

CONSIDERACIONES ESTRATÉGICAS SOBRE EL DESARROLLO DE UN PROGRAMA NUCLEOELÉCTRICO EN URUGUAY

Enrique Morales Rodríguez*

RESUMEN

En los números 6 y 7 de la *Revista Estrategia*, analizamos algunos factores a tener en cuenta para establecer una estrategia energética-eléctrica del Uruguay a 2050, resultando dos opciones estratégicas como las más viables para los objetivos nacionales. Una de ellas implicaba contar con una central nuclear para generar potencia de base. Las complejidades e implicaciones de un programa nuclear de uso civil son enormes, en particular para un país como Uruguay, por lo que creemos que en ese caso, sería necesaria una Estrategia Nuclear Nacional, con el único objetivo de lograr el funcionamiento de dicho programa sin perjuicio de otros objetivos fundamentales o del Estado. En este artículo se esbozan algunas características de esta eventual estrategia, enumerando necesidades previsibles del Estado uruguayo y elementos de la concepción estratégica para distintos escenarios del ambiente externo.

Palabras clave: estrategia energética, Uruguay 2050, programa nucleoelectrico, necesidades, escenarios posibles.

Introducción

En artículos presentados en números anteriores de la *Revista Estrategia*, mencionamos la importancia del suministro energético-eléctrico para lograr los objetivos fundamentales del Estado. La reciente pandemia del COVID – 19, ha vuelto a resaltar este vínculo entre desarrollo y suministro energético. Si bien la demanda eléctrica en Uruguay fue afectada en 6,8% entre marzo y abril 2020 (Cornalino, E. – ADME, 2020), por cierre de muchas actividades, paradójicamente el suministro eléctrico pasó a tener un rol aún más importante en la vida del país, ya que fue esencial para el funcionamiento de los centros

* Ingeniero Químico y Químico Farmacéutico. Especializado en Tecnología Nuclear y Seguridad Nuclear en Argentina. Se desempeñó en la actividad privada, en las áreas de minería, irradiación ionizante y otras. Docente e Investigador en Facultades de Química e Ingeniería. Asesor (2010) de A.R.N.R. - M.I.E.M. Docente del CALEN (C y T) desde 2014. Correo electrónico: ef_morales@hotmail.com

médicos y también para evitar, gracias al teletrabajo y la teleeducación, que el impacto social y económico de la cuarentena fuera aún mucho peor. También se delineaban los principales escenarios a futuro y factores clave para la estrategia energética. El horizonte temporal fijado fue el año 2050, plazo hasta el cual se plantea en Morales E. (2019) un crecimiento continuo de la demanda eléctrica. Se concluía en Morales, E. F. (2020) que dos opciones estratégicas (Escenario de Generación Renovable Preponderante y Escenario de Generación Nuclear de Base) podían conducir al logro del objetivo, si se superaban los respectivos obstáculos. Aunque ya se señalaba en Morales, E. F. (2020) que un Escenario de Generación Térmica Preponderante no sería adecuado a los objetivos del Estado, han ocurrido desde entonces eventos que, en opinión del autor, refuerzan esa conclusión. El principal sería el hecho de que los precios del petróleo y gas natural se han desplomado; si bien esto puede hacer aparecer a dichos insumos como más accesibles, las inversiones en nuevos yacimientos casi se han paralizado (IEA, 2020), agravando el efecto a futuro de potencial escasez debido a inversiones retrasadas que ya se señalaba en Morales, E. F. (2020).

El Escenario de Generación Renovable Preponderante planteado en Morales, E. F. (2020), se asemeja mucho al sistema de gestión eléctrico actual de Uruguay. Algunas situaciones ocurridas en los últimos tiempos, pueden asimilarse a los obstáculos señalados en Morales, E. F. (2020) para esta opción en el largo plazo. El 2020 viene siendo (hasta julio) un año con participación de la generación hidroeléctrica dentro del mix energético, relativamente reducida, situación similar a la mencionada en Morales, E. F. (2020) para luego de 2030. Aunque siguieron existiendo períodos de excedentes de generación variable exportados para mantener estabilidad de la red, también hubo períodos en que para satisfacer la demanda se necesitó recurrir a la importación desde países vecinos, mientras que en los cinco años anteriores, los intercambios eran exclusivamente de exportación y del 6 - 10% del total de generación (DNE-MIEM, 2019). De acuerdo a cálculos propios del autor en base a los datos disponibles para enero - julio de 2020 en ADME (Administración del Mercado Eléctrico) (2020), la generación eólica y solar fue de 3.162 MW*h, de orden similar a 2019 y hubo exportaciones, pero el saldo neto entre exportaciones e importaciones fue apenas 0,6% del total, con gran dependencia de intercambios con el extranjero en ambos sentidos para mantener integridad de la red. Esta situación ya fue señalada en Morales, E. F. (2020) como debilidad del Escenario de Generación Renovable Preponderante luego de 2030. De la

capacidad que el país demuestre para superar estas debilidades, puede depender la capacidad para hacer viable el Escenario de Generación Renovable Preponderante en el largo plazo.

La otra opción estratégica considerada a 2050 en Morales, E. F. (2020) o sea el Escenario de Generación Nuclear de Base, también presenta grandes obstáculos, con complejas implicaciones, en particular para un país como Uruguay. Estas complejidades llegan al punto de que, en caso de que esta opción resultara imprescindible, creemos que sería necesaria una planificación estratégica nacional exclusivamente a esos efectos. En este artículo procuraremos delinear algunas características que, siguiendo el método de planificación estratégica del CALEN, debería tener esta eventual estrategia nuclear, partiendo del supuesto de que se la considerara imprescindible y hubiera ya una decisión firme de incorporarla a la estrategia energética nacional.

Diseño de un programa nucleoelectrico uruguayo

En Morales, E. (2019) y Morales E. F. (2020), ya se había considerado la posibilidad de contar en el país, a futuro, con una central nuclear. En los escenarios de consumo eléctrico que corresponden a los supuestos socio-económicos más deseables y más probables de otras condicionantes, se manejó en esos artículos la posibilidad de una central nuclear que entregara una potencia de base de 500 MW_e. En este artículo partiremos de la base de una central de esas características, sin perjuicio de posteriores revisiones.

Objetivo del Estado

Esta eventual estrategia nuclear nacional, tendría como objetivo lograr el funcionamiento de una (o más) centrales nucleoelectricas que entregara a la red nacional la potencia de base que requiera la estrategia energética nacional, de manera confiable, segura, económicamente aceptable y sin comprometer objetivos fundamentales como la soberanía nacional, la protección del ambiente y la salud de la población, entre otros.

Antecedentes

Una central nuclear de potencia es una usina eléctrica que funciona de una manera totalmente diferente a las usinas convencionales. Los requisitos para su instalación también son particulares y las condiciones de funcionamiento dependen del diseño de reactor nuclear elegido, el que a su vez tendrá importantes implicaciones estratégicas para el país de que se trate. Para

un panorama más amplio sobre estos aspectos, se puede consultar la bibliografía, que incluye diversas fuentes en idioma español.

En el Anexo I, se hace un mínimo repaso de los conceptos esenciales con implicaciones estratégicas.

Diversos países han establecido programas nucleares de distintos alcances y en distintos marcos de tiempo. En el Anexo II, se hace una breve descripción de algunos de ellos, pertenecientes a un grupo de países de muy distintas características, enmarcándolos en sus respectivos contextos socioeconómicos y en algunas de las políticas gubernamentales que los impulsaron.

Fase Diagnóstico

Considerando los antecedentes mencionados, un programa nuclear uruguayo —máxime si se debe concretar alrededor de 2030, como se menciona en Morales, E. (2019) y Morales E. F. (2020)— requeriría un reactor nuclear suministrado por un proveedor extranjero.

Los lineamientos de esta estrategia, dependerán en primer lugar, del tipo de reactor, lo que ya es una compleja decisión. De los tipos de reactor mencionados en los anexos, los reactores rápidos, por sus complejidades técnicas y económicas, así como la exigente presión de control sobre el uranio altamente enriquecido y plutonio, en nuestra opinión sería una opción inviable aún a largo plazo, aunque se contara —situación muy improbable— con proveedores para el reactor y el uranio altamente enriquecido. El uso del ciclo del torio, requiere privativamente el uso de reactores convencionales en una primera instancia y en posteriores instancias, el complejo paso del reprocesamiento —que en este caso requiere especiales precauciones— o uso de combustibles nucleares de diseño especial, lo que exige un conocimiento muy acabado de las propiedades técnicas del torio, del que hay experiencia en países como Canadá, Estados Unidos de América, India y otros, pero que en nuestro país no existe. En mi opinión, el ciclo del torio tampoco sería una opción viable para un país como Uruguay, salvo acuerdos de cooperación permanentes con países de mucha experiencia en el ciclo del torio. Muy probablemente se deberían instalar reactores térmicos y la primera definición a tomar sería entonces entre las líneas uranio natural/uranio ligeramente enriquecido.

Análisis del Ambiente

Al requerirse inevitablemente proveedores extranjeros, las condicionantes del ambiente externo serían clave para ambas líneas estratégicas; se resumen a continuación algunos factores esenciales:

Línea basada en el uso de uranio enriquecido

Oportunidades

- Muchos diseños de reactores comercialmente disponibles, así como propuestas de diseños innovadores, se basan en este energético, por lo que sería relativamente fácil la selección de un diseño adaptable al país.
- Los combustibles nucleares de uranio enriquecido resultan en una mayor eficiencia energética que los de uranio natural, por lo que la necesidad de reponer combustible nuclear ocurriría más espaciadamente, facilitando también la creación de stocks de reserva.

Amenazas

- Se señaló en Morales, E. (2019) que los proveedores de uranio enriquecido son un club muy reducido de países, existiendo entre ellos acuerdos geopolíticos, por lo que se dependería de su disposición para llegar a acuerdos permanentes.
- En caso de un resurgimiento nuclear en el mundo, la capacidad actual de enriquecimiento podría quedar desbordada antes de 2050 (Morales E. F., 2020), lo que dejaría en desventaja a actores de las características de Uruguay.

Línea basada en el uso de uranio natural

Oportunidades

- Abundantes países son proveedores de uranio natural.
- La fabricación en plazos limitados de reactores como el CANDU¹, no estaría condicionada como lo pueden estar otros tipos de reactores, al usar tubos de presión, cuyos fabricantes son bastante diversos.

¹ CANDU: acrónimo de *Canadian Deuterium Uranium*, expresión en inglés que hace referencia a un modelo de reactor nuclear, alimentado por uranio natural, desarrollado en Canadá, que por su diseño, es más fácil producir en serie que otros tipos de reactores.

- Países del Mercosur como Argentina y Brasil, cuentan con reservas probadas y minas de uranio.
- Dentro del Mercosur, Argentina es productor y exportador de agua pesada, insumo esencial de los reactores de uranio natural.

Amenazas

- Los diseños de reactores comerciales de uranio natural disponibles, son principalmente tipo CANDU. Existen también diseños propios de la India, sólo en uso en aquel país y el de Atucha² en Argentina, casi el único en su clase, por lo que se ofrecerían opciones muy estrechas.
- La eficiencia energética del uranio natural es mucho menor que la del enriquecido, por lo que los combustibles nucleares deben cambiarse con mayor frecuencia. Esto obliga a tener un stock importante de combustibles nuevos y disponer de capacidad de almacenamiento para gran cantidad de combustibles gastados. Esta necesidad de recambio, expone al país a incertezas en el suministro en caso de que actores externos desestabilicen el mercado.
- Recurrir a otros proveedores extranjeros de agua pesada sería recurrir también a un grupo muy exclusivo de proveedores, diez en total, de los que no todos son exportadores.

Se observan claramente las complejidades ya de esta primera decisión estratégica. Resolverlas dependerá, en gran medida de los escenarios que surjan en la Fase Política, que luego veremos.

A continuación se resumen algunos factores clave de los ambientes internos y externos, aplicables a cualquiera de las líneas antes mencionadas.

Ambiente interno

Fortalezas

- Uruguay tiene una larga trayectoria —desde 1963— de pertenencia al Organismo Internacional de Energía Atómica (O.I.E.A.), cuya cooperación sería esencial en lo que respecta a formación de recursos humanos, provisión de recursos técnicos y

² La central nuclear de Atucha en la República Argentina, fue la primera en América Latina y el reactor nuclear —ver Anexo II— de esta central fue en su momento un prototipo casi sin antecedentes.

asesoramiento para la concepción e implantación de un programa nuclear civil.

- El grado inversor del país, es un gran respaldo para un programa que involucre enormes inversiones, como sería el caso.
- El país cuenta con una buena infraestructura y regulación para el uso seguro de fuentes radiactivas (MIEM, 2020), (Parlamento – Uruguay, 4 de enero de 2013). Esta sería una buena base para establecer la regulación en el área nuclear, además de que muchas regulaciones de protección radiológica ya vigentes también serían aplicables.

Debilidades

- La capacidad industrial del país para participar en la instalación de una central nuclear es limitada, por lo que la dependencia con proveedores extranjeros sería, en primera instancia, muy amplia.
- El problema de los residuos nucleares, debería estar previsto desde un primer momento y la infraestructura y capacidades actuales del país, para gestionar este tipo de residuos, son limitadas.
- En la mayoría de los organismos públicos del país, falta experiencia en el área nuclear, por lo que se debe pensar en que serán necesarios asesoramientos del O.I.E.A. y otras instituciones u organismos por un largo tiempo.
- Las inversiones fijas requeridas para una central nuclear son muy altas. La capacidad actual del Estado para afrontar estas inversiones, por supuesto es limitada, aun recurriendo a créditos internacionales.

Ambiente externo

Amenazas

- Se señaló ya que en todos los supuestos habría, al menos inicialmente, una gran dependencia de proveedores extranjeros y en ciertos supuestos, como el de un renacimiento nuclear mundial, la capacidad y/o voluntad de proveer a un actor como Uruguay puede quedar seriamente comprometida.
- El costo de capital, sería uno de los factores económicos más importantes, por lo que las tasas de interés con que se financie el

programa nuclear serían decisivas. Aun contando Uruguay con grado inversor, el país estaría muy expuesto a decisiones de actores externos para la viabilidad económica del programa.

Oportunidades

- El Fondo para el Clima, creado por el Acuerdo de París (2015), puede financiar en condiciones ventajosas para países en desarrollo, obras de infraestructura que tengan un impacto importante en las emisiones de carbono como sería el caso (Morales, E., 2019). La concesión de este apoyo dependería de decisiones políticas de organismos internacionales, además de la solidez que exhibiera el eventual programa nuclear uruguayo.
- Dentro del marco del Mercosur, Argentina y Brasil pueden prestar (como ya lo han hecho en la preparación de muchos profesionales uruguayos en el área nuclear y radiológica) gran cooperación técnica y realizar intercambios comerciales en diversos aspectos, además de los ya mencionados. Por ejemplo, ambos países podrían ser eventuales proveedores de combustibles nucleares y eventualmente de algún diseño de reactor nuclear apto para las necesidades de Uruguay.

Por las complejidades de una obra de esta magnitud, obviamente sería absolutamente imprescindible un claro conocimiento y aceptación públicos de las gestiones tanto del Poder Ejecutivo como del Legislativo en cada etapa. Las características de la generación nucleoelectrónica, a su vez imponen requisitos de seguridad muy especiales y el necesario consenso sociopolítico estará muy ligado a la solidez y visibilidad de estas condiciones de seguridad. Aun cuando las probabilidades de un accidente nuclear se acoten a un nivel muy pequeño y socialmente aceptable, nunca puede considerarse imposible un suceso accidental y el país debe estar preparado para una eventual emergencia nuclear. Más allá de la seguridad técnica, una estrategia de protección (seguridad física) será también imprescindible. La seguridad en el transporte de insumos esenciales, especialmente los combustibles nucleares, nuevos o gastados, también es imprescindible. En un país como Uruguay, la participación de las Fuerzas Armadas en este rol parece lógica y a estos efectos sería necesario un marco legal apropiado y la interacción de sus mandos —o quienes estos designen— con responsables técnicos para optimizar una sinergia entre la seguridad técnica y física.

Vistas las inevitables dependencias del extranjero, un programa nuclear que apunte a la soberanía energética del país debería buscar reducir todo lo posible dichas dependencias, lo que, teniendo en cuenta los antecedentes, sería posible solo luego de un período de tiempo prolongado.

Considerando este previsible anhelo y los citados requisitos fundamentales para el funcionamiento, hemos analizado algunas de las principales necesidades de esta eventual estrategia nuclear uruguaya y los factores del poder nacional involucrados, resumidos a continuación:

Necesidades:

- Acuerdos que aseguren la construcción de la central nuclear, su puesta en marcha y la provisión estable de los insumos esenciales en condiciones aceptables para Uruguay. La financiación debe estar prevista y puede lograrse por un financiador externo o por mecanismos de participación conjunta con el proveedor extranjero. La implementación de este acuerdo puede requerir extensión en el tiempo aún luego de que la gestión esté en manos uruguayas para situaciones especiales (factores político, económico, científico-tecnológico).
- Establecimiento de un marco regulador (IAEA, 2015) de la actividad nuclear, que establezca normas coercitivas para la construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y clausura de centrales nucleares basado en una relación riesgo/beneficio (Morales Rodríguez E., 2012) que sea presentada en forma transparente a la sociedad. Este marco regulador debería incluir normas técnicas respaldadas por un marco legal adecuado y el control del efectivo cumplimiento, estar a cargo de organismos estatales confiables para toda la sociedad. La gestión de los residuos nucleares y/o radiactivos deberá estar prevista en dicho marco regulador (Morales Rodríguez E., 2012), además de los convenios internacionales aplicables de los que Uruguay forma parte (factores político, científico-tecnológico).
- Establecimiento de un Plan de Preparación y Respuesta a Emergencias Nucleares integrado en el Sistema Nacional de Emergencias. Quedarán definidos en el plan los cometidos, responsabilidades y medios de todos los actores estatales, departamentales, municipales, privados, así como del Centro de

Comando Unificado³ que los coordinará y comunicará con la población (IAEA, 2007; OIEA, 2018). En este plan quedarán definidos los responsables de declarar una emergencia y activar las respuestas a los diversos tipos de emergencias, en base a indicadores técnicos claros (IAEA, 2017). La Preparación implicará disponer de los recursos materiales y humanos por anticipado y en condiciones de acción inmediata (Morales Rodríguez E., 2012). Las Fuerzas Armadas, en caso de una emergencia nuclear, pueden colaborar activamente en tareas, por ejemplo, de control de accesos a ciertas zonas, evacuación de personas y otras. En ese caso, además de las órdenes que impartan los mandos, sería necesario que los responsables participen en la preparación para emergencias nucleares. Eventualmente, el plan de emergencias incluirá simulacros de accidente, a efectos de verificar tanto la preparación real de las organizaciones de emergencia como la respuesta ciudadana. Organismos especializados estarán preparados para controlar alimentos procedentes de determinadas zonas (IAEA, 2017) (factores político, científico-tecnológico, psicosocial, militar).

- Establecimiento de un programa de formación y entrenamiento de recursos humanos (IAEA, 2015) propios, que permita ir tomando la gestión de la actividad nuclear en manos totalmente uruguayas a medida que la experiencia adquirida lo permita (factores político, psicosocial, científico-tecnológico).
- Establecimiento e implantación de la estrategia de seguridad física (IAEA, 2013) con el respaldo de un marco legal y normativo específico e incluyendo en caso de participación de las Fuerzas Armadas, la preparación para optimizar su accionar con el de los

³ Este Centro de Comando es designado por el gobierno nacional, consta de una persona a cargo y los responsables de las diversas tareas específicas, secundados por un equipo multidisciplinario (cuya composición dependerá de las características y magnitud de la emergencia), que coordina las acciones en el lugar de la emergencia y la comunicación con la población. Mantendrá permanentemente informados a los responsables a nivel de gobierno y adaptará sus acciones tácticas a las decisiones estratégicas definidas por estos. De ser necesario, recomendará acciones que puedan ser necesarias fuera del lugar de la emergencia. En nuestro país, seguramente actuaría coordinado con el Sistema Nacional de Emergencias.

encargados de la seguridad técnica (IAEA, 2019) (factores político, científico-tecnológico, militar).

- Establecimiento de protocolos y medidas técnicas para implementar en la actividad nuclear los acuerdos de salvaguardias ya ratificados entre Uruguay y el O.I.E.A. Asignación de las responsabilidades y recursos correspondientes para un riguroso control y contabilidad centralizada —procurando usar la tecnología más moderna y fiable al respecto (Iyengar, 2018; White, 2018; Yang, 2018)— de materiales nucleares, brindando garantías tanto a Uruguay como al O.I.E.A. (factor científico-tecnológico).
- Además del marco regulador, se deberá contar con un marco legal nuclear que fije las responsabilidades que tendrán el Estado, sus organismos y otros actores (OIEA, 2012). En caso de que actores extranjeros tuvieran participación en la gestión inicial, este marco legal debe asegurar la visión estratégica del Estado uruguayo en dicha gestión. La financiación de la gestión definitiva de residuos, así como el desmantelamiento de la central nuclear al fin de su vida útil deben estar previstas desde el primer momento y considerarse en los costos (Morales Rodríguez E., 2012). La eventualidad de perjuicios económicos en caso de una emergencia nuclear, también debe estar prevista en el marco legal (factores político, económico, científico-tecnológico).
- Establecimiento de centros de investigación abocados al desarrollo propio —en el largo plazo— de algunos insumos clave como la fabricación de elementos combustibles (factores político, económico, científico-tecnológico).

Fase Política

Distintos escenarios para acciones de los actores externos, tendrán muy diversos impactos, tanto positivos como negativos.

Hemos supuesto para esta primera aproximación, solo tres grandes escenarios, sin analizar probabilidades ni detalles de los diversos hechos portadores de futuro ni de los eventos futuros finales.

Escenario de Amplia Cooperación Internacional.

En este escenario, con el objetivo global de mitigar el cambio climático, hay una rápida expansión de la actividad nuclear en todo el mundo y países con gran experiencia, cooperan activamente con países que lo necesiten (Morales

Rodríguez E. F., 2019). Este sería un escenario muy favorable, ya que posiblemente se podría instalar una central nuclear sin que los esfuerzos técnicos y económicos fueran prohibitivos para Uruguay, además de contar con proveedores estables de insumos y mantenimiento especializado.

La gestión conjunta de residuos nucleares y radiactivos de todo el mundo en unos pocos países que presentaran condiciones ideales para establecer repositorios geológicos, sería posible y una gran oportunidad para países del tamaño y las características de Uruguay.

Escenario de Amplia Cooperación Regional

En este escenario, dos países del Mercosur, líderes en la actividad nuclear como Argentina y Brasil, prestan a Uruguay una importante y permanente cooperación técnica, basada en acuerdos multilaterales y/o bilaterales. Eventualmente podrían proveer la central nuclear, si ello satisface las necesidades de Uruguay. La instalación de una central nuclear compartida con cualquiera de los países vecinos, aprovechando su amplia experiencia, además de la ganancia en economía de escala sería otra opción en este escenario. Cualquiera o ambos países pueden ser proveedores estables de insumos clave y prestar una decisiva asistencia técnica y servicios esenciales de mantenimiento y otros.

La opción de un repositorio geológico conjunto sería nuevamente una alternativa y una gran oportunidad para nuestro país.

Naturalmente, este escenario podría eventualmente estar incluido en el anterior. Se lo considera como escenario particular si es la cooperación predominante.

Este sería un escenario favorable, aunque no tanto (no se podría contar con suministro asegurado de uranio enriquecido) como el anterior.

Escenario Uruguay Aislado

En este escenario, Uruguay podría contar solo con la asistencia del O.I.E.A., dirigida a asesoramientos técnicos y formación de recursos humanos, para establecer un programa nuclear. Considerando los desafíos técnicos y los antecedentes, este sería un escenario desfavorable.

Se debería negociar con un proveedor externo la instalación y puesta en marcha de una central nuclear, en las mejores condiciones posibles. Probablemente fuera necesario que el proveedor externo también se ocupara de la operación durante un cierto lapso, debido a la falta de experiencia propia. En este caso, se debería contar desde una etapa temprana con un plan para

transferir la gestión y estar preparados para concretarlo en el menor plazo posible.

Siendo crítico el suministro de insumos, y considerando las amenazas del ambiente externo, la estrategia debería incluir respuestas controlables por Uruguay en la mayor medida posible. Podría decidirse formar, desde el inicio de las operaciones, un stock de reserva de insumos críticos para caso de quiebres de suministro, considerando sus impactos financieros.

Respecto al tema de los residuos, existen países que prestan servicios de reprocesamiento y que eventualmente pueden comprar, del plutonio reprocesado para un país, la porción que este no necesite, con lo que se reduciría una parte importante del problema. Para el futuro a mediano plazo, una posibilidad es que también sea habitual reprocesar —y adquirir por terceros— además del plutonio otros materiales radiactivos, como los *actínidos menores*⁴ (Mueller, 2013). En esta hipótesis, las características de los residuos radiactivos que serían exclusiva responsabilidad de Uruguay, serían bastante más manejables, aunque aún con grandes complejidades, si bien podrían surgir opciones de cooperación internacional para estos residuos finales. Los costos de reprocesado más los del transporte pueden incidir en los costos de la energía. Se deberían considerar todos estos factores para resolver la opción ciclo de combustible (abierto)/(cerrado con participación de terceros) en este escenario.

Medios Disponibles y Potenciales

Los medios disponibles se reducen a la adecuada infraestructura de redes eléctricas, aunque puede ser necesario revisar su configuración al introducir una usina de base de esta magnitud.

Los medios potenciales críticos para el establecimiento de un programa nuclear no se disponen actualmente y el objetivo de esta eventual planificación estratégica es obtenerlos, aprovechando fortalezas internas y oportunidades externas.

Concepción Estratégica

El primer paso de la concepción estratégica sería una definición concreta del reactor nuclear a instalar. Los requerimientos técnicos del marco normativo que se estaría elaborando en el mismo período, pueden incidir en dicha

⁴ Actínidos menores: grupo de isótopos de algunos elementos químicos (americio, neptunio y curio) presentes en los residuos de la generación nucleoelectrónica, potencialmente reutilizables, en ciertas condiciones, como combustibles para ulterior generación nuclear. Ver anexos.

definición. Características técnicas del reactor también incidirán sobre las definiciones de seguridad física. En cuanto al programa de formación de recursos humanos, este debe incluir, además de la formación profesional en el área nuclear, entrenamiento específico en el tipo de reactor que se vaya a operar, por lo que este programa de formación se delinearé luego de la definición del reactor.

Luego de definir la opción uranio natural/enriquecido, se deberá decidir entre las diversas opciones de ambas líneas. Estas opciones incluyen tanto diseños ya en uso en el mundo desde hace años, como otros que para 2030 recién tendrán unas pocas unidades instaladas (IAEA, 2018). La instalación de un reactor que sea el primero en su clase (F.O.A.K.)⁵, aun cuyo diseño innovador pretenda un funcionamiento muy simplificado, puede plantear grandes desafíos técnicos, debido a la total falta de experiencia. La regulación de los SMR⁶ puede ser compleja, ya que las normas deben prever, por ejemplo: fallas de causa común si varios módulos comparten servicios. También, el acceso a ciertos puntos puede dificultarse debido al compacto diseño, durante las inspecciones de seguridad. La adecuada regulación puede requerir esfuerzos y recursos específicos (IAEA, 2020). Desde el punto de vista de las salvaguardias, las peculiaridades de los combustibles de algunos diseños innovadores pueden plantear desafíos a la contabilidad de combustibles nuevos y gastados y requerir sofisticados procedimientos técnicos (Nilsson, 2018; Petrunin, 2018; Shiba, 2018). Por ello, los proveedores generalmente venden un F.O.A.K. a precios muy ventajosos. Cuando se instala un reactor del que ya hay en funcionamiento unas pocas unidades en el mundo (N.O.A.K.)⁷, los precios ya serán más altos, aun que todavía pueden ser ventajosos.

Ante este panorama, el escenario del ambiente externo, será decisivo. En un escenario de amplia cooperación internacional y/o regional, la instalación de un reactor N.O.A.K. —o F.O.A.K., en supuestos muy optimistas— puede llegar a ser conveniente para Uruguay, ya que la cooperación puede suplir la total falta de experiencia, aunque sería imprescindible que esta cooperación esté basada en acuerdos multilaterales o bilaterales permanentes y sólidos. Probablemente, en este escenario, para el Plan de Recursos Humanos el

⁵ Acrónimo de “*First of a Kind*”, expresión en inglés que significa: “el primero de cierta clase”.

⁶ Categoría de diseño de reactores en la que recaen la mayoría de las propuestas innovadoras. Véase Anexo I.

⁷ Acrónimo de “*Nth of a Kind*”, expresión en inglés que significa “el número N de cierta clase”, usada habitualmente para señalar un diseño de los que ya existen unos pocos ejemplares.

proveedor del reactor pueda aportar formación profesional, además de entrenamiento.

En el desfavorable escenario de Uruguay aislado, sería deseable contar con un diseño de reactor ya con amplia experiencia acumulada en el mundo para que su gestión pudiera ser totalmente transferida a Uruguay en un plazo razonable. El programa de formación de recursos humanos, debería estar en marcha seguramente antes del inicio de operaciones de la central nuclear. Para minimizar vulnerabilidades, se debería procurar que los insumos pudieran ser provistos por proveedores lo más diversos posible, por lo que estos insumos deberían consistir de agua pesada o uranio levemente enriquecido y combustibles de diseño standard (Morales E. F., 2020).

Definido el tipo de reactor y el marco regulador, los decisores estratégicos deberán comenzar a estudiar acciones para resolver las necesidades, siendo para ello una referencia esencial las recomendaciones del OIEA (IAEA, 2015). Ya en una temprana etapa debería estar definido el marco legal, regulador y posibles opciones de financiamiento, la que puede terminar de definirse en acuerdo con el proveedor. La definición de ubicación de una central nuclear, es un proceso de enorme importancia por sus implicaciones operativas y de seguridad, complejo y puede ser prolongado (IAEA, 2002, 2003; Morales Rodríguez E., 2012, 2017). Esta definición será una acción crítica, subsiguiente a las definiciones del marco regulador y del tipo de reactor. El proceso de ubicación, sería un aspecto a resolver principalmente por el factor científico-tecnológico, intercambiando información entre diversos organismos estatales. También, el factor científico-tecnológico debería interactuar con los factores económico y militar, a efectos de seleccionar una ubicación donde los costos sean minimizados, así como facilitar la seguridad física. Por último, la aceptación e involucramiento de la población de la zona donde se instale la central nuclear es imprescindible, por lo que sería necesaria la participación del factor psicosocial en fuerte interacción con el factor científico-tecnológico, manteniendo un diálogo permanente y transparente con la población. En la tabla 1 se resumen a continuación algunas posibles regiones de ubicación para una central nuclear de 500 MW_e en Uruguay, con algunas de sus respectivas ventajas y desventajas, aunque esto no señala una región preferente ni excluye otras regiones (Morales Rodríguez E., 2017).

Tabla 1: Regiones potenciales candidatas para instalación de una central nuclear 500 MW_e en Uruguay

Regiones: Ventajas y desventajas	Lago artificial de Rincón del Bonete	Lago artificial de Salto Grande	Costa oeste del Río de la Plata (1)	A la vera de la laguna Merín
Posibilidad de inundaciones o bajantes	Desventaja	Desventaja	Ventaja	Ventaja
Incendios forestales u otros eventos de origen humano	Desventaja	Ventaja	Ventaja	Desventaja
Necesidad de evitar impacto térmico en cuerpo receptor	Desventaja	Desventaja	Ventaja	Ventaja
Suelos rocosos o ausencia de bañados	Ventaja	Ventaja	Ventaja	Desventaja
Distribución demográfica	Ventaja	Desventaja	Desventaja	Ventaja

Nota: se esquematiza un cuadro comparativo preliminar de ventajas y desventajas de cada región.

(1) No incluye área metropolitana.

Adaptada de Morales Rodríguez, E., 2017.

Luego de definida la ubicación, se estaría en condiciones de poder definir en más detalle los Planes de Seguridad Física (IAEA, 2019), que también requerirían un marco regulador, el que se elaborará en el mismo período que el marco normativo técnico. La implementación de las actividades de salvaguardias debe estar coordinada con las medidas de seguridad física y preverse ya desde esta etapa. Definida la localización, también podrá avanzarse con el plan de preparación y respuesta a emergencias en paralelo a la construcción de la central.

Conclusiones

Se han señalado aspectos que se deberían profundizar mucho en la Fase Diagnóstico de una eventual Estrategia Nuclear Uruguaya. También se mencionaron algunos posibles escenarios —particularmente del ambiente externo, que sería clave— relevantes para la Fase Política, cuyas probabilidades y detalles sería necesario evaluar durante la planificación concreta de dicha estrategia nuclear. Respecto a la concepción estratégica, la definición del tipo de reactor a instalarse es esencial y el primer punto a definir, considerando con particular atención el escenario externo. Sobre esta base se podría avanzar en otras acciones estratégicas. En próximos números de la revista procuraremos seguir avanzando en la elaboración de posibles escenarios y acciones estratégicas.

ANEXO I – CONCEPTOS TÉCNICOS Y SUS IMPLICACIONES ESTRATÉGICAS

Un *reactor nuclear* es un artefacto en el que, en determinadas condiciones, se logra en forma controlada el proceso de *fisión* de átomos de un determinado elemento químico, ubicado del número 92 en adelante de la tabla periódica; la fisión divide el átomo original en dos átomos más livianos, liberando una enorme cantidad de calor. Este calor debe ser evacuado mediante algún refrigerante —líquido o gaseoso, generalmente a alta presión— y aprovechado para la generación eléctrica; los átomos livianos surgidos de la fisión, generalmente serán *materiales radiactivos*. Los materiales radiactivos pueden causar daños a los seres vivos. Los distintos isótopos de los elementos pesados, a su vez pueden ser *fisiles* o *fisionables*; estos últimos solo cursan el proceso de fisión en condiciones especiales. El uranio, elemento distribuido ampliamente en la naturaleza, presenta los isótopos ^{235}U (físil) y ^{238}U (fisionable), en proporciones 0,7% y 99,3%, respectivamente; procesos industriales complejos, denominados de *enriquecimiento*, permiten aumentar artificialmente el contenido de ^{235}U del uranio extraído de la naturaleza, en diversos grados. Un reactor alimentado con uranio con un grado de enriquecimiento menor al 10%, para funcionar necesita la presencia de alguna sustancia de bajo peso atómico (agua y grafito, los más habituales) que cumple el papel de *moderador*: modera la energía de los neutrones de fisión para propiciar la reacción en cadena. Un reactor en que el refrigerante/moderador sea agua común, no puede funcionar con uranio, a menos que el contenido de ^{235}U sea superior a 1,2% (*reactores térmicos*). Ciertos reactores denominados *rápidos* o *de neutrones rápidos*, funcionan con uranio enriquecido a más del 20%, condiciones en que también el ^{238}U fisiona y se obtienen eficiencias energéticas descollantes; estos reactores usan metales líquidos (sodio, plomo y otros) como refrigerante y su construcción y funcionamiento presentan muchas complejidades. Un reactor puede funcionar con uranio natural, sin enriquecimiento, siempre que en vez de agua como refrigerante, se use *agua pesada*, cuyos átomos de hidrógeno consisten del isótopo deuterio.

Aún sin ser enriquecido, la forma de uranio usado en reactores, no es nunca tal como se extrae de las minas. Debe pasar por varios procesos químicos y mecánicos hasta obtenerse los *combustibles nucleares*. Un elemento combustible (combustible “quemado” o “gastado”) que se haya usado cierto tiempo en un reactor, al retirarlo, será un *residuo nuclear* y contendrá isótopos radiactivos de diversa longevidad y características, así como algo de plutonio (^{239}Pu , isótopo físil); este último puede recuperarse y reusarse como

combustible, en lo que se llama un *reprocesamiento*, del que surgirán también *residuos radiactivos*. Como estos residuos pueden mantener su actividad durante largos períodos, siempre es necesario contar con un *repositorio geológico*, instalación subterránea (500 – 1000 m de profundidad) donde las condiciones de seguridad pueden mantenerse durante siglos; si el plutonio y otros elementos han sido reusados, las exigencias técnicas del repositorio son de menor alcance. El conjunto de sucesivos procesos de minería y enriquecimiento de uranio, fabricación y uso de combustibles nucleares, reprocesamiento y disposición de residuos constituyen el *ciclo de combustible*; este puede ser cerrado si el plutonio y uranio se reciclan o abierto cuando los combustibles gastados se disponen como desechos. Se puede operar un reactor nuclear de potencia durante décadas sin contar con un repositorio geológico, manteniendo a lo largo de todo este tiempo, los residuos nucleares en distintos tipos (bajo agua o en seco) de almacenamiento transitorio seguro según su antigüedad. En los primeros años luego de generados, los residuos nucleares suelen mantenerse en almacenamiento bajo agua dentro de las propias centrales nucleares. Luego de unos 20 años, pueden pasar a almacenarse en seco en depósitos transitorios que deben diseñarse bajo estrictas condiciones de seguridad técnica y física.

Debe resaltarse que tanto el plutonio como el uranio altamente enriquecido, son aptos para fabricación de bombas nucleares, además de para usos energéticos.

El Tratado de No Proliferación Nuclear (TNP), exige a los signatarios – entre los que se cuenta Uruguay- el control y vigilancia sobre sus materiales nucleares, incluyendo combustibles nucleares nuevos y gastados, demostrando el uso exclusivamente con fines pacíficos y debiendo llevar una estricta contabilidad de sus materiales nucleares, la que es informada al O.I.E.A. Los acuerdos de salvaguardias firmados entre un Estado y el O.I.E.A., permiten a este verificar periódicamente el cumplimiento de dicho control realizando inventarios físicos dentro de las instalaciones nucleares del Estado.

Un *accidente nuclear* puede ocurrir por pérdida de control sobre el proceso de fisión o por falta de refrigeración en el reactor, en ambos casos pueden fundirse los combustibles, liberando material radiactivo. Si bien nunca puede considerarse imposible un accidente nuclear, sucesivas capas de medidas de seguridad pueden reducir el riesgo accidental a probabilidades aceptables y en caso de ocurrir, limitar sus consecuencias.

Resumiendo, los reactores nucleares pueden ser rápidos (alto enriquecimiento), térmicos (bajo enriquecimiento y agua común) o de uranio natural y agua pesada. El torio, presente en la naturaleza como ^{232}Th , no es físil ni fisionable, pero expuesto al campo de neutrones de un reactor convencional, puede convertirse en el isótopo de uranio físil ^{233}U , el que, recuperado luego de un reprocesamiento, puede alimentar otros reactores o ser usado en el combustible en que se lo formó; el torio es un elemento *fértil*. Existen serias dificultades técnicas para obtener combustibles nucleares de uranio – torio, por ejemplo: su alta temperatura de sinterizado (IAEA, 2005), por lo que se requiere gran experiencia e infraestructura sofisticada. El reprocesamiento de torio también presenta complejidades y especiales precauciones para el personal, por la gran actividad de rayos α penetrantes, provenientes del ^{232}U presente.

Desde hace décadas están en curso actividades de investigación y desarrollo sobre nuevos diseños de reactores. Se esperan para el futuro nuevas generaciones de reactores, las denominadas *Generaciones III+* y *IV* que, se prevé, incluirán diseños con características de eficiencia y seguridad muy destacadas. Entre los diseños esperados, destacan los *pequeños reactores modulares*⁸ que como su nombre lo indica, serían de pequeña potencia y con pocos requerimientos de mano de obra y mantenimiento, lo que los haría muy adecuados para operar en zonas rurales o de baja densidad demográfica.

ANEXO II – PROGRAMAS NUCLEARES EN EL MUNDO

A nivel internacional, existen varios antecedentes —30 más Taiwán, actualmente— de naciones que establecieron sus programas nucleares de uso civil —algunos, en paralelo con sus programas nucleares militares— en distintos contextos económicos, de infraestructura industrial y académica, de cooperación bilateral y/o internacional, con también diversos objetivos y logros. La ex -Unión Soviética fue el primer país del mundo en contar con una central nuclear de potencia en Obninsk⁹, en junio de 1954 (WNA Profiles, 2020). Este primer reactor de potencia fue construido en base a un diseño soviético (AM-1), modificación de los usados hasta ese momento para producción de plutonio con fines bélicos y era moderado por grafito y refrigerado por agua. Poco después (1957), los Estados Unidos de América inauguraron su primera central,

⁸ El equivalente en inglés de esta descripción es: *Small Modular Reactors (SMR)*, este último es el acrónimo por el que se los suele conocer internacionalmente.

⁹ Esta central, ubicada en la República Federal de Rusia, a 110 km de Moscú, se mantuvo en funcionamiento hasta 2002.

en Shippingport, Pennsylvania (WNA Profiles, 2020), con el diseño propio *Pressurized Water Reactor*¹⁰ (PWR), moderado y refrigerado por agua, que luego fue muy difundido por todo el mundo como reactor de uso civil. Su potencia, de apenas 60 MW_e, contrasta con las centrales nucleares PWR de 1.000 MW_e o mayores, mayoritarias entre sus 98 reactores nucleares hoy en funcionamiento en 30 de sus Estados y que cubren el 20% de su demanda. También de diseño estadounidense es el *Boiling Water Reactor*¹¹ (BWR), cuyas primeras unidades comerciales surgieron en la década de 1960. El diseño BWR disminuye los requerimientos de presurización, pero su eficiencia térmica es algo menor. Este diseño también fue exportado, pero su difusión fue menor que los PWR. Actualmente existen 75 reactores BWR en operación en el mundo, incluyendo 32 en Estados Unidos de América. Laboratorios nacionales, dependientes del estado federal, que habían adquirido gran experiencia sobre control de reacciones de fisión, enriquecimiento de uranio, manejo de residuos, a lo largo del Proyecto Manhattan durante la Segunda Guerra Mundial, continuaron creando una amplia producción científica-tecnológica, pero desde 1960, muchas actividades del ciclo de combustible, ingeniería y exportación de reactores, fueron iniciativa de empresas privadas, de acuerdo al modelo económico norteamericano.

Francia, conocida como la “Reina Nuclear”, inauguró su primer reactor nuclear comercial de diseño propio (denominado *UNGG: Uranium Naturel Graphite Gaz*)¹² en Marcoule¹³ en abril de 1959. Este reactor comercial de 39 MW, moderado por grafito y refrigerado por gas, similar al Magnox, siguió a una primera versión de UNGG de apenas 2 MW, inaugurado también en Marcoule en 1956. Otras versiones de UNGG siguieron, así como de otros diseños. A partir de 1969, sin perjuicio de seguir avanzando en investigaciones propias, Francia también importó reactores PWR de Estados Unidos de América y luego del

¹⁰ Pressurized Water Reactor: expresión en inglés que significa: “reactor de agua presurizada”. En estos diseños de reactores, el agua de refrigeración circula a alta presión para mantenerla en estado líquido.

¹¹ Boiling Water Reactor: expresión en inglés que significa: “reactor de agua en ebullición”. En estos diseños, el agua de refrigeración que circula por el reactor termina hirviendo y generando directamente el vapor que acciona las turbinas, siendo luego recirculado al reactor.

¹² Expresión en francés que sintetiza el concepto: “reactor alimentado por uranio natural, moderado por grafito y refrigerado por gas”

¹³ El centro nuclear Marcoule se encuentra en la región Côtes du Rhône a 25 km de Avignon. A partir de 1970 se diversificaron las actividades en este enorme complejo, incluyendo el reactor rápido Phénix y fabricación de combustibles.

shock petrolero de 1973, inició una decidida política de desarrollo nuclear, con miras a reducir su dependencia del petróleo. Los requerimientos básicos de la energía nuclear: complejas actividades de ingeniería (accesibles para la industria francesa) y uranio (barato y disponible en muchos lugares del mundo, a diferencia del petróleo) fueron la base de esta decisión estratégica. El resultado fue un caso paradigmático, pasando de tener apenas el 8% de su electricidad de origen nuclear en 1974, a 75% hoy. Francia operó dos reactores nucleares de neutrones rápidos: el *Phénix* cerca de Marcoule (233 MW, 1974 - 2009) y el *Super-Phénix* (1200 MW, 1996 -1998) (WNA Profiles, 2020). La investigación operativa en reactores rápidos es fundamental para los futuros planes franceses de *transmutación de actínidos*¹⁴ de residuos nucleares de reactores convencionales; este proceso permitiría mejorar mucho la eficiencia energética de las centrales nucleares convencionales, a la vez que disminuiría en gran medida la longevidad e impactos de sus residuos. Francia está construyendo en Flamanville 3¹⁵ un diseño propio de 1630 MW_e conocido como *European Pressurized Reactor*¹⁶ (EPR). La inauguración, prevista para 2012, se ha retrasado varias veces, esperándose ahora para 2024; pese a ello ya se han exportado reactores EPR a Europa y Asia. La Empresa Areva, con una decisiva participación estatal (86,52%) realiza actividades relacionadas con el ciclo de combustible, así como ingeniería e instalación de reactores nucleares. Este país domina por completo el ciclo de combustible, contando desde larga data con sus propios procesos industriales de conversión (1959), enriquecimiento de uranio (1978), fabricación de combustibles y reprocesamiento de combustible gastado. Sobre este último aspecto del ciclo, es de destacar que la planta de reprocesamiento de La Hague¹⁷, cuya última unidad fue inaugurada en 1990, presta servicios a terceros países, facilitando a muchos de estos un servicio que les sería difícil lograr por sí mismos.

¹⁴ Los actínidos menores generalmente tienen tiempos de duración como radiactivos bastante largos. Tratados con el flujo de neutrones de un reactor rápido, pueden convertirse en isótopos fisionables y por tanto, aprovecharse en nuevos combustibles nucleares, además de reducir el impacto de antiguos residuos nucleares.

¹⁵ Ubicado en la localidad de Flamanville, localidad de Cotentin, región de Normandía, sobre el canal de la Mancha. En este lugar ya funcionan desde 1987, las centrales nucleares de Flamanville 1 y 2, de diseño PWR convencional.

¹⁶ Expresión en inglés que sintetiza el concepto: "Reactor Presurizado de diseño Europeo".

¹⁷ Oficialmente: centro COGEMA, ubicado en la comuna de Beaumont-Hague, región de Normandía, cercana a Flamanville.

Bangladesh tiene aún un 10% de su población sin acceso a electricidad (el consumo per cápita es de 350 kW*hr) y el ingreso per cápita es de unos 2.000 dólares/año, pero la demanda eléctrica crece a un ritmo de 7% anual, en consonancia con el ritmo de desarrollo y crecimiento demográfico, buscándose que la red eléctrica cubra todo el país en 2021. Dependiendo actualmente en un 79% del gas natural para generación, el país estableció en firme su Plan de Acción Nuclear en 2001, firmándose en 2011 un acuerdo con Rusia para la provisión de dos reactores nucleares de potencia de 1200 MW_e en Roopur¹⁸. La Autoridad Reguladora Nuclear fue establecida en 2012 y en noviembre de 2017 comenzaron los trabajos, esperándose la inauguración del primer reactor para 2023 y del segundo para 2024. Rusia aporta la financiación, el mantenimiento del reactor por el primer año y entrenamiento del personal, habiendo ya entrenado unos 500 profesionales bengalíes en la central rusa de Novovoronezh II¹⁹, planta de referencia para Roopur (WNA Profiles, 2020). Rusia suministra también la totalidad de los combustibles y existen acuerdos de retorno de los combustibles gastados a Rusia para su reprocesamiento. Debe tenerse en cuenta que el tamaño de Bangladesh (148.000 km²) es similar al de Uruguay, pero su población es de unos 167:000.000 de habitantes, mucho mayor que la de nuestro país.

Argentina, un país con muchas características (en lo que refiere a producto per cápita, densidad de población, proporción de estudiantes universitarios, cultura) similares a Uruguay, cuenta con una Comisión Nacional de Energía Atómica desde 1950, abocada a la investigación y al desarrollo de diversas aplicaciones en el área nuclear; también tiene un programa de formación de recursos humanos permanente, en marcha desde 1955. En 1974, este país puso en marcha la primera central nuclear en América Latina (Atucha I, en la zona de Zárate, Provincia de Buenos Aires). El reactor nuclear era de origen alemán, pero gran parte de la infraestructura fue proporcionada por Argentina. En las sucesivas centrales nucleoelectricas que se inauguraron en este país (Embalse, Provincia de Córdoba, 1984; Atucha II, 2011), aunque los reactores siguieron siendo extranjeros (Canadá, Alemania), la proporción de

¹⁸ Esta central se encuentra en el distrito de Pabna, a unos 140 km de Dhaka, la capital, en el Noroeste del país.

¹⁹ Esta central nuclear rusa, conectada a la red en 2019, comparte ubicación con Novovoronezh I, inaugurada en 2017. Ambos reactores se encuentran en el Territorio de Voronezh Oblast, en el sur de Rusia y la ciudad más cercana es Novovoronezh, residencia de gran parte del personal de estas plantas.

infraestructura nacional fue cada vez, proporcionalmente mayor. A partir de 1982, Argentina contó con su propia fabricación de combustibles nucleares, lo que le dio una muy significativa independencia y en 1984, logró dominar técnicamente el proceso de enriquecimiento de uranio en su planta de Pilcaniyeu (Provincia de Río Negro), si bien esta ha tenido escasa actividad, estando cerrada actualmente desde 2018 y la mayoría de sus reactores de potencia históricamente han funcionado con uranio natural (WNA Profiles, 2020). Precisamente a ese respecto, en 1994, Argentina inauguró su planta de producción de agua pesada en Arroyito (Provincia de Neuquén); este insumo, como se mencionó, es esencial para el funcionamiento de reactores con uranio natural, por lo que este avance completó el dominio del ciclo completo, terminando con la dependencia del extranjero, al menos en lo que refiere a tecnología. Actualmente, Argentina trabaja en un diseño propio de reactor nuclear de potencia. Este diseño, denominado *Central Argentina de Elementos Modulares (CAREM)*, pertenece a una nueva generación de diseños innovadores, con especiales características de funcionamiento y seguridad, aunque con una potencia reducida (25 MW_e), del que se está construyendo un prototipo junto a las centrales Atucha. Existen planes de instalar luego un CAREM de mayor potencia, habiéndose manejado las provincias de Formosa y Río Negro para su ubicación. Se prevé que se pueda exportar el diseño, habiéndose considerado incluso en Arabia Saudita su importación, aunque no para generación eléctrica, sino para desalinización de agua de mar.

Brasil estableció su *Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)* en 1951 e inauguró su primera central nuclear de potencia (Angra I, en la zona de Río de Janeiro) en 1982 y Angra II²⁰ en 2000. La ubicación de estas centrales buscó asegurar el suministro eléctrico a una zona de gran consumo urbano e industrial y bastante alejado de las principales usinas hidroeléctricas. El reactor de Angra I, de tipo PWR, fue adquirido a Estados Unidos de América, mientras que el reactor de Angra II fue adquirido a Alemania, en el marco de un acuerdo global de 1975 entre ambos países. Aunque Brasil dispone potencialmente de grandes recursos hidroeléctricos, la dependencia del clima y los impactos ambientales pueden limitar su desarrollo. Actualmente está en construcción Angra III²¹ y se han reportado planes de expandir el programa nuclear a regiones

²⁰ Ambas centrales nucleares están ubicadas sobre la costa atlántica, cerca de la ciudad portuaria y turística de Angra dos Reis, en el municipio homónimo, a unos 130 km al oeste de la capital estatal, Río de Janeiro.

²¹ Angra III se encontraría en la misma ubicación que las dos anteriores.

en rápido desarrollo: Noreste (Pernambuco) y Sudeste (Minas Gerais). Brasil tiene abundantes recursos mineros de uranio, el que se extrae en el país desde 1982. El país logró dominar técnicamente el enriquecimiento de uranio en los años 80 y desde 2009, la compañía estatal Industrias Nucleares do Brasil tiene en funcionamiento su planta de enriquecimiento en Resende (Estado de Río de Janeiro). En 2009, la planta de Resende produjo 730 kg de uranio enriquecido al 4% (WNA Profiles, 2020) y desde entonces, su infraestructura y producción se han seguido expandiendo, aunque el país aún no ha logrado la autosuficiencia en suministro de uranio enriquecido. Brasil también fabrica sus propios combustibles nucleares.

Se puede observar que países con muy diversas características, algunas similares a las de Uruguay y otros con alguna característica en desventaja respecto a Uruguay, han desarrollado programas nucleares de uso civil, algunos con importantes grados de expansión. No obstante, resalta que hasta ahora no hay antecedentes de programas nucleares en países con idénticas características que Uruguay en lo que refiere a todos los factores como población, tamaño, ingreso per cápita, consumo total de energía, infraestructura industrial, recursos naturales y dimensión del sector académico centrado en el área nuclear. De aquí que sean previsibles esfuerzos muy significativos para desarrollar un programa de este tipo en el país.

Referencias

- ADME. (20 de julio de 2020). Administración del Mercado Eléctrico. Panel de Control. recuperado de <https://adme.com.uy/controlpanel.php>
- ARN. (1996). Informe Anual. Buenos Aires: Autoridad Reguladora Nuclear (Argentina).
- Cornalino, E. - ADME. (abril de 2020). COVID 19 Análisis de la afectación al consumo eléctrico debido a las medidas de aislamiento. Recuperado de https://www.adme.com.uy/db-docs/Docs_secciones/nid_1220/COVID_AfectacionDemandaElectrica_v2.pdf
- DNE-MIEM. (2019). Balance Energético Nacional (Uruguay) 2018. Montevideo: Ministerio de Industria, Energía y Minería.
- IAEA. (2002). Dispersion of Radiactive Material in Air and Water and Consideration of Population Distribution in site Evaluation for Nuclear

- Power Plants; Safety Guide Nro. NS-G-3.2. Viena: International Atomic Energy Agency.
- IAEA. (2003). Site Evaluation for Nuclear Installations; Safety Requirements NS-R-3. Viena: International Atomic Energy Agency.
- IAEA. (2005). Thorium Fuel Cycle - Potential Benefits and Challenges. Viena: International Atomic Energy Agency.
- IAEA. (2007). Arrangements for Preparedness for a Nuclear or Radiological Emergency. Viena: International Atomic Energy Agency.
- IAEA. (2013). Establishing the Nuclear Security Infrastructure for a Nuclear Power Programme. Viena: International Atomic Energy Agency.
- IAEA. (2015). Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power. Viena: International Atomic Energy Agency.
- IAEA. (2017). Operational Intervention Levels for Reactor Emergencies and Methodology for their Derivation. Viena: International Atomic Energy Agency.
- IAEA. (2018). Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. Viena: International Atomic Energy Agency.
- IAEA. (2019). Security During the Lifetime of a Nuclear Facility. Viena: International Atomic Energy Agency.
- IAEA. (22 de abril de 2020). New Recommendations on Safety of SMRs from the SMR Regulators' Forum. Recuperado de <https://www.iaea.org/newscenter/news/new-recommendations-on-safety-of-smrs-from-the-smr-regulators-forum>
- IEA. (2020). Gas 2020. Paris: International Energy Agency. Recuperado de <https://www.iea.org/reports/gas-2020>
- Iyengar, A. (2018). Use of Fast Neutron Emission Tomography for Spent Fuel Verification. Symposium on International Safeguards. Viena: International Atomic Energy Agency.
- MIEM. (2020). Ministerio de Industria, Energía y Minería - Protección Radiológica. Recuperado de <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/proteccion-radiologica/>

- Morales Rodríguez, E. (2012). ¿Un Uruguay nuclear? Respuestas sobre seguridad y regulación estatal. Saarbrücken: Editorial Académica Española.
- Morales Rodríguez, E. F. (2019). Nuclear shares in power and final energy consistent with 1,5 C scenarios - considerations for national climate strategies. International Conference on Climate Change and the Role of Nuclear Power. Viena: IAEA.
- Morales, E. (2017). Perspectivas de la energía nuclear en el contexto de mitigación del cambio climático. VI Encuentro Regional de Ingeniería Química. Montevideo: AIQU.
- Morales, E. (2019). "Estrategia Energética Uruguay 2050 – Algunos Elementos Clave a Considerar en Fases Diagnóstico y Política". Revista Estrategia, 54 - 67.
- Morales, E. F. (2020). "Estrategia Energética Uruguay 2050 - Elementos Clave de Fase Diagnóstico y Política (II)". Revista Estrategia, 87- 104.
- Mueller, A. (2013). Transmutation of Nuclear Waste and the Future MYRRHA Demonstrator. Journal of Physical Conference Series (420).
- Nilsson, A. (2018). Identifying Preliminary Criteria for Safeguarding Advanced Nuclear Reactors. Syposium on International Safeguards. Viena: International Atomic Energy Agency.
- OIEA. (2012). Manual de Derecho Nuclear: Legislación de Aplicación. Viena: Organismo Internacional de Energía atómica.
- OIEA. (2018). Preparación y Respuesta para Casos de Emergencia Nuclear o Radiológica. Viena: Organismo Internacional de Energía Atómica.
- Parlamento - Uruguay. (4 de enero de 2013). Ley 19.056 – Protección y Seguridad Radiológica de Personas, Bienes y Medio Ambiente. Montevideo: Ley Nacional.
- Petrinin, V. (2018). Design Solutions for Nuclear Transportable Power Plants with SMRs to Facilitate the Application of IAEA Safeguards and Support the non-proliferation Regime. Symposium on International Safeguards. Viena: International Atomic Energy Agency.

- Shiba, T. (2018). Proliferation Resistance and Safeguardability of Very High Temperature Reactor. Symposium on International Safeguards. Viena: International Atomic Energy Agency.
- White, T. (2018). Verification of Spent Nuclear Fuel using Passive Gamma Emission Tomography (PGET). Symposium on International Safeguards. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- WNA Profiles. (28 de julio de 2020). World Nuclear Association - Country Profiles. Recuperado de <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles.aspx>
- WNA-Library. (mayo de 2020). World Nuclear Association / Information Library / Nuclear Fuel cycle Overview. Recuperado de <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview.aspx>
- Yang, G. (2018). Muon Imaging for Safeguards Application. Symposium on International Safeguards. Viena: International Atomic Energy Agency.

Bibliografía

- Morales, E. (1998). Panorama y Fundamentos de la Industria e Ingeniería Nuclear. Ingeniería Química, 34-46.
- Morales, E. (2019). Optimizing SSAC Human Resources of ARNR in the Hypothesis of a Nuclear Power Program. Symposium on International Safeguards. Viena: 2018.
- OIEA. (6 de agosto de 2020). OIEA – Energía Nuclear. Recuperado de <https://www.iaea.org/es/temas/energia-nuclear>
- OIEA-FORO. (2016). Guía para la Elaboración de un Programa de Creación y Desarrollo de Competencias de Reguladores de Reactores Nucleares. Viena: Agencia Internacional de Energía Atómica.
- Puig, D. E. (2004). Ante un nuevo desafío: El Terrorismo Nuclear. Montevideo: Ediciones de la Plaza.
- Suárez Ántola, R. (2009). La Energía Nuclear. Montevideo: RESA Libros.
- Suárez Ántola, R. (2020). Fundamentos Técnicos de la Tecnología Nuclear Energética – Aspectos científicos, técnicos, sociales, políticos: RESA Libros

WNA. (2020). World Nuclear Association - Nuclear Essentials. Recuperado de <https://www.world-nuclear.org/nuclear-essentials.aspx>

