complejo nuclear integrado por la CNEA y un número reducido de empresas asociadas encargadas de la producción de diferentes insumos necesarios para el funcionamiento de las centrales nucleares.

La estrategia desplegada bajo la idea rectora de la autonomía tecnológica se sustentó en torno a los siguientes ejes: *a)* contribuir con el desarrollo del sistema eléctrico a través de la diversificación de la matriz energética sin afectar la participación de la hidroelectricidad, *b)* operar centrales nucleares con combustibles de producción nacional, lo que implicó optar por la tecnología alemana y canadiense de reactores de uranio natural y agua pesada; *c)* establecer acuerdos de cooperación estratégica con proveedores externos de tecnología dispuestos a otorgar facilidades financieras y transferir la tecnología de fabricación de los elementos combustibles, y *d)* posicionar a Argentina como líder regional y país exportador de tecnología nuclear en los mercados externos, apuntado a especializarse en los reactores del tipo CANDU (Lugones, 2020).

Tras la parálisis del sector en la década de 1990, a partir de las capacidades existentes, en 2006 se retomó un plan de desarrollo motivado por la necesidad de reducir el déficit de la oferta de electricidad sobre la base de dos estrategias. Por un lado, continuar con el desarrollo iniciado en la década de 1960 basado en centrales de uranio natural y agua pesada, a la vez que se iniciaron negociaciones para adquirir un reactor de potencia de tercera generación de origen chino, lo que implicaba que a futuro se avanzaría en la incorporación de reactores de uranio enriquecido. Y, por

el otro, insertándose en la carrera internacional por introducir al mercado un SMR de diseño propio que mantiene el concepto de los reactores PWR o BWR, identificándose una ventana de oportunidad al encontrarse los SMR en una etapa experimental.

El despliegue de esta estrategia ha mostrado que el principal desafío que enfrenta la industria nuclear argentina radica en la posibilidad de mantener de forma sostenida en el tiempo las decisiones adoptadas en materia de selección de tecnología, aspecto que se ha visto debilitado al no poder garantizar los recursos financieros necesarios para sostener el volumen de inversión de capital requerido como resultado del escenario de restricción externa. Este aspecto resulta especialmente crítico en el caso del proyecto CAREM, ya que el mismo compite de forma simultánea con otros prototipos similares en desarrollo en el Reino Unido, Rusia, Estados Unidos y China, países que sostienen un elevado nivel de inversión en sus respectivos proyectos. En este sentido, como sostiene Cuneo (2024), Argentina enfrenta el riesgo de quedar rezagada en la carrera internacional por el liderazgo en este tipo de reactores.

Más allá de los aspectos económicos, los giros político-ideológicos de la última década se tradujeron en la instauración de decisiones coyunturales que no sólo derivaron en atrasos en los giros presupuestarios que afectaron la continuidad de las obras emprendidas, sino en cuestionamientos a la estrategia de asociación con China, por lo que a la fecha no se ha podido concretar la compra de la cuarta central nuclear de potencia.

Dichas marchas y contramarchas en el acuerdo de compra de la cuarta central muestran que Argentina no logró construir una posición consistente en la disputa geopolítica entre Estados Unidos y China. A diferencia de lo ocurrido entre 1950-1980, periodo en el cual se sostuvo la decisión de no aceptar las condiciones que imponían las potencias nucleares que limitan el acceso y desarrollo de determinadas tecnologías; la etapa actual de debilidad financiera impuso una condición de vulnerabilidad para afirmar una postura de defensa de la búsqueda de la autonomía tecnológica frente a las presiones externas.

En relación con la transición energética sobre el programa nuclear, la evidencia disponible muestra que, más allá del plano discursivo, no hubo un avance en la dirección de diseñar una planificación respecto del aprovechamiento de las diferentes fuentes de energía. Lo que indica que no se logró construir un modelo de gobernanza energético, con las consecuentes modificaciones en las reglas de las interacciones entre los diferentes actores y, en relación con lo anterior, para gestionar las influencias del contexto internacional. Al no realizarse una adecuada planificación de incorporación de nuevos equipamientos eléctricos, no se establecieron mecanismos de complementación entre la nucleoelectricidad y otras fuentes de energía, en particular, las renovables. La importancia que adquirió la explotación del gas no convencional resultó en un escenario de incertidumbre que afectó la consistencia e implementación de una política energética tendente a diversificar la capacidad de generación a través de la energía nuclear y fuentes renovables. Bajo este contexto, la industria nuclear quedó vulnerable a los cambios de la coyuntura nacional e internacional.

En conclusión, para avanzar en un escenario de autonomía tecnológica y derivada de esta, en autonomía energética, las decisiones en materia de selección de tecnologías constituyen un factor clave. Sin embargo, dicha selección no es un hecho aislado, sino que depende de la trayectoria tecnológica previa y el contexto interno como externo, que condicionan la capacidad de decisión y posteriormente, su implementación y sostenimiento en el tiempo. Lo que supone la construcción de capacidades institucionales complementarias a las capacidades en I+D+i para impulsar procesos de desarrollos tecno-productivos que apuntan a modificar el patrón de especialización de un país.

Finalmente, la tecnología nuclear puede constituir una alternativa para avanzar sobre el proceso de transición energética. Sin embargo, su desarrollo requiere que se articule con el de otras tecnologías para lograr una efectiva complementación con energías como la solar y la eólica. Por lo tanto, se debería avanzar más allá de la necesidad buscar la legitimidad social de la tecnología nuclear.

LISTA DE REFERENCIAS

- Alegría, J., Csik, B., Nasjleti, E., Papadópulos, C. y Quihillalt, O. (1964). *La contribución de la energía nuclear a la solución del problema energético argentino* (No. 115). Comisión Nacional de Energía Atómica.
- Araoz, C. (1982). Ciclo de combustible nuclear: participación industrial. *Energía Nuclear*, 7, 68–80.
- Blinder, D. y Vila, M. (2023). Presiones estadounidenses a la cooperación tecnológica con China: el caso del sector nuclear de Argentina. *Relaciones Internacionales*, 53, 91–110. <https://doi.org/10.15366/relacionesinternacionales2023.53.005>
- Cancio, R., Perona, C. y Peñaloza, C. (1990). *Valor real de una asignación presupuestaria. Un método de cálculo* (No. 499). Comisión Nacional de Energía Atómica.
- Carciofi, R. (1990). *La desarticulación del pacto fiscal: Una interpretación sobre la evolución del sector público argentino en las dos últimas décadas* (LC/BUE/L.118). Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://hdl.handle.net/11362/9126>
- Caro, A. (2023). *La generación nucleoelectrica en Argentina y el mundo*. Fundar. <https://fund.ar/publicacion/la-generacion-nucleoelectrica-en-argentina-y-el-mundo/>
- Castro, C. (1976). Argentina. Política nuclear. *Estrategia*, 42, 42–47.
- Cepi, N. (2022). La gobernanza energética de la república argentina en el siglo XXI: desentrañando sus ejes centrales. *Relaciones Internacionales*, 95(1), 147–167. <https://doi.org/10.15359/ri.95-1.6>
- Char, N. L. y Csik, B. J. (1987). El desarrollo de la energía nucleoelectrica: Historia y porvenir. En *Los 30 años del OIEA* (Vol. 31, pp. 19–25). OIEA Boletín.
- Comisión Nacional de Energía Atómica [CNEA] (2015). *Plan Estratégico 2015-2025*. Comisión Nacional de Energía Atómica.
- Comisión Nacional de Energía Atómica [CNEA] (2021). *Boletín Energético* (Vol. 48). Comisión Nacional de Energía Atómica. <https://nuclea.cnea.gob.ar/handle/20.500.12553/1914>
- Comisión Nacional de Energía Atómica [CNEA] (2024). *Boletín Energético* (Vol. 52). Comisión Nacional de Energía Atómica. <https://nuclea.cnea.gob.ar/handle/20.500.12553/5604>
- Cúneo, D. M. (2024). La planificación estatal de grandes programas tecnológicos desde la semi-periferia: los proyectos CAREM y ARSAT. *Realidad Económica*, 54(363), 89–120. <https://ojs.iade.org.ar/index.php/re/article/view/283>
- Delmastro, D., Gil, C., Di Pace, M., Conti, M. y Irigaray, M. (2017). CAREM escala comercial. *Revista CNEA*, 17(67-68).
- Erramuspe, H. (1988). *Períodos de construcción y puesta fuera de servicio definitivo de centrales nucleares* (No. 492). Comisión Nacional de Energía Atómica.
- Fernández, P., Cuevas, A. y Vergara, D. (2013). Historia de la evolución técnica de los reactores nucleares de agua a presión. *Artefactos. Revista de Estudios Filosóficos sobre Ciencia y Tecnología*, 6(1), 109–138.

- González, A. J., Frischengruber, K., Recalde, J. A., Solanilla, R. B. y Vanzulli, R. C. (1987). *ARGOS PHWR 380: Argentine offer of a safer pressurized heavy-water reactor of 380 MW* (No. 484). Comisión Nacional de Energía Atómica. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0029549388901410>
- Guadagni, A. A. (1987). Decisiones energéticas para el futuro. *Desarrollo Económico*, 26(104), 609–630. <https://doi.org/10.2307/3466933>
- Haro, M. J. (2019). La política científica y tecnológica de China y la cooperación sino-argentina. *Ciencia, Tecnología y Política*, 2(3). <https://doi.org/10.24215/26183188e029>
- Hurtado, D. (2014). *El sueño de la Argentina atómica: política, tecnología nuclear y desarrollo nacional (1945-2006)*. Edhasa.
- International Atomic Energy Agency [IAEA] (2020). *Advances in Small Modular Reactors and technology developments*. International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/>
- International Atomic Energy Agency [IAEA] (2022). *Advances in Small Modular Reactors and technology developments. A supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)*. International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org/>
- Jiménez, G. y Queral, C. (2017). La energía nuclear en China: pasado, presente y futuro. *DYNA: Ingeniería e Industria*, 92(2), 129–132. <https://doi.org/10.6036/8247>
- Lapeña, J. E. (2014). *La energía en tiempos de Alfonsín. Innovación, planificación estratégica, obras y autoabastecimiento*. Eudeba.
- Lavarello, P. y Sarabia, M. (2015). *La política industrial en la Argentina durante la década de 2000* (LC/PUB.2017/21-P). Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://hdl.handle.net/11362/42619>
- Lugones, M. J. (2020). *Política nuclear y política energética en la Argentina. El Programa Nucleoeléctrico de la CNEA (1965-1985)* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Quilmes]. <https://ridaa.unq.edu.ar/handle/20.500.11807/2130>
- Lugones, M. y Vera, N. (2024). Los programas nucleoelectricos de Argentina, Brasil y México: un estudio comparativo de estrategias de desarrollo tecnológico. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad - CTS*, 19(57), 79–104. <https://doi.org/10.52712/issn.1850-0013-349>
- Martin, J. M. (1969). El papel posible de la industria nuclear en la consolidación de la industrialización en la Argentina. *Desarrollo Económico*, 9(34), 235–257.
- Merke, F. (2022). *Geopolítica, globalización y cambio climático. La Argentina frente a un mundo en disrupción*. Fundación ICBC.
- Rodríguez, M. (2015). ¿Reforma administrativa o desmembramiento?: La reorganización de la Comisión Nacional de Energía Atómica en el marco del Estado Neoliberal en Argentina (1994). *Revista Brasileira de História da Ciência*, 8(2), 83–99. <https://doi.org/10.53727/rbhc.v8i2.189>
- Rodríguez, M. (2020). *Estado, industria y desarrollo: Atucha II y la senda del Programa Nuclear Argentino (1979-2014)*. Prohistoria Ediciones.
- Zappino, J. S. (2023). Ingeniería y desarrollo en el sector nuclear. El CAREM-25: Primer reactor nuclear de potencia íntegramente argentino. *CUINAP Argentina, Cuadernos del INAP*, 4(125), 1–96. <https://publicaciones.inap.gob.ar/index.php/CUINAP/issue/view/196>