

INFORME REACTORES MODULARES PEQUEÑOS (SMR)

ÍNDICE

¿Qué es un SMR?	3
¿Qué aporta un SMR frente a un reactor clásico?	3
Modularidad	3
Reducción de los costes de construcción	3
Eficiencia y flexibilidad en la localización	4
Salvaguardias y seguridad. No proliferación	4
Desarrollo económico	5
Casos de SMR	5
NuScale	5
Natrium	7
SSR-W	9
CONCLUSIONES	11
REFERENCIAS	12

¿Qué es un SMR?

De acuerdo con el Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA), organización conexas a las Naciones Unidas, el concepto de SMR se refiere a “reactores **avanzados** que producen **hasta 300 MWe** (megavatios eléctricos) de potencia por cada unidad” [1]. Por dar un orden de magnitud, cada reactor nuclear “clásico” –por ejemplo, los dos reactores nucleares de la central extremeña de Almaraz suministra una potencia de unos 1000 MWe por unidad.

¿Qué aporta un SMR frente a un reactor clásico?

Modularidad

Con “modular” nos referimos, en el contexto de los SMR, a la posibilidad de **fabricar los principales componentes del sistema de producción de vapor en un entorno industrial** para posteriormente transportarlo al futuro emplazamiento del reactor. Si bien las centrales nucleares actuales “clásicas” o “grandes” incorporan en sus diseños componentes de fábrica –o módulos, sigue siendo necesario un trabajo sobre el terreno considerable para ensamblar estos. Se prevé que los SMR no necesiten una preparación *in situ* muy sustancial y por tanto reduzcan los prolongados trabajos de construcción que son típicos en los reactores grandes. [2] Respecto a las centrales nucleares grandes, los SMR poseen [2]:

- una mayor simplicidad en el diseño,
- características de seguridad mejoradas,
- una economía y una calidad propias de una producción en fábrica.
- una mayor flexibilidad en cuanto a la financiación, el emplazamiento, el dimensionamiento y las aplicaciones finales.

Además de esto, la mencionada “modularidad” permite de forma mucho más sencilla aumentar la potencia de la central, si fuese necesario, mediante la adición de más módulos (valga la redundancia) [2].

Reducción de los costes de construcción

Dentro de los costes asociados a una central nuclear convencional, los gastos de inversión constituyen la partida más cuantiosa [3]:

- Coste del capital (gastos de inversión):60-85%
- Operación y Mantenimiento: 10-25%
- Ciclo del combustible: 7-15%

El menor tamaño, la mayor simplicidad del diseño, la incorporación de nuevas características de seguridad intrínseca y seguridad pasiva¹ y la producción en módulos, entre otros, llevan a reducciones

¹ Ver el apartado “Salvaguardias y seguridad”.

considerables en coste de materiales, coste de mano de obra² y tiempo de construcción, esto es, en el coste del capital. En este informe se incide bastante en el área del coste de capital, ya que refleja los esfuerzos realizados en los diseños de SMR para incorporar las mejoras que lo reducen [2].

Eficiencia y flexibilidad en la localización

Los SMR pueden interconectarse con otras fuentes de energía, sean renovables o energías fósiles, to aprovechar mejor los recursos y obtener mayores eficiencias, a la vez que **aumentan la estabilidad de la red y la seguridad de suministro** [2].

Los SMR pueden proporcionar electricidad para **aplicaciones en las que no son necesarias plantas grandes, o la infraestructura existente no permite** la construcción de estas. Esto comprendería mercados eléctricos más pequeños, áreas aisladas, sitios con suministro de agua y/o superficie disponible limitados o aplicaciones industriales muy específicas. Los SMR parecen una opción atractiva para el **reemplazo de centrales con combustible fósil** ya obsoletas, o para **complementar procesos** industriales o centrales existentes con una fuente de energía libre de gases de efecto invernadero [2].

Salvaguardias y seguridad. No proliferación

Los diseños de SMR tienen como una de sus líneas maestras la **seguridad intrínseca** y la **seguridad pasiva**. El primer concepto se refiere a que el propio diseño de la física del reactor lo permita operar siempre de manera estable, sin aumentos descontrolados de la potencia. El segundo concepto, se refiere a que los sistemas de seguridad actúen con la mínima intervención humana o informática posible, llegando incluso a ser inexistente.

Los SMR incorporan barreras que pueden resistir el escenario base de impacto de avión, y otras amenazas específicas. La mayoría de estos se construirán bajo el nivel del suelo para aumentar la seguridad física y contrarrestar los escenarios derivados de sabotaje y fenómenos naturales [2].

Algunos SMR han sido diseñados para **operar durante períodos más largos sin necesidad de recargar** combustible. Cabe la posibilidad de que fueran fabricados y alimentados con combustible en una fábrica, sellados y transportados al sitio donde han de producir electricidad o calor de proceso, y devueltos a la fábrica para descarga de su combustible al final del ciclo. Esto minimizaría el transporte y manejo de material nuclear [2].

Se espera que los SMR que funcionan con agua ligera (H₂O, al igual que todas las centrales nucleares españolas) sean cargados con **uranio de bajo enriquecimiento**, similar al de los reactores grandes actuales, pudiendo no obstante acomodar el uso de mayores enriquecimientos. La aplicación del principio de “seguridad por diseño” aumentará previsiblemente la resistencia frente al robo y desaparición de material nuclear. Además, los SMR con agua ligera se pueden diseñar para **consumir plutonio³** en forma de combustible “de mezcla de óxidos” (MOX). Por otra parte, aquellos no refrigerados con agua (utilizan sodio, gas o sales fundidas) podrían ser más efectivos incluso a la hora de **eliminar el plutonio, disminuyendo el volumen de residuos** que precisarían almacenamiento [2].

² Los costes laborales representan una parte considerable del coste de capital de una central nuclear, debido entre otros a la alta cualificación requerida en los trabajadores y las grandes necesidades de trabajo *in situ* y supervisión de seguridad asociadas a este tipo de planta. [3]

³ El plutonio se genera, y es en parte consumido, como consecuencia del normal funcionamiento de las centrales nucleares que emplean uranio como combustible.

Desarrollo económico

El proceso de sustituir instalaciones de generación actuales y cubrir el aumento de capacidad en el futuro llevaría asociado un crecimiento significativo en trabajos de alta cualificación tanto en fabricación como en construcción y operación de estos reactores. Un estudio de 2010 [4] acerca del impacto en la economía y el empleo de la implementación de los SMR estimó que un SMR tipo de 100 megavatios, con un coste de fabricación e instalación de 420 M€ crearía:

- **En su construcción:** cerca de 7000 trabajos y generaría 1.100 M€ en ventas, 338 M€ en ingresos por nóminas y 30 M€ en impuestos comerciales indirectos.
- **En su operación:** al año, cerca de 375 trabajos y generaría 90 M€ en ventas, 22 M€ en ingresos por nóminas y 7,5 M€ en impuestos comerciales indirectos.

Dicho informe estudia el impacto de escenarios con distinto grado de implantación de los SMR: bajo (1-2 unidades/año), moderado (30 unidades/año), alto (40 unidades/año), y disruptivo (85 unidades/año), y en él se concluye que incluso proyectos de fabricación de SMR a nivel moderado tendría un impacto económico apreciable.

Casos de SMR

En los últimos años se han propuesto decenas de diseños de SMR. De acuerdo con el OIEA 70 SMRs se encuentran en desarrollo en la actualidad. Tanto grandes empresas del sector ([Westinghouse](#), [General Electric – Hitachi](#)), como *startups* ([Copenhagen Atomics](#) y [Seaborg Technologies](#)) o grandes inversores (Warren Buffet y Bill Gates a través de [Terrapower](#)) han elaborado sus propuestas, encontrándose estas en niveles de desarrollo muy distintos. Aquellos diseños más maduros ya están siendo evaluados por organismos reguladores como el canadiense o el estadounidense, o incluso han sido ya aprobados.

Algunos de los diseños de SMR más relevantes, con una madurez considerable, son NuScale, de NuScale Power, Moltex SSR-W o Natrium, de Terrapower:

NuScale

Desarrollado por [NuScale Power](#), empresa privada estadounidense, es el primer SMR en recibir la aprobación de diseño por la Comisión Reguladora Nuclear de Estados Unidos (NRC). La compañía contempla la fabricación de plantas con distinto número de módulos – reactores-, para adaptarse a las necesidades del cliente.

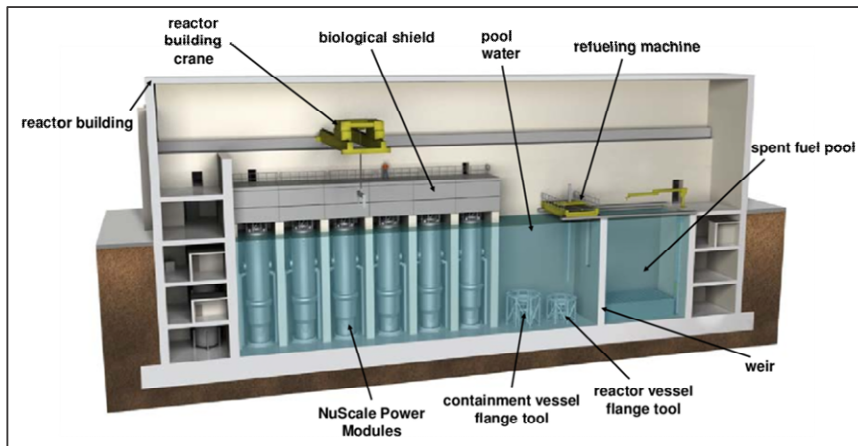


Ilustración 1 Esquema de la planta NuScale

Características:

- Potencia: 77 MWe aprox. [5]
- Dimensiones: cada módulo: 23m de alto, 4.5 de diámetro. [5]
- Combustible: combustible “típico” a base de óxido de uranio. [5]
- Refrigerante: agua ligera. [5].
- Seguridad: en el reactor NuScale se puede destacar el hecho de **no necesitar alimentación eléctrica, ni intervención humana ni de sistemas informáticos, ni aportación adicional de agua para el apagado de emergencia y la refrigeración indefinida.** [5]
- Coste de capital de la planta: NuScale Power estima para una planta *Nth-of-a-kind* (NOAK⁴) un coste de capital –excluidos gastos financieros– de unos 3.600\$/kW (3015€/kW⁵), rebaja apreciable respecto a los más de 9.000\$/kW (7530€/kW) en los que se estiman los proyectos recientes de centrales nucleares grandes en Georgia y Carolina del Sur [6].
- Coste de la electricidad (LCOE, *Levelized Cost of Electricity*): el *target* de la compañía es de 65\$ (54€) por megavatio-hora (MWh). [6].

Desarrollo / implantación

En el marco de la iniciativa *Carbon Free Power Project* del consorcio *Utah Associated Municipal Power Systems* (UAMPS), la primera planta NuScale comenzará su operación a finales de la década en Idaho Falls. El primero de los módulos NuScale empezará a producir energía en 2029, mientras que la planta alcanzará la operación a plena potencia en 2030 [7]. Un estudio realizado por la *Boise State University* y la *Idaho State University* [8] estima los siguientes beneficios económicos para la región:

- Creación de unos 1600 puestos de trabajo durante la construcción
- Como consecuencia de efectos indirectos e inducidos, la creación de 667 puestos de trabajo en los 40-60 años de operación de la planta

⁴ *Nth of a kind*, o “n-ésima unidad”, se refiere a la construcción de la n-ésima planta del mismo tipo, en la que se asume que se ha alcanzado cierta madurez y conocimiento práctico sobre la construcción de dicho tipo en concreto, lo que permite reducir apreciablemente los costes.

⁵ Obsérvese que va referido al kW de potencia de la planta, esto es, a su tamaño, a la energía que puede producir en un determinado período de tiempo.

- Un aumento en las rentas del trabajo en la región de 48 M\$ (40 M€), y un aumento del PIB de la región en 81 M\$ (67M€), lo que redundaría en aumento de la recaudación local, estatal y federal de 13,8 M\$ (11,6 M€).

Natrium

En 2019, TerraPower y GE-Hitachi Nuclear Energy America se asociaron para desarrollar la tecnología del reactor Natrium. Terrapower es una empresa de “innovación en el sector nuclear”, fundada por Bill Gates y otros socios, que trabaja en distintos modelos de reactores nucleares avanzados. GE (*General Electric*) Hitachi posee una larga tradición, proveniente de General Electric, en el diseño de reactores nucleares de agua ligera.

- Sodio fundido –no confundir con sales de sodio—como refrigerante.
- Un sistema de **almacenamiento de energía mediante sales fundidas**, tecnología que ya está ampliamente implantada en las plantas de energía solar concentrada (CSP) [9]. El almacenamiento con sales fundidas permite una **operación flexible del reactor** –circunstancia menos frecuente en los grandes reactores tradicionales. Esto permitiría pasar de los 345 MWe que alcanza el reactor en régimen normal, hasta una potencia eléctrica entregada por la planta hasta los 500 MWe, durante más de cinco horas y media, si fuese preciso.

Otra peculiaridad de Natrium es que, a diferencia de los otros dos SMR descritos en este informe, opera en el llamado “espectro rápido⁶”. Esto confiere a Natrium la capacidad de operar con combustibles nucleares distintos de los que se emplean en la mayoría de reactores, de agua ligera.

Respecto a los reactores de agua ligera, Natrium operará a presiones relativamente más bajas, por lo que la fabricación de la vasija del reactor y otros componentes se simplificará y abaratará. [10]

Como es propio de los reactores de cuarta generación, la concepción de Natrium busca hacer frente a distintas circunstancias, a saber [11]:

- La reducción de costes de construcción en comparación con los reactores comerciales más grandes. A esto contribuye el empleo de sistemas de seguridad pasivos, la reducción en complejidad y en tiempos de construcción. Por ejemplo, el diseño estima que, en relación con los MWe producidos, se necesitará un 80% menos de hormigón de “calidad nuclear⁷”.
- La estabilización de la red eléctrica ante la creciente penetración de las energías renovables
- Una operación flexible, merced al sistema de acumulación térmica con sales.
- El suministro de electricidad para procesos muy intensivos en energía, como la desalinización o la producción de hidrógeno, o el suministro de calor para calefacción urbana o diversos procesos industriales.
- Como consecuencia de lo anterior, una descarbonización más rápida del sistema eléctrico.

En palabras de Bill Gates: “Hay una nueva generación [de reactores nucleares] que resuelve la cuestión económica, que ha sido el problema más grande hasta ahora. Además, esta generación supone una revolución en cuanto a la seguridad”.

⁶ A grandes rasgos, los neutrones presentes en el reactor, y que se desplazan en este hasta impactar con el combustible produciendo la fisión, tienen más energía, van “más rápido” que en los reactores convencionales.

⁷ Que cumple con los estándares propios del sector nuclear, más estrictos que para la construcción civil.

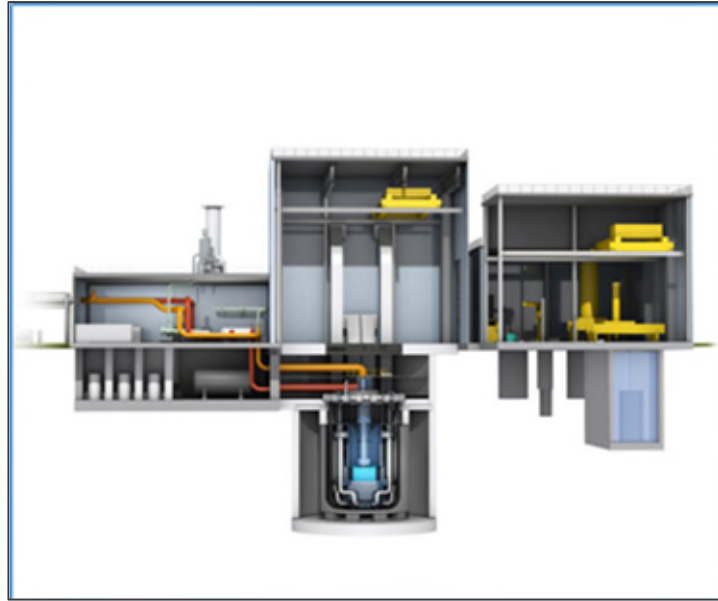


Ilustración 2 Esquema de la planta Natrium

Características:

- Potencia: 345 MWe en operación base / 500 MWe con el apoyo del sistema de sales.
- Dimensiones: no se han encontrado referencias.
- Combustible: óxido de uranio (clásico), el cuál puede no estar enriquecido, combustible gastado.
- Refrigerante: sodio fundido
- Costes de capital de la planta: de acuerdo con [12], desde TerraPower se sostiene que el objetivo de costes de capital para una planta comercial Natrium es de 1.000 M\$ (840 M€, aprox.). Referidos a la potencia base del reactor, se tendrían 2.435 €/kWe, mientras que si se refiere a la potencia máxima que puede entregar la planta –no de forma continua-, 1.680 €/kWe.
- Coste de la electricidad: no se han encontrado referencias.

Desarrollo / implantación:

En la actualidad, TerraPower espera solicitar una **licencia de emplazamiento** en agosto de 2023 y una **licencia de operación de una planta de demostración** de la tecnología Natrium en 2026. [13].

A principios de este mes de junio, la compañía informó que está evaluando distintas “localizaciones potenciales” en el estado de Wyoming para el emplazamiento de un reactor Natrium que se conocerá a finales de año. La compañía planea servirse de una planta de carbón en desmantelamiento. [11]

Este proyecto de demostración será una central totalmente operativa, con la que se pretende validar el diseño, la construcción y las características operativas de Natrium. Según Chris Levesque, presidente y director ejecutivo de TerraPower, la construcción de la planta tomará unos siete años [11].

En octubre de 2020, el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE), a través de su programa de demostración de reactores avanzados (ARDP) otorgó 80 millones de dólares como financiación inicial para demostrar el diseño Natrium. TerraPower firmó el acuerdo de cooperación con el DOE este mes de mayo. Hasta el momento, el Congreso de los EEUU ha asignado 160 millones de dólares al ARDP y

desde el DOE se ha comentado que en los próximos años puede que se disponga de fondos adicionales. [11].

Además de PacifiCorp y GE Hitachi Nuclear Energy, el equipo del proyecto de demostración incluye como socios en la ingeniería y la construcción a la empresa de ingeniería y construcción [Bechtel Power Corporation](#), la empresa pública de energía [Energy Northwest](#), la compañía de energía y gas [Duke Energy](#) y cerca de una docena de empresas, universidades y laboratorios nacionales [11]-

SSR-W

El reactor SSR-W (*Stable Salt Reactor – Waste Burner*), diseñado por la empresa británica [Moltex Energy](#), se caracteriza, entre otras cosas, porque tanto su combustible como su refrigerante son **sales fundidas**.

Para el combustible, el diseño prevé que se alimente con plutonio apto para reactores, de muy poca pureza, **reciclado a partir de las existencias de combustible gastado a base de óxido de uranio**. Este nuevo combustible reciclado se produciría mediante un proceso de bajo coste conocido como WATSS (*Waste to Stable Salt*, “de residuo a sal estable”) [14].

Se trata, por lo tanto, de un reactor concebido para países con existencias importantes de combustible nuclear gastado, en el cuál se eliminaría gran parte de los actínidos menores⁸, dejando una corriente menor de residuos “de vida relativamente corta” [14].

Para el refrigerante, las sales serán fluoruros de circonio, potasio y sodio.

Características

- **Potencia:** 300 MWe
- **Dimensiones:** Alto / largo / anchura del “tanque”: 5 m/6 m/5 m. [14]
- **Combustible:** combustible reciclado mediante el procedimiento WATSS. [14]
- **Refrigerante:** sales fundidas (ZrF₄/KF/NaF)
- **Costes de capital de la planta:** en [15] se cita una fuente según la cual, en 2015, la compañía nuclear Atkins Ltd. Realizó una estimación de costes de construcción para una planta de SSR de 1GWe (gigavatio, 1000 megavatios) de 1740 €/kWe, dentro de una horquilla de 1121-3100 €/kWe. En [16] se cita una entrevista con el jefe de operaciones de Moltex Energy en la que ofreció una estimación de 1630 €/kWe.
- **Coste de la electricidad (LCOE):** En la mencionada entrevista en [16] el jefe de operaciones de Moltex Energy aportó una estimación de 37 €/MWh.

La Comisión de Seguridad Nuclear Canadiense (*Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC*) comenzó el proceso de revisión del diseño del SSR-W en noviembre de 2017 El reactor SSR-W está siguiendo el proceso conocido como *Vendor Design review* (VDR). Se trata de un servicio provisto por el regulador canadiense a petición del fabricante, para comprobar si este cumple con los requerimientos y expectativas del regulador; no se evalúa una solicitud de licencia de construcción en un sitio específico,

⁸ Presentes en alta proporción en el combustible gastado, los “actínidos menores” constituyen los residuos nucleares de más alta vida, lo que hace que el dicho combustible, si no es tratado, deba ser almacenado durante períodos de tiempo muy largos.

para lo cual serían necesarios más estudios y documentación. El SSR-W es el quinto SMR que ha completado la fase 1 del VDR [17].

El objetivo de la compañía es desplegar su primer reactor en Point Lepreau (New Brunswick, Canadá) a principios de la década de 2030 [17].

Participación española

En abril de 2019, la empresa española de consultoría e ingeniería [IDOM Consulting, Engineering, Architecture SAU](#) entró como inversora en Moltex Energy, uniéndose al cluster New Brunswick Modular Reactor, que dirige New Brunswick Power. La amplia experiencia y trayectoria internacional de IDOM en ingeniería nuclear, junto con la experiencia de la empresa española en el diseño de instalaciones con sales fundidas para energía solar de concentración (CSP) son dos fortalezas que presenta esta de cara al proyecto del SSW. (Ver más en [18]).

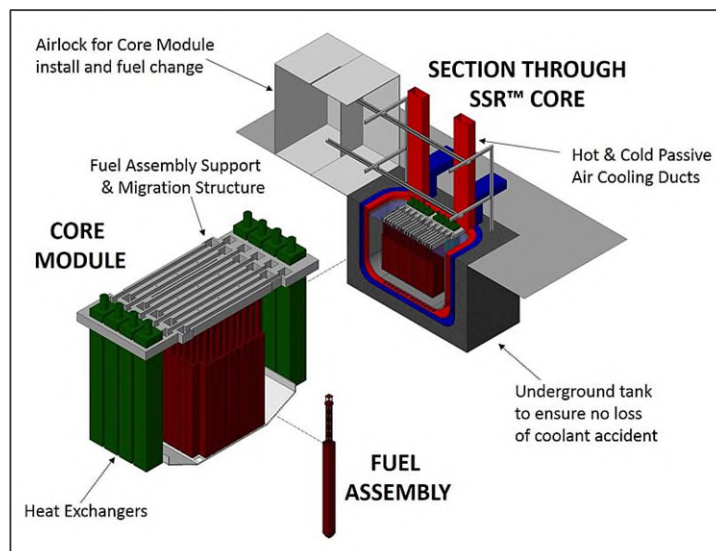


Ilustración 3 Esquema de la unidad SSR-W

CONCLUSIONES

- La tecnología SMR se encuentra en pleno desarrollo y cuenta con la próxima implantación de los primeros diseños.
- La tecnología SMR constituye una solución que supera los problemas económicos de costes asociados a los reactores actuales.
- La tecnología SMR es compatible con los desarrollos basados en energías renovables.
- La tecnología SMR permite el uso eficiente del combustible reduciendo considerablemente la generación de residuos con ello la carga a futuras generaciones.
- El carácter modular permite una adaptación al incremento futuro de necesidades de generación.
- El propio diseño de los SMR permite un incremento en la seguridad del uso de esta tecnología.

REFERENCIAS

- [1] OIEA (Organismo Internacional de la Energía Atómica). *Small Modular Reactors*. [Ver en la web](#).
- [2]. Departamento de Energía de los EEUU. Oficina de Energía Nuclear. *Benefits of Small Modular Reactors (SMRs)*. [Ver en la web](#).
- [3]. D’Haeseleer, William D. *Synthesis on the Economics of Nuclear Energy*. Estudio para la Comisión Europea, Dirección de la Energía (2013). [Ver en la web](#).
- [4] Energy Policy Institute of the Center for Advanced Energy Studies. *Economic and Employment Impacts of Small Modular Reactors* (2010). [Enlace para descarga](#)
- [5] NuScale Power. *Technology overview*. [Ver en la web](#)
- [6] NuScale Power. *Nuscale’s affordable SMR technology for all*. [Ver en la web](#)
- [7]. NuScale Power. *Carbon Free Power Project*. [Ver en la web](#)
- [8] Idaho Policy Institute, Boise State University; McClure Center for Public Policy Research, University of Idaho *Economic Impact Report Construction and Operation of a Small Modular Reactor Electric Power Generation Facility at the Idaho National Laboratory Site, Butte County, Idaho*. [Descargar el informe](#)
- [9] Universidad de Stanford. *Introduction to the Physics of Energy. Molten Salt Storage*. [Ver en la web](#).
- [10] TerraPower. *Sodium Program Summary*. [Ver en la web](#).
- [11]. Ceiden Noticias⁹. *Bill Gates y Warren Buffett anuncian planes para instalación de un Nuevo tipo de reactor en Wyoming* [Ver en la web](#).
- [12]. CNBC. *How Bill Gates’ company TerraPower is building next-generation nuclear power*. [Ver en la web](#).
- [13] World Nuclear News. *TerraPower circles 2023 for Sodium construction permit*. [Ver en la web](#).
- [14] OIEA. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments* (2018). [Ver en la web](#)
- [15]. Benito Mignacca, Giorgio Locatelli. *Economics and finance of Molten Salt Reactors*. Progress in Nuclear Energy, 129, 103503. (2020). doi:10.1016/j.pnucene.2020.103503.
- [16]. Nuclear Energy Insider. *Moltex Energy Sees UK, Canada SMR Licensing as Springboard to Asia* (2016). [Ver en la web](#).
- [17] World Nuclear News. *Moltex SMR clears first phase of regulatory review*. [Ver en la web](#)
- [18]-Moltex Energy. *Moltex Energy secures multi-million dollar funding from leading global consulting firm IDOM*. [Ver en la web](#).
- [5]. OECD-NEA. *Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities* (2021) [Ver en la web](#)

⁹ El equipo redactor de la noticia ha participado en la elaboración del informe.