



CCHEN
Ministerio de Energía

Gobierno de Chile



Central Nuclear Grohnde, Alemania

INFORME

ENERGÍA NUCLEAR DE POTENCIA

Comisión Chilena de Energía Nuclear

Revisión de temáticas relevantes
para una discusión

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Objetivo y alcance del documento	4
1.2. Origen del trabajo	4
1.3. Estructura del documento	5
2. ANTECEDENTES GENERALES	6
2.1. Contexto energético mundial y Energía Nuclear de Potencia (ENP)	6
2.1.1. Cambio climático y Energía Nuclear de Potencia	6
2.1.2. Energía Nuclear de Potencia en el mundo	7
2.2. Metodología OIEA para evaluar implementación de Prog. Nuclear de Potencia	12
2.3. Estudios anteriores	13
3. REVISIÓN DE TEMÁTICAS RELEVANTES	18
3.1. Aspectos habilitantes para implementación de un Prog. Nuclear de Potencia	18
3.1.1. Posición nacional	18
3.1.2. Aceptación pública	19
3.2. Tecnologías Nucleares de Potencia	20
3.2.1. Diferencias entre generaciones	20
3.2.2. Reactores Modulares Pequeños (SMR, <i>Small Modular Reactor</i>)	21
3.2.3. Generación IV	21
3.2.4. Aplicaciones	23
3.2.5. Flexibilidad de operación	24
3.2.6. Desafíos pendientes	24
3.3. Aspectos de Seguridad Nuclear	25
3.3.1. Cómo se ha incorporado la experiencia de los accidentes	22
3.3.2. Avances en el diseño para la Seguridad Nuclear	26
3.3.3. Otras áreas reforzadas	26
3.3.4. Experiencia operacional con terremotos	26
3.3.5. Estado de la infraestructura de seguridad en Chile	27
3.3.6. Acuerdos internacionales y cooperación en materias de seguridad nuclear y protección radiológica	28
3.4. Consideraciones ambientales para un proyecto nuclear de potencia	29
3.4.1. Enfoque OIEA Milestones en relación a medio ambiente	29
3.4.2. Aspectos ambientales relevantes del uso de energía nuclear de potencia	30
3.5. Consideraciones para Emplazamiento de una Centra Nuclear de Potencia	39
3.6. Aspectos económicos	43
3.6.1. Costo nivelado de la energía (LCOE)	43
3.6.2. Costo de inversión	45
3.6.3. Costo overnight	45
3.6.4. Costo de financiamiento	46
3.6.5. Costo de contingencias	47
3.6.6. Factores relevantes que incluyen en los costos	47
3.6.7. Otros costos	49
3.6.8. Factores relevantes que influyen en los costos	50
3.7. Consideraciones para la determinación de la viabilidad económica en Chile	53
3.7.1. Costos estimados para Chile	53
3.7.2. Ejercicio de Modelación 2018	56
3.7.3. Ejercicio de Modelación 2019	58

3.8. Aspectos institucionales y regulatorios	61
3.8.1. Importancia de la institucionalidad y aspectos específicos a considerar	61
3.8.2. Situación nacional	62
3.9. Recursos Humanos	66
3.9.1. Principales actores involucrados en un Programa Nuclear de Potencia	66
4. CONCLUSIONES	69
5. RECOMENDACIONES	73
6. REFERENCIAS	74
7. ANEXOS	77

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Objetivo y alcance del documento

El objetivo del presente documento es entregar información acerca de distintos aspectos de la energía nuclear de potencia, de modo que esta tecnología pueda ser evaluada como una opción más dentro el proceso de revisión de la **Política Energética 2050**.

El informe presenta un análisis del estado actual de la energía nuclear de potencia a nivel internacional, con una mirada de futuro, incluyendo conclusiones y recomendaciones para acciones próximas, para contribuir a un debate nacional informado sobre la conveniencia de incorporar esta tecnología dentro de las opciones energéticas de largo plazo.

1.2. Origen del trabajo

En 2006, el país se planteó la necesidad de sentar las bases del conocimiento para prepararse ante una necesidad futura de incorporar la energía nuclear de potencia en la matriz energética nacional. Por ello, durante la última década, se han realizado estudios tendientes a contar con la información necesaria para evaluar la conveniencia e implicancias que tendría la implementación de esta opción energética en el país.

En el marco de la **Agenda de Energía**¹ presentada por el Ministerio de Energía en mayo de 2014, se desarrolló un proceso de discusión nacional, para obtener una visión de largo plazo del país, que constituyera la política energética nacional al año 2050. Este proceso fue liderado por el Ministerio de Energía, e incluyó a los actores relevantes del sector público, industria, academia, sociedad civil y ciudadanía en general.

De ese trabajo derivó el documento **Energía 2050**², que propone una visión del sector energético al año 2050 como un sector “confiable, sostenible, inclusivo y competitivo”. Para alcanzar esta visión, se proponen cuatro pilares en torno a los cuales se definirán metas y planes de acción: **Seguridad y calidad de suministro, Energía como motor de desarrollo, Energía compatible con el medio ambiente, Eficiencia y educación energética**.

En ese documento se establece que:

“La Agencia Internacional de Energía suscribe que la energía nuclear puede jugar un rol clave para la reducción de emisiones de CO₂. En el caso chileno, y a pesar que la Política Energética no descarta a priori ninguna tecnología de generación, la energía nuclear de potencia no ha sido incluida como una opción a corto plazo pues requiere de estudios en aspectos clave, como la viabilidad económica de largo plazo ante distintas condiciones legales y de mercado, los ajustes legales e institucionales requeridos, entre otros. Estos estudios deben ser dirigidos desde la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) convocando a los organismos nacionales competentes. Dado esto, se establece que, en el próximo proceso de evaluación de la Política Energética de largo plazo, se revise la conveniencia de incorporar esta tecnología a la matriz de generación eléctrica.”

En este marco, la CCHEN se ha abocado al desarrollo y actualización de estudios en distintas materias, donde han participado diversos actores del sector público y académico, así como consultores internacionales, de modo que la tecnología nuclear pueda ser evaluada como una opción más dentro de la matriz energética nacional.

¹ Ministerio de Energía, *Agenda de Energía*. 2014.

² Ministerio de Energía, *Energía 2050. Política Energética de Chile*.

1.3. Estructura documento

Este documento cuenta con cinco (5) secciones: en **Introducción** se presentan antecedentes que han dado origen a este informe. Luego, en **Antecedentes generales** se describe el estado de la energía nuclear de potencia y aspectos del cambio climático. En la sección **Revisión de temáticas relevantes** se presenta el estado del arte en las materias más relevantes de un Programa Nuclear de Potencia, luego, en **Conclusiones** se desarrolla un análisis global de las temáticas consideradas y, finalmente, se entregan **Recomendaciones** sobre cómo abordar la Energía Nuclear de Potencia, considerando el escenario energético actual chileno.

2. ANTECEDENTES GENERALES

2.1. Contexto energético mundial y Energía Nuclear de Potencia (ENP)

2.1.1. Cambio climático y Energía Nuclear de Potencia

Dentro de los aspectos relevantes a la hora de analizar estrategias de desarrollo en materia energética, se encuentra la influencia que las distintas tecnologías puedan tener en el cambio climático. Hoy, los esfuerzos mundiales apuntan hacia un escenario energético bajo en carbono, para enfrentar los impactos en los sistemas humanos y naturales a causa del calentamiento global. Alineado a este escenario, Chile se plantea un horizonte carbono - neutral al año 2050, lo cual, a través de una estrategia climática a largo plazo, mitigaría y reduciría las emisiones de los distintos sectores generadores.

Un diagnóstico de la situación en el país es presentado en el **Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático** (Ministerio de Medio Ambiente, 2018), cuyos resultados muestran un aumento sostenido en las emisiones de CO₂ eq, siendo el mayor aporte el proveniente del sector energético (78%), principalmente a causa del “consumo de carbón mineral diésel para la generación eléctrica, y el consumo de combustibles líquidos en el transporte terrestre” (gráfico 1).

Por eso, para disminuir las emisiones se deberán dedicar esfuerzos importantes a estos sectores:

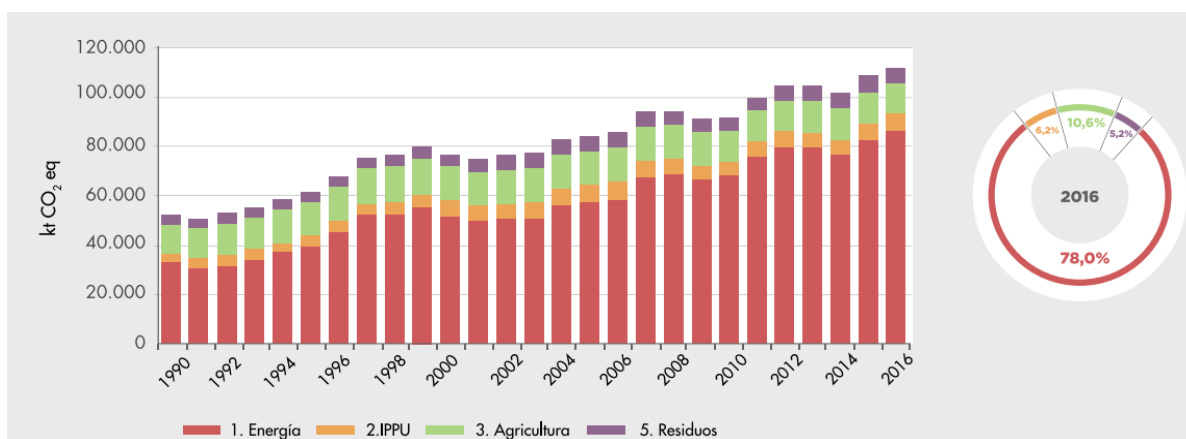


Gráfico 1: emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) totales (kt CO₂ eq) por sector, serie de tiempo. 1990-2016. Fuente: Ministerio de Medio Ambiente (2018).

La energía nuclear no genera emisiones de CO₂ eq durante su operación, lo que la hace comparable con las energías renovables, como la energía solar, eólica e hidráulica. De acuerdo a la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2019), el uso de energía nuclear ha evitado la emisión de 63 gigatoneladas de dióxido de carbono (GtCO₂) entre los años 1971 - 2018³.

En el gráfico 2 se pueden observar las emisiones directas e indirectas asociadas a diferentes fuentes de generación energética.

3 International Energy Agency, *Nuclear Power in a Clean Energy System*, 2019.

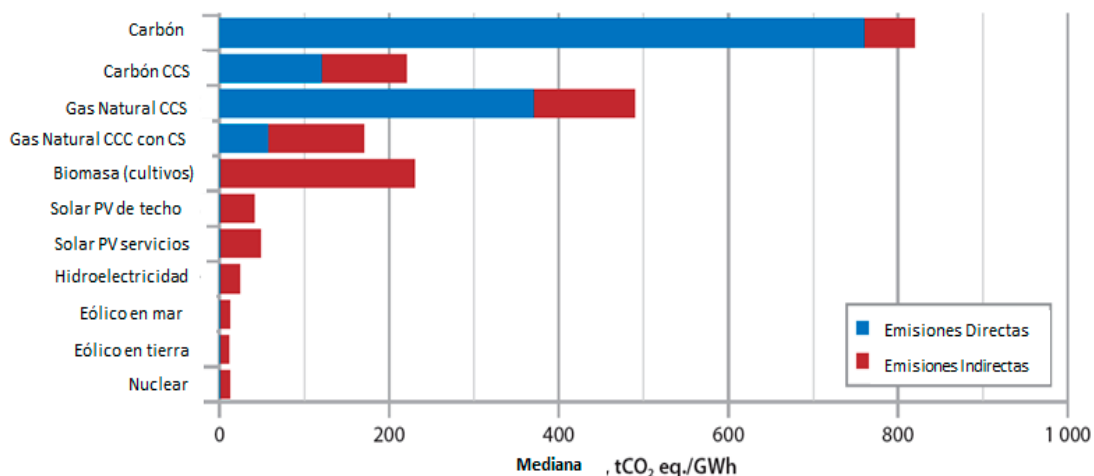


Gráfico 2: emisiones gases efecto invernadero (GEI) generadas por distintas fuentes de electricidad⁴.
Fuente: OECD-NEA (2015).

La **Política Energética 2050**, por su parte, plantea un horizonte energético sustentable a través del desarrollo de “un sector confiable, sostenible, inclusivo y competitivo” donde además se establece que, si bien la energía nuclear no ha sido incluida como una opción a largo plazo, es necesario realizar los estudios técnicos pertinentes para ser revisados en el próximo proceso de evaluación de la Política (año 2020).

2.1.2. Energía Nuclear de Potencia en el mundo

La necesidad de asegurar la disponibilidad de suministro energético, la preocupación mundial por disminuir las emisiones de dióxido de carbono y la evolución de los nuevos diseños de reactores, con características inherentes de seguridad, han generado que la tecnología nuclear retome fuerza como alternativa de energía libre de emisiones de CO₂ eq.

A febrero de 2020, existían 442 reactores nucleares de potencia operacionales en todo el mundo, con una capacidad instalada total de 390,5 GWe⁵, así como 52 reactores en construcción. El gráfico 3 muestra la distribución de reactores a nivel mundial, siendo Estados Unidos el país con mayor cantidad, seguido por Francia, que a su vez cuenta con la mayor participación de esta tecnología dentro de su matriz energética (72%).

⁴ Organisation for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency, *Nuclear Energy: Combating Climate Change*, 2015.

⁵ Datos de plataforma “Power Reactor Information System”, OIEA. <https://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>

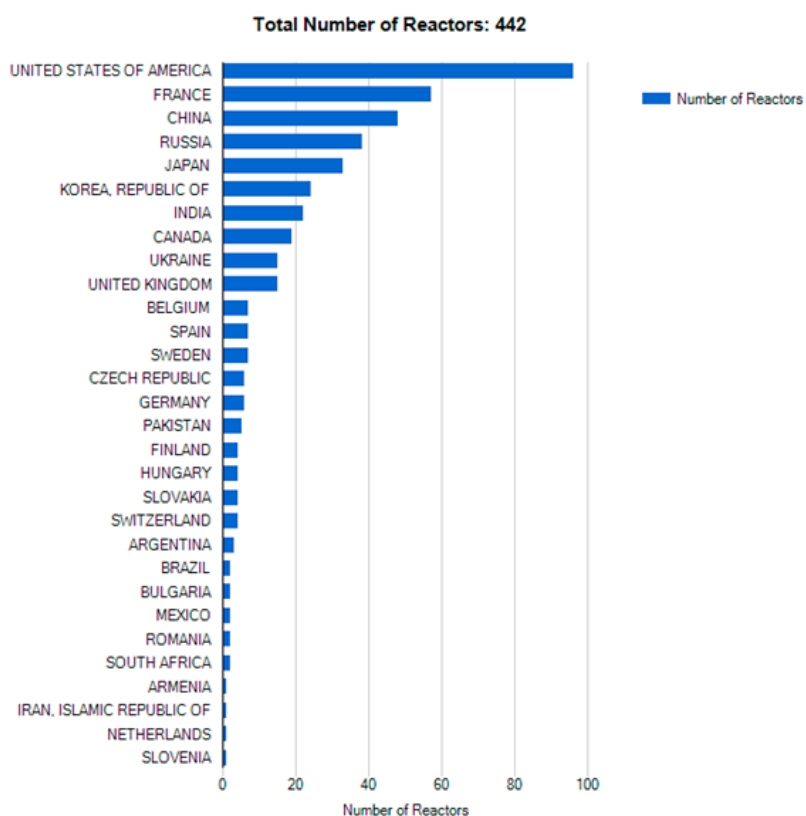


Gráfico 3: N° de reactores por país. Fuente: PRIS, OIEA (Febrero, 2020).

El gráfico 4 muestra el número de reactores en construcción, liderado por China, con 10 reactores, y seguido por India, con 7⁶.

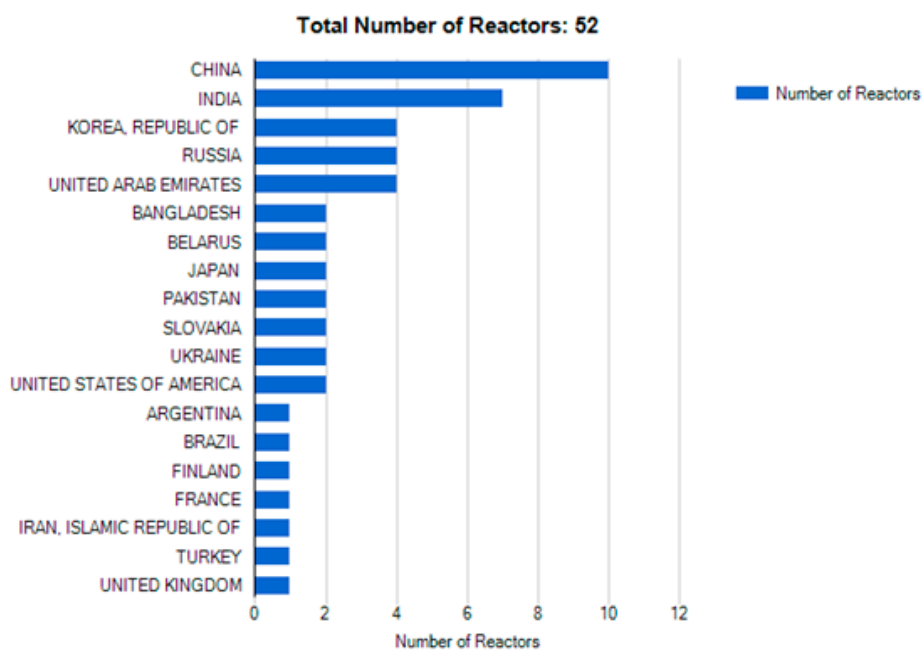


Gráfico 4: N° de reactores en construcción. Fuente: PRIS, OIEA (Febrero, 2020).

El gráfico 5 representa cómo están distribuidos a nivel regional los reactores operacionales y en construcción, lo que está liderado por América del Norte, seguido de Asia.

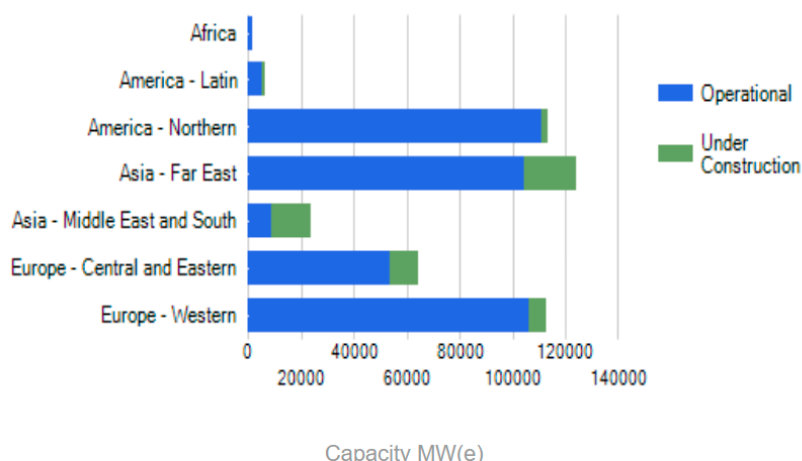


Gráfico 5: distribución regional de centrales nucleares. Fuente: PRIS, OIEA (Febrero, 2020).

Si bien, tras el accidente nuclear de Fukushima Daiichi, muchos países paralizaron la operación de sus centrales nucleares para someterse a los stress test⁷, o también por el miedo e incertidumbre que provocó este acontecimiento en las personas y los gobiernos, con el pasar de los años la mayoría de estos han retomado sus actividades, y otros países han mantenido o reactivado su interés por iniciar nuevos proyectos de generación nuclear. En el gráfico 6 se aprecia que aún tras el accidente de Fukushima, las construcciones de nuevas centrales se han mantenido, llegando incluso a su peak de los últimos años en 2013, dos años después del accidente.

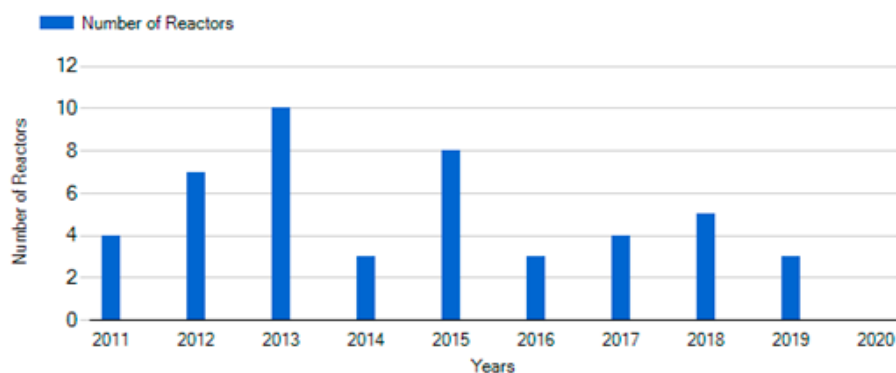


Gráfico 6: N° centrales nucleares que iniciaron su construcción. Fuente: PRIS, OIEA (Febrero, 2020).

En el gráfico 7 se presenta la cantidad de reactores que se han conectado a la red, por primera vez en los últimos años, donde se aprecia que la tendencia de nuevas conexiones no ha disminuido desde 2011, principalmente por el impulso que le ha dado China a su programa nuclear, representando siete (7) de las nueve (9) conexiones totales a la red en 2018 y dos (2) en 2019.

⁷ En respuesta al accidente nuclear de Fukushima (2011), se realizaron evaluaciones de riesgo y seguridad («pruebas de Stress/Resistencia») en todas las centrales nucleares de la Unión Europea, Estados Unidos, Japón y otros países. Asimismo, la Comisión Europea alentó y cooperó con reguladores nucleares de todo el mundo para realizar ejercicios similares. El objetivo era verificar si las normas de seguridad utilizadas cuando las centrales eléctricas recibían sus licencias eran suficientes para cubrir eventos extremos inesperados. En concreto, los ensayos midieron la capacidad de las instalaciones nucleares para soportar daños causados por terremotos, inundaciones, ataques terroristas o colisiones de aeronaves.

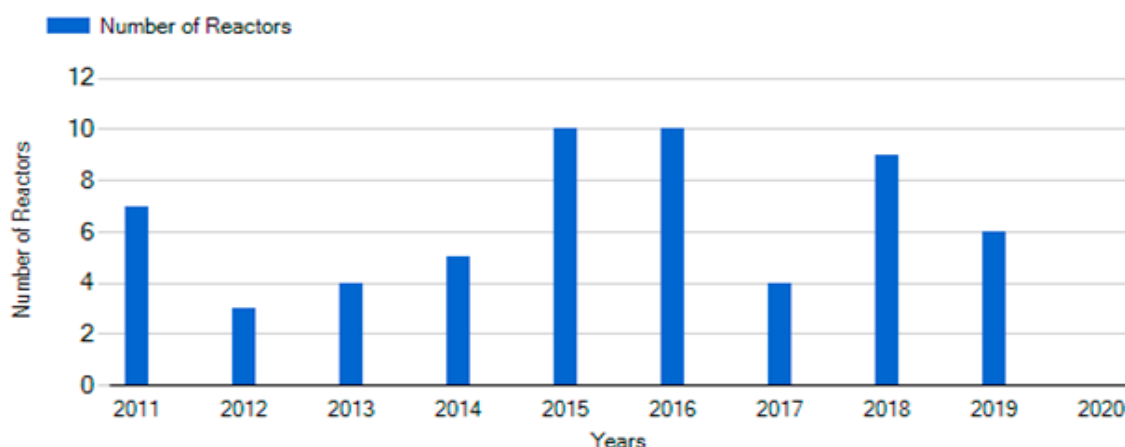


Gráfico 7: conexiones a la red eléctrica de nuevos reactores. Fuente: PRIS, OIEA (Febrero 2020).

China representa el país con mayor número de nuevos proyectos desarrollados en los últimos años, contando con 48 reactores nucleares en operación, 10 en construcción y planes adicionales de construcción. El país se ha vuelto, en gran medida, autosuficiente en el diseño y construcción de reactores, así como en otros aspectos del ciclo del combustible⁸, para lo cual está haciendo un uso extendido de la tecnología occidental al tiempo que la adquiere y adapta. El impulso que está dando China a su programa nuclear se debe también en parte a su política de reducción de emisiones y fomento de energías limpias⁹.

Reino Unido cuenta con 15 reactores que generan aproximadamente el 21% de su electricidad. Sin embargo, casi la mitad de esta capacidad está llegando al final de su vida útil, por lo que debería ser retirada para el 2025. Por ello, el país ha impulsado una política de gobierno para la introducción de nuevas plantas nucleares, a través de medidas de apoyo para las nuevas construcciones, para facilitar su implementación. Asimismo, ha instaurado un proceso de evaluación para los nuevos diseños de reactores y para el emplazamiento de nuevas centrales (la última de estas, Hinkley Point C), como así también para la extensión de la vida útil de sus centrales actuales.

El programa incluye un importante apoyo al desarrollo de reactores tipo SMR (Reactor Modular Pequeño, por su traducción al español). El gobierno está impulsando acciones y programas para identificar modelos SMR que mejor se adapten a las necesidades del país, colaborando con proveedores como NuScale, Hitachi y Rolls Royce¹⁰.

En septiembre de 2016, Energy Technologies Institute (ETI) publicó el informe *“Preparación para el despliegue de un reactor modular pequeño del Reino Unido para 2030”*, donde examina los pasos que deberán ser adoptados por el gobierno, los reguladores, los proveedores de tecnología y los operadores para la construcción de un primer reactor SMR, a partir de 2025.

El despliegue de este tipo de reactores en Reino Unido está considerado también para otros usos además de la generación de electricidad, derivados del suministro de vapor de los reactores.

8 Conjunto de operaciones necesarias para fabricar combustible destinado a centrales nucleares, así como al tratamiento del combustible gastado producido por la operación de las mismas. El ciclo abarca, por consiguiente, el proceso de salida del mineral de la “mina” para la fabricación del combustible y su devolución en forma transformada, ya utilizado, a la mina o almacén subterráneo. Fuente: <https://www.foronuclear.org/es/energia-nuclear/faqs-sobre-energia/capitulo-9/115772-118-ique-es-el-ciclo-del-combustible-nuclear>

9 En septiembre de 2014, el Consejo de Estado de China aprobó un plan nacional de cambio climático preparado por la NDRC (National Development and Reform Commission), que estableció los objetivos de emisión y energía limpia para 2020. El objetivo en intensidad de emisión de carbono es una reducción del 40-45% de 2005 a 2020, con un avance considerable de casi el 29% a fines de 2013. Fuente: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power.aspx>

10 World Nuclear Association, actualizado a febrero 2020.

Con respecto a Japón, luego del cierre de todas sus centrales nucleares tras el accidente de Fukushima, el país las ha ido incorporando paulatinamente a medida que han concluido y aprobado su proceso de revisión. En agosto de 2019, Japón contaba con 37 reactores “operacionales”¹¹, de los cuales ocho (8) ya han reiniciado operación. Hoy, 17 reactores están en proceso de revisión para volver a operar, el resto está en preparación para entrar en el proceso de evaluación¹².

Japón cuenta, además, con dos centrales en construcción. En 2014, el gobierno adoptó su Plan Estratégico de Energía, con una perspectiva de 20 años, declarando la energía nuclear como una fuente de energía de base clave y que se seguirá utilizando de manera segura para lograr un suministro de energía estable, asequible y como herramienta para combatir el calentamiento global. Tras Fukushima, el país ha debido enfrentar su déficit de generación importando alrededor del 90% de sus requerimientos energéticos, principalmente a través de combustibles fósiles¹³.

A nivel regional, la energía nuclear también tiene presencia, existiendo programas nucleares de potencia en Argentina, Brasil y México.

Argentina cuenta con tres (3) reactores nucleares de potencia, que generan aproximadamente el 5% de su electricidad, y planea la construcción de otros dos reactores, los que una vez que entren en operación, aportarían aproximadamente 1.900 MW adicionales al sistema eléctrico nacional¹⁴.

Históricamente la industria nuclear argentina ha tenido un avance importante en el desarrollo y comercialización de su tecnología para reactores de investigación, llegando, incluso, a exportar este tipo de reactores. Sin embargo, el país ha extendido también sus capacidades hacia la tecnología nuclear de potencia, encontrándose actualmente en etapas avanzadas de desarrollo del prototipo CAREM-25, un reactor nuclear de potencia del tipo SMR. En abril de 2018, el regulador nuclear extendió la licencia de operación de Atucha-1 (en funcionamiento desde 1974), permitiendo su operación hasta el año 2024.

Brasil, por su parte, inició su desarrollo nuclear el año 1982, cuando entró en operación su primer reactor nuclear de potencia. Actualmente, el país cuenta con dos reactores que generan aproximadamente el 3% de su electricidad (Angra 1 y Angra 2). La construcción del reactor Angra 3, de 1.405 MWe, se había reiniciado el año 2010, estimándose su entrada en operación en el año 2018 sin embargo, la construcción se encuentra suspendida¹⁵. A futuro, el gobierno de Brasil considerará en su *Plan Energético Nacional al 2050*, el desarrollo de nuevas plantas con tecnologías de Generación IV y SMRs¹⁶.

México cuenta con dos (2) reactores nucleares de potencia que generan casi el 4% de su electricidad, el primero de los cuales comenzó su operación en 1989. El país cuenta con apoyo gubernamental para la expansión de la energía nuclear de potencia, con el fin de reducir la dependencia del gas natural como también para reducir las emisiones de carbono.

El Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (2015) incluye planes para agregar nueva capacidad, considerando tres (3) centrales nucleares, con un calendario tentativo para entrar en operación comercial a fines de la década del 2020¹⁷.

11 Un reactor operacional es uno que está conectado a la red eléctrica. En su mayoría, estos reactores generarán y suministrarán electricidad a los consumidores. Sin embargo, durante periodos cortos, los reactores podrían no suministrar electricidad a la red, por ejemplo, durante una interrupción programada para reabastecimiento, mantenimiento o, por ejemplo, como en el caso de reactores japoneses, estar detenidos hasta obtener el permiso de operación.

12 Japan Atomic Industrial Forum, *NPPs in Japan*. 2019, <https://www.jaif.or.jp/en/npps-in-japan/>

13 <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-power.aspx>

14 World Nuclear Association

<https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/argentina.aspx>

15 Marzo de 2020.

16 World Nuclear News, *Brazilian government committed to nuclear, says energy minister*, 2019.

<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Brazilian-government-committed-to-nuclear-minister>

17 World Nuclear Association, *Nuclear Power in Mexico*, 2017.

2.2. Metodología OIEA para evaluar la implementación de un Programa Nuclear de Potencia (PNP)

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) es un organismo perteneciente a las Naciones Unidas, que representa el principal foro mundial intergubernamental de cooperación científica y técnica en la esfera nuclear. Su objetivo es promover el uso de las tecnologías nucleares con fines pacíficos y en condiciones de seguridad tecnológica y física.

Dentro de esta esfera, el OIEA propone una metodología para guiar a los países que están comenzando en el proceso de evaluación de la opción nuclear, la que considera la implementación de cuatro fases consecutivas y crecientes en recursos y detalles de implementación, que implica la revisión, de al menos 19 áreas esenciales (figura 1)¹⁸.



Figura 1: 19 áreas esenciales que deben ser revisadas a lo largo del proceso. Fuente: OIEA (2015).

En este modelo, la Fase 1 representa una fase preparatoria que permite al país conocer todos los compromisos, requerimientos e implicancias de la implementación de un PNP. Esta fase requiere, para su inicio, que la opción nuclear haya sido incluida como una opción a evaluar dentro de la estrategia nacional de energía. La Fase 2 corresponde a trabajo de preparación de infraestructura, previo a iniciar la construcción de la central, la cual se realiza en la Fase 3 (figura 2).

¹⁸ Organismo Internacional de Energía Atómica, *Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power*, 2015.

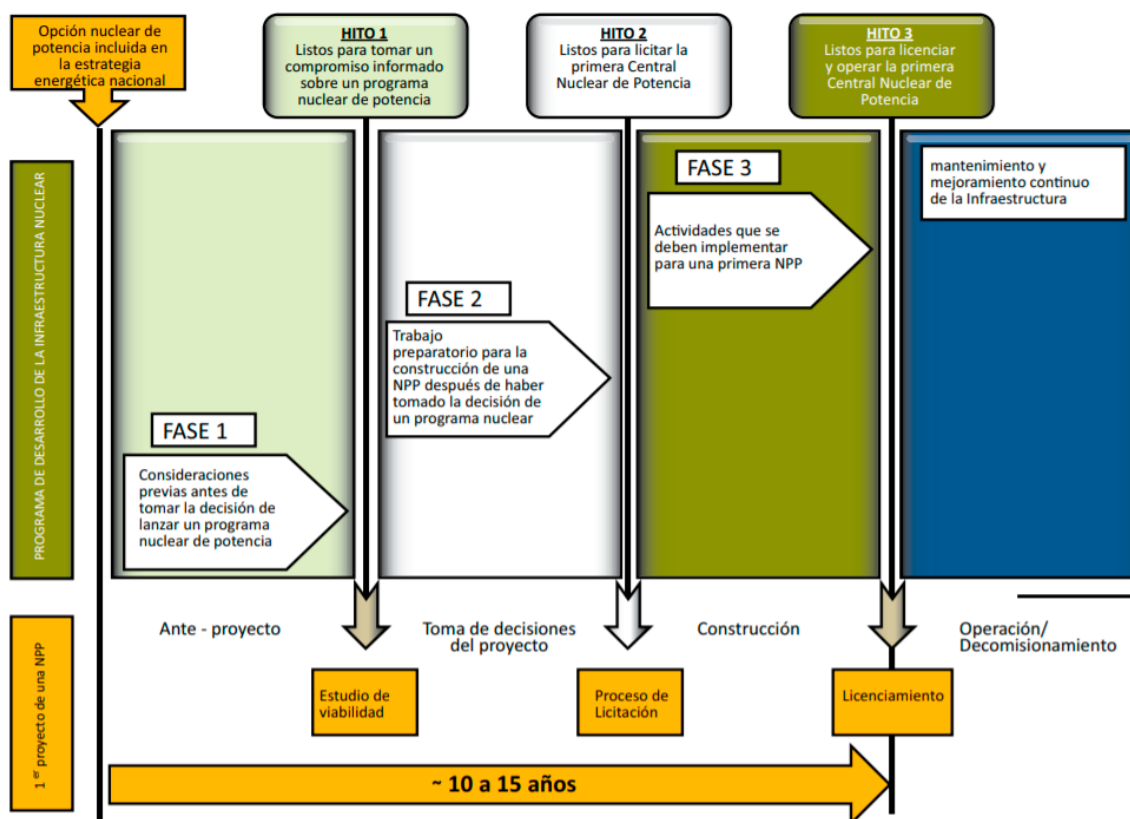


Figura 2: fases para implementar programa nuclear. Fuente: adaptación del OIEA (2015).

La metodología y los lineamientos propuestos por el OIEA recogen la experiencia y consenso internacional adquirido a través de los años, por lo que su adhesión a estos representa una validación y legitimación del proceso. Por ello, nuestro país ha llevado a cabo una estrategia de análisis y evaluación que se enmarca en estos lineamientos y en las mejores prácticas, aplicando la metodología anteriormente expuesta y siguiendo las guías y procedimientos que se proponen para cada temática.

El país ha contado, además, con la asesoría permanente de expertos internacionales de dicho Organismo, así como con acceso a información técnica y la posibilidad de participar en seminarios y capacitaciones específicas.

2.3. Estudios anteriores

A continuación, se describe el proceso llevado a cabo entre los años 2007 y 2015 (figura 3), donde se analiza el estado del país en el marco de la implementación de un PNP, bajo el marco internacional sugerido por el OIEA.

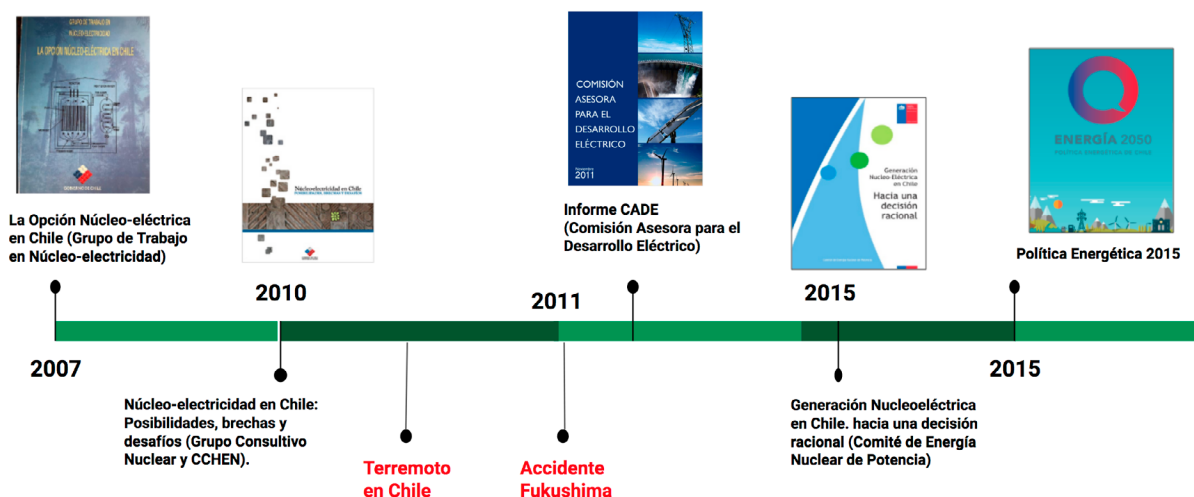


Figura 3: antecedentes en materia nucleoelectrica en Chile. Fuente: elaboración propia (2019).

1. “LA OPCIÓN NÚCLEO-ELÉCTRICA EN CHILE” (Grupo de trabajo en Núcleo-electricidad, 2007)

En marzo de 2007, S. E. la Presidenta de la República, Michelle Bachelet Jeria, oficializó la formación del Grupo de trabajo en Núcleo-Electricidad (GTNE), integrado por 10 profesionales independientes, de distintas especialidades, liderados por el Dr. Jorge Zanelli¹⁹.

Al grupo se le encomendó la misión de **“asesorar al Gobierno en la evaluación de los estudios tendientes a la identificación de oportunidades, ventajas, desafíos y riesgos que involucraría el uso de la energía nuclear para la producción de electricidad en nuestro país, dentro del marco de los tratados internacionales que rigen la materia.”**

El informe recoge la opinión consensuada del grupo tras el análisis de la experiencia internacional sobre la generación núcleo-eléctrica y aspectos pertinentes de la realidad chilena del momento. El grupo revisó temas de mercado eléctrico, aspectos económicos de núcleo-electricidad, tecnología de reactores, desechos radiactivos, accidentes e incidentes nucleares, opinión pública, impactos ambientales, impactos de generación nucleoelectrica en la salud, seguridad nacional, RR.HH., rol del Estado e institucionalidad.

Como resultado, el Grupo concluyó que:

“El examen de todos los antecedentes de que dispuso este grupo de trabajo no permite descartar la energía nuclear como una opción energética futura para el país”. Asimismo, señala que “la decisión de incorporar la generación núcleo-eléctrica es estratégica en lo técnico, en lo político y en lo geopolítico. Esto exige del Estado un papel activo y distinto al mantenido hasta hoy, tanto en el proceso de evaluación como en la selección de las opciones técnicas posibles y en el diseño del marco regulatorio global.”

El informe señala también que la infraestructura nacional no es propicia para implementar un PNP.

Por ello, se recomienda la adopción de algunas medidas necesarias para avanzar en la discusión del tema, que apunten a definir la viabilidad institucional, técnica y económica de la energía nuclear de potencia y a dimensionar los requerimientos e impacto global de su incorporación en nuestro país. Entre estas medidas, se recomienda la realización de una serie de estudios relacionados con aspectos del ámbito institucional, económico, ambiental, territorial, de salud, y recursos humanos.

¹⁹ Jorge Zanelli: físico, Universidad de Chile; Doctor en Física, State University of New York (EE.UU.); Investigador, Centro de Estudios Científicos de Valdivia.

El GTNE señala que la conclusión sobre la conveniencia o no de la opción núcleo-eléctrica debe ser el resultado del examen de los antecedentes que se recaben tras el desarrollo de dichos estudios.

2. “NÚCLEO-ELECTRICIDAD EN CHILE: POSIBILIDADES, BRECHAS Y DESAFÍOS” (Grupo Consultivo Nuclear, 2010)

A raíz de las recomendaciones del estudio elaborado por el GTNE, la Presidenta de la República encargó al Ministro de Energía de la época, Sr. Marcelo Tokman R., continuar la labor del GTNE y avanzar en todos los aspectos necesarios para que el país pudiera tomar una decisión sobre si continuar o no hacia el desarrollo de infraestructura nacional para la producción de energía nuclear. Para ello, se conforma el Grupo Consultivo Nuclear (GCN) al cual se le encomendó dirigir una serie de actividades tendientes a determinar la conveniencia para el país de adoptar un PNP.

Para el desarrollo de esta tarea se desarrollaron nueve (9) estudios técnicos en diversas materias, de acuerdo a lo recomendado por el GTNE:

1. “Roles del Estado y del Sector Privado en la Generación Núcleo-eléctrica”.
2. “Marco Regulatorio Nuclear: Experiencia Internacional”.
3. “Estudio de Opciones de ciclo del combustible nuclear”.
4. “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo-eléctrica”.
5. “Estudio de Opinión Pública”.
6. “Requerimientos de adecuaciones del marco legal ante la eventual incorporación de la energía nuclear de potencia”.
7. “Caracterización de Riesgos Naturales para el Desarrollo de un Programa Núcleo-eléctrico en Chile”.
8. “Análisis y propuesta de regulación núcleo-eléctrica”.
9. “Costo de la Energía Nuclear en Chile”.

Asimismo, la CCHEN se integró al trabajo de este grupo y, siguiendo los lineamientos del OIEA, comienza el desarrollo del proceso de “Autoevaluación Nacional”²⁰. El informe “Núcleo-electricidad en Chile: Posibilidades, brechas y desafíos” resume todo el trabajo realizado en este periodo y fue entregado a la Presidenta en febrero del 2010.

Con estos insumos en el informe se concluyó:

“A la luz de la información disponible a esa fecha, la opinión de expertos internacionales y las proyecciones del Ministerio de Energía sobre demanda y suministro de electricidad, la GNE (Generación Nucleoeléctrica) podría contribuir de manera significativa a resolver las necesidades futuras de la matriz eléctrica nacional y que este objetivo se podría lograr en condiciones de seguridad para las personas y el medio ambiente, reduciendo la huella de carbono proyectada del país, y a costos competitivos. Por estos motivos, dicho informe concluía que la GNE sería económica y ambientalmente sustentable”.

El informe recomienda “iniciar las inversiones necesarias para estar preparados para contar con núcleo-electricidad oportunamente, si llegase a requerirse” y “avanzar en el cierre de brechas tecnológicas, institucionales y de conocimiento”.

3. “GENERACIÓN NÚCLEO-ELÉCTRICA EN CHILE: HACIA UNA DECISIÓN RACIONAL” (Comité de Energía Nuclear de Potencia, 2015):

Como es de conocimiento general, en febrero de 2010 y en marzo de 2011 ocurrieron dos eventos sísmicos de gran magnitud a nivel mundial, el terremoto en Chile de 8,8 Mw y el terremoto de

²⁰ Como parte del proceso de Autoevaluación llevado adelante por CCHEN, se solicitó una Misión de Verificación al OIEA, para evaluar la correcta implementación de la metodología y el estado de avance con respecto a la 1a fase de un PNP. Esa Misión se realizó entre el 30 de noviembre y el 4 de diciembre de 2009.

Japón de 9,0 Mw. Parte de las consecuencias que tuvieron estos dos eventos fue el freno al proceso de evaluación de la opción nuclear que se estaba llevando a cabo en el país.

En noviembre de 2011, el informe de la Comisión Asesora para el Desarrollo Eléctrico (CADE) afirmaba: “Esta Comisión considera conveniente y, por ende, recomienda continuar el camino enunciado en dicho informe²¹ completando el proceso de evaluación y preparación para que el país esté en condiciones de tomar una decisión informada en esta materia en los próximos años.”

Dicha comisión también concluye:

“La mirada de futuro que se le ha pedido a esta Comisión, refrendada en los estudios prospectivos de escenarios que hemos realizado, nos señala la recomendación estratégica de mantener abierta la opción nuclear para Chile y en lo inmediato avanzar en las áreas de estudio enunciadas”. No obstante, el proceso de análisis y estudio de la opción nuclear se detuvo por completo, por un período de casi 5 años.

En 2014, el país inició un proceso para diseñar y ejecutar una Política Energética de Largo Plazo que contara con validación social, política y técnica a nivel nacional. Como parte de este trabajo, el Ministerio de Energía le encomienda al Consejo Directivo de CCHEN la conformación de un equipo de trabajo para evaluar si las conclusiones y recomendaciones establecidas por el GCN en 2010 eran aún válidas, considerando los nuevos antecedentes y hechos ocurridos en los últimos años, y qué acciones debería seguir el país para retomar el proceso de evaluación de la opción nuclear.

Para ello, la CCHEN convocó al Comité de Energía Nuclear de Potencia (CENP), conformado por profesionales de distintas áreas del conocimiento, quienes analizaron los antecedentes existentes a la fecha en diversas áreas temáticas, examinando el estado de avance del país y la situación internacional en materia de nucleoelectricidad, considerando los cambios ocurridos en los últimos años y las lecciones derivadas de las experiencias de los terremotos de 2010 y 2011, en Chile y Japón, respectivamente.

Dentro de las principales conclusiones de dicho informe, se señala que:

“La información disponible hoy muestra que, no obstante, la preocupación generada a raíz del terremoto de Thoku en Japón, las conclusiones de los informes de 2007 y 2010 continúan vigentes. Esto es, que, a nivel internacional, la Generación Nucleoeléctrica es:

- **Segura**, al ser la tecnología de menor accidentabilidad a igual potencia generada.
- **Sostenible**, al ser la tecnología de menor impacto ambiental en su operación y una huella de CO₂ comparable a la generación eólica y fotovoltaica.
- **Confiable**, al presentar altos factores de planta y estabilidad de precio, sin limitaciones de recursos naturales disponibles en el largo plazo; y
- **Competitiva**, al mostrar costos nivelados de generación comparables al GNL y carbón”.

Este informe también afirma que, a enero de 2010, el país ya contaba con los antecedentes requeridos para generar una discusión informada, conducente a tomar una decisión, pero que “en los cinco años transcurridos desde entonces no se ha generado tal discusión ni tampoco se ha avanzado en el cierre de brechas. Por el contrario, Chile pareciera estar hoy más lejos de tomar alguna decisión respecto de un PNP”.

Se señala también que “En nuestro país la falta de conocimiento limita la libertad para tomar una decisión amplia, informada y responsable sobre esta materia”. Asimismo, que “La decisión sobre incorporar la GNE debe ser el resultado de un proceso transparente y democrático, basado en una política explícita, clara y fundada que se haga cargo de la responsabilidad de estado de mantener todas las opciones técnicas abiertas en su planificación energética estratégica de largo plazo”.

21 Grupo Consultivo Nuclear. *Núcleo-electricidad en Chile: Posibilidades, brechas y desafíos*, 2010.

El informe otorga una serie de recomendaciones que permitirían retomar la hoja de ruta que quedó suspendida en 2010, entre las que se encuentran: incluir la opción nuclear dentro de la agenda energética prospectiva de largo plazo, la creación de una instancia independiente de evaluación, adecuar la CCHEN a nivel institucional, fomentar la educación y difusión sobre la energía nuclear, promover la investigación en ciencias nucleares y aplicaciones, y efectuar diversos estudios orientados al cierre de brechas.

4. “INFORME RECOPIULATORIO 2016 - 2018”: Contexto de la Política Energética 2050 (Comisión Chilena de Energía Nuclear, 2019)

En 2015, el Ministerio de Energía presentó el documento **Política Energética 2050**, que contiene la visión del sector energético al 2050 para el país. Dicha política establece que:

“La Agencia Internacional de Energía suscribe que la energía nuclear puede jugar un rol clave para la reducción de emisiones de CO₂. En el caso chileno, a pesar que la Política Energética no descarta a priori ninguna tecnología de generación, la energía nuclear de potencia no ha sido incluida como una opción a corto plazo pues requiere de estudios en aspectos claves, como la viabilidad económica de largo plazo ante distintas condiciones legales y de mercado, los ajustes legales e institucionales requeridos, entre otros. Estos estudios deben ser dirigidos desde la Comisión Chilena de Energía Nuclear convocando a los organismos nacionales competentes. Dado esto, se establece que, en el próximo proceso de evaluación de la Política Energética de largo plazo, se revise la conveniencia de incorporar esta tecnología a la matriz de generación eléctrica”.

CCHEN, tras recibir este mandato, realizó una revisión de los estudios anteriores, las brechas detectadas y sus recomendaciones. Asimismo, se tomó en cuenta el contexto nacional actual, representado principalmente por los pilares de la Política Energética, así como las guías del OIEA, y la información disponible de la industria, a nivel internacional. Con ello, se detectaron algunas áreas que aún requerían análisis, profundización o actualización, y que constituyen temas relevantes para una conversación sobre la matriz energética en la etapa en que se encuentra el país actualmente.

Para abordar esas áreas, la CCHEN efectuó los siguientes estudios:

- **Consideraciones para el emplazamiento de una Central Nuclear de Potencia (CNP) en Chile (2018).**
- **Identificación de los posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile (2018).**
- **Identificación de barreras institucionales, regulatorias y de mercado asociadas al desarrollo de la nucleoelectricidad en el mercado eléctrico chileno (2018).**
- **Modelo y estimación de costos para la implantación de una central nuclear en Chile (2017).**
- **Consideraciones necesarias para la implementación segura de un Programa Nuclear de Potencia en Chile (2017), que incluye:**
 - **Estudio sobre el estado del arte de la Industria Nuclear en términos de seguridad (2017).**
 - **Estudio para identificar las brechas nacionales y propuesta de acciones en materia de seguridad (2017).**

Estos estudios fueron realizados tanto con recursos internos CCHEN como con el apoyo de entidades externas nacionales e internacionales. Adicionalmente, se realizaron ejercicios de modelación de la eventual participación de la energía nuclear en la matriz energética nacional, a través de un trabajo conjunto con el Ministerio de Energía.

En este informe se presenta un análisis del estado de las consideraciones más relevantes para un programa nuclear, a través de una síntesis de estos estudios, complementados con información de organismos referentes internacionales, así como con datos obtenidos directamente de expertos internacionales a través de asistencia a cursos, reuniones y conferencias.

3. REVISIÓN DE TEMÁTICAS RELEVANTES

3.1. Aspectos habilitantes para la implementación de un Programa Nuclear de Potencia

3.1.1. Posición nacional

El desarrollo de un PNP implica un compromiso país de largo plazo²², que debe traspasar las distintas administraciones de gobierno y subsistir a los vaivenes políticos que un país pueda enfrentar. Se trata de un compromiso de Estado, de carácter “intergeneracional”, y que debe contar con el suficiente apoyo político y ciudadano para ser llevado a cabo de forma exitosa.

Esto constituye el sustento base y punto de partida para avanzar en la evaluación y desarrollo de la infraestructura nacional requerida para la construcción, operación y cierre de una central nuclear, lo que incluirá aspectos de seguridad, económicos, recursos humanos, regulación, medioambientales y tecnológicos, entre otros.

Este compromiso se establece a través de una “posición nacional” frente al uso de la energía nuclear de potencia, la que puede ser declarada en la política energética, en un “White Paper”, o a través de otro tipo de declaración que haya sido alcanzada a través de un acuerdo o discusión nacional.

Esa posición nacional se puede traducir, asimismo, en el establecimiento de políticas, estrategias, normativas u otro tipo de acciones que aseguren la adecuada implementación del PNP, todo lo cual debe contar con los recursos humanos y financieros adecuados. Esto proporcionará, además, las condiciones para avanzar hacia potenciales convenios, contratos y financiamiento, a nivel internacional, al proporcionar señales de confianza de que existe una estabilidad de la decisión y que el proyecto podrá ser llevado a cabo en su totalidad. Esto resulta particularmente relevante para este tipo de proyectos, riesgosos desde el punto de vista financiero, dada la experiencia previa de proyectos cancelados por un cambio de decisión del gobierno²³.

En las etapas iniciales del proceso de evaluación, cuando aún no existe una decisión sobre la implementación de un PNP, igualmente se requiere una declaración o compromiso del gobierno, sobre incluir la opción nuclear dentro de las alternativas energéticas a ser evaluadas. Esto implica la asignación de recursos humanos y financieros.

Para avanzar en este proceso de decisión, el OIEA recomienda la formación de una “NEPIO” (Nuclear Energy Programme Implementing Organization), organización que debe dirigir y llevar a cabo el proceso de evaluación y, eventualmente, desarrollo de la infraestructura nacional que permita la adecuada implementación de un PNP. Esta NEPIO debe estar ubicada al más alto nivel, contar con suficientes recursos financieros y humanos, y ser reconocida por todas las instituciones gubernamentales como la instancia encargada para este fin.

Como ya se ha mencionado anteriormente, Chile establece en su Política Energética 2050 que “la energía nuclear de potencia no ha sido incluida como una opción a corto plazo pues requiere de estudios en aspectos clave, como la viabilidad económica de largo plazo ante distintas condiciones legales y de mercado, los ajustes legales e institucionales requeridos, entre otros.” Es decir, el país no cuenta, actualmente, con una decisión sobre incluir a la energía nuclear dentro de las opciones energéticas para el país.

²² Los proyectos nucleares abarcan largos períodos de tiempo que pueden llegar a ser de 100 años.

²³ Por ejemplo, central nuclear de Bataan (Filipinas) fue construida en su totalidad, pero nunca llegó a operar, debido a la decisión de la nueva administración de gobierno.

3.1.2. Aceptación pública

La aceptación pública constituye uno de los aspectos más relevantes a la hora de considerar la implementación de un PNP. La experiencia demuestra que resulta muy difícil llevar adelante un proyecto nuclear si existe una oposición mayoritaria de la ciudadanía a esta opción.

Un ejemplo es la central nuclear de Zarnowiec (Polonia), un proyecto de cuatro (4) reactores que inició su construcción en 1982. Tras el accidente de Chernobyl (1986), la opinión ciudadana se tornó mayoritaria y activamente en contra de este, lo que forzó la detención del proyecto y finalmente la cancelación definitiva del programa nuclear, aun cuando presentaba más del 50% de avance y ya se habían adquirido la mayoría de los equipos y componentes, incluyendo la vasija del reactor, turbinas y generadores. Hoy Polonia avanza nuevamente hacia la implementación de un PNP, que incluye seis reactores nucleares, pero esta vez, con una posición de la ciudadanía en su mayoría favorable y con apoyo de los distintos sectores políticos²⁴.

Un caso similar lo constituye la planta de Zwentendorf (Austria), cuya construcción comenzó en 1972, pero recién en 1976, dos (2) años antes de la entrada en operación, se inició un programa de gobierno para informar a la ciudadanía respecto al mismo. Esto derivó en la realización de un referéndum en 1978, donde el 50,5% de la población votó en contra de tener energía nuclear de potencia, tras lo cual el proyecto fue desechado, quedando el país con una central completamente terminada, pero que nunca entró en operación.

Esto refuerza la idea de que, únicamente, si la primera barrera de cualquier programa nuclear ha sido superada es posible proceder a su desarrollo. Esto es, la existencia de un consenso nacional de aceptación pública, alineada con una voluntad política de desarrollar un PNP en el país.

Sin embargo, para que la ciudadanía pueda participar en el proceso de decisión, resulta vital que esta esté informada sobre las características, requerimientos e implicancias de la introducción de un PNP en el país. Por eso, se requiere un rol activo por parte del gobierno para implementar programas de información y educación en temas relacionados a energía nuclear y energía en general, así como también generar e impulsar espacios de discusión y participación de la sociedad civil en su conjunto. Esto es vital para el desarrollo y estabilidad del proceso.

Del mismo modo, si se logra consenso social que permita avanzar hacia la implementación de un programa nuclear, se requerirá el establecimiento de un programa de comunicación, difusión y participación ciudadana, a nivel local y nacional, respecto al proyecto en particular, el que debe darse desde las etapas tempranas del proyecto y durante todo su ciclo.

Con respecto a la situación nacional, en Chile se han realizado estudios en materia de opinión pública²⁵, que arrojan una posición mayoritariamente negativa respecto a la energía nuclear, muchas veces basadas en preconceptos y paradigmas, así como en concepciones erradas y falta de información. Sin embargo, también se observa disposición de la ciudadanía a conocer más del tema, reforzando la necesidad de información e interacción desde las instituciones técnicamente pertinentes.

En Chile, actualmente, no existe un plan de comunicaciones o de educación que busque cerrar las brechas de conocimiento en la materia, como ha sido recomendado en informes anteriores²⁶. De igual modo, si bien en el país ya existen políticas gubernamentales de participación ciudadana, ante la implementación de un PNP, se requeriría un nivel de desarrollo de las mismas que el país aún no ha alcanzado.

24 Última encuesta año 2017 arrojó 59% de apoyo ciudadano (World Nuclear Association, <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/poland.aspx>)

25 Tiróni (2009), Mori-Extend (2016).

26 Comité de Energía Nuclear de Potencia, *Generación nucleoelectrónica en Chile: Hacia una decisión racional* - Grupo Consultivo Nuclear (2010). *Nucleoelectricidad en Chile: Posibilidades, Brechas y Desafíos*, 2015.

3.2. Tecnologías Nucleares de Potencia

A lo largo de sus más de cinco (5) décadas de existencia, la industria nuclear ha ido desarrollando y mejorando su tecnología, distinguiéndose varias “Generaciones” de reactores.

Como se aprecia en la figura 4, los reactores de la Generación I se desarrollaron en los años 1950-60, el último de los cuales terminó su operación en Reino Unido en 2015. Los reactores de la Generación II corresponden a los reactores construidos y operados a partir de la década de los 70 y 80, los cuales en su mayoría se encuentran aún en operación en diversos países. Las generaciones III (y III +) son los llamados “reactores avanzados”, que se encuentran actualmente en construcción y algunos, incluso, ya en operación. Los diseños de la Generación IV todavía están en etapa de desarrollo y no estarán operativos antes de la próxima década.

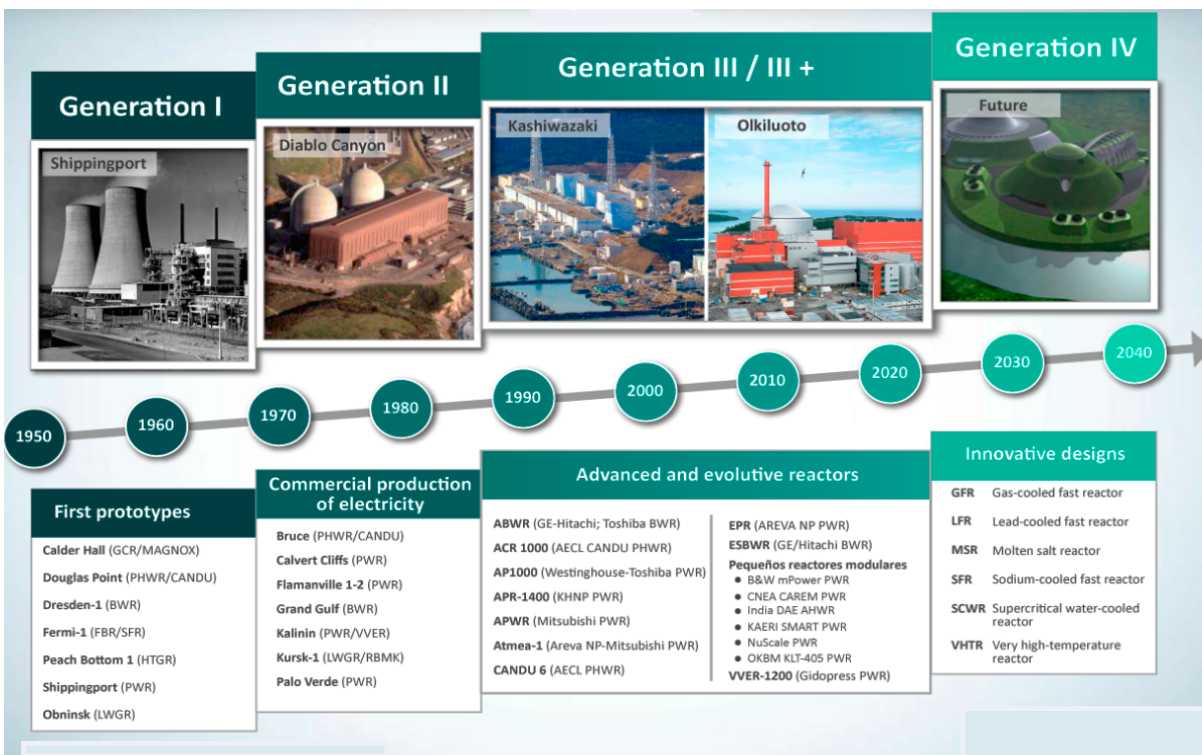


Figura 4: evolución generacional de las tecnologías nucleares de potencia.

Fuente: Foro Nuclear, Gen IV International Forum (2018).

3.2.1. Diferencias entre generaciones

Aunque la distinción de las generaciones II y III/III+ no es precisa, esta se da, principalmente, por el salto tecnológico en las medidas de seguridad. Los reactores de la Generación II fueron originalmente diseñados con sistemas de seguridad “activos”, esto es, que requieren de energía o de acciones externas para operar. Sin embargo, los reactores que hoy están en construcción (Gen III/III+) cuentan con mejoras sustanciales en este aspecto, introduciendo los llamados sistemas “pasivos”.

Los sistemas “pasivos” utilizan mecanismos como convección natural, conducción, radiación de calor, o gravedad, para que, en caso de pérdida total de suministro exterior de electricidad, el reactor pueda mantenerse enfriando en forma autónoma mediante estos fenómenos físicos, sin la necesidad de depender de baterías, generadores de respaldo, ni de intervención de un operador.

Algunos diseños estiman que pueden mantener refrigerado el núcleo del reactor por un periodo de hasta de 30 días²⁷, o incluso, por un período ilimitado de tiempo²⁸, lo que constituye un incremento sustancial en las condiciones de seguridad de las centrales nucleares conocidas hasta hoy²⁹.

A continuación, se listan los principales mecanismos de seguridad que, dependiendo del diseño, se han implementado:

- Uso de refrigerantes más seguros, poco reactivos con el ambiente, y con alta capacidad de extraer calor del núcleo (alta conductividad térmica), dependiendo del tipo de diseño.
- Múltiples mecanismos de extracción pasiva de calor (convección natural), que consisten en la conducción de calor desde el combustible hacia la vasija.
- Mecanismos pasivos de control, como aprovechar de montar barras de control sostenidas por fuerzas de boyantes (barras flotan) en el refrigerante.

La gran mayoría de los reactores actuales en operación, ya sea de las generaciones II o III, presentan una combinación de mecanismos “activos” y “pasivos”.

3.2.2. Reactores Modulares Pequeños SMR (Small Modular Reactors)

Como parte de las nuevas tecnologías en desarrollo, las que se proyectan más cercanas a su implementación, están los llamados Small Modular Reactors, SMR (o Reactores Modulares Pequeños). El OIEA define como “reactor pequeño” a aquellos que poseen una potencia inferior a 300 MWe, y como “medio” a los reactores que cuentan con una potencia de hasta aproximadamente 700 MWe. Estos reactores pueden ser construidos como una sola unidad o como módulos que se van agregando para constituir un complejo más grande, dado que cuentan con la capacidad añadida de crecer de forma incremental, según se requiera.

La construcción modular de unidades SMR tiene la ventaja de ser compatible con redes eléctricas más pequeñas, al tiempo que resulta más amigable desde el punto de vista financiero al requerir una menor inversión inicial, o que puede ser espaciada y planificada en el tiempo, a diferencia de las grandes unidades que requieren una alta inversión inicial, cuyo costo y riesgo a menudo rivaliza con la capitalización de las empresas involucradas.

La proyección de estos reactores permitiría alcanzar economías de escala debido a los volúmenes estimados, posibilitando economías de producción en serie. Asimismo, se estima una considerable reducción en los tiempos de construcción y una simplificación importante en la complejidad de gestión los proyectos.

Actualmente, ya se encuentran en construcción prototipos de reactores SMR en China, Argentina y Rusia, entre otros.

3.2.3. Generación IV³⁰

Los reactores de IV Generación, tanto a gran escala como modulares, corresponden a reactores innovativos que se diseñaron pensando en la ocurrencia de un eventual accidente crítico, por lo que la base de todo el diseño es eliminar daños al núcleo.

27 OIEA, *NuScale Power Modular and Scalable Reactor*, 2013.

28 Testimony of NuScale Power before the House Committee on Energy and Commerce Subcommittee on Energy (Marzo, 2020).

<https://docs.house.gov/meetings/IF/IF03/20200303/110640/HHRG-116-IF03-Wstate-HopkinsJ-20200303.pdf>

29 10^{-7} (eventos por reactor-año) frente a valores del orden de 10^{-5} de los reactores de Generación II. (American Academy of Arts & Sciences. Stephen M. Goldberg and Robert Rosner. *Nuclear Reactors: Generation to Generation*. 2011.)

30 Para información detallada de los diseños en desarrollo y sus características, revisar informe “Revisión de las nuevas tecnologías nucleares de potencia - Ventajas comparativas y Desafíos tecnológicos”, Comisión Chilena de Energía Nuclear.

Estos diseños buscan mejorar el desempeño en base a las lecciones aprendidas y a metas propuestas por el “Foro Internacional de Reactores de IV Generación”³¹, las que corresponden a:

- Proveer energía en forma sustentable, sin generación de emisiones de gases de efecto invernadero y además logrando un uso más eficiente del combustible.
- Reducir la cantidad de desechos nucleares y acortar el tiempo en que estos reducen su actividad.
- Tener una ventaja competitiva frente a otras fuentes de energía.
- Presentar un nivel de riesgo financiero similar a otros proyectos energéticos.
- Mantener niveles de seguridad y confiabilidad muy altos.
- Poseer una baja probabilidad de daño al núcleo.
- No necesitar de la respuesta de un agente externo en caso de emergencia.
- Ser poco atractivo como camino para desarrollar armamento nuclear.

Con estos objetivos en mente, expertos evaluaron 130 conceptos de reactores para luego seleccionar seis tecnologías de reactores para una mayor investigación y desarrollo. Estos incluyen: Reactor rápido refrigerado por gas (GFR), Reactor rápido refrigerado por plomo (LFR), Reactor de sal fundida (MSR), Reactor refrigerado por agua supercrítico (SCWR), Reactor rápido refrigerado por sodio (SFR) y Reactor de Muy Alta Temperatura (VHTR).

Estos nuevos reactores permiten reducir la necesidad de toma de decisiones críticas por parte de los operadores y apuestan a una reducción importante en la probabilidad de ocurrencia de todo tipo de incidentes o accidentes. Para ello, se integra de forma fundamental el uso de tecnologías pasivas que permiten mantener los reactores en condiciones nominales por varios días, en caso de alguna emergencia. Esto significa que, en caso de un evento, el reactor, por diseño, se encarga de apagarse y extraer el calor residual, por períodos que van desde varios días hasta semanas o, incluso, más.

Otro de los focos principales de los reactores de IV Generación es lograr un uso más eficiente y sustentable del combustible nuclear. Para ello, se está estudiando el uso de nuevas opciones de combustible, como el torio, o el desarrollo de reactores rápidos³², los cuales aprovechan los desechos de los reactores convencionales. Por ejemplo, el reactor de onda viajera (TWR, Travelling Wave Reactor), reactor rápido refrigerado por sodio líquido (inerte con los materiales y de alta capacidad calorífica) utiliza uranio empobrecido³³ como combustible. Así, se pueden extender las reservas de uranio por más años y, a la vez, reducir la cantidad y actividad de los desechos, con lo cual finalmente se tendrá una menor cantidad de desechos nucleares que manejar.

Todo esto simplificará el ciclo de combustible nuclear, reduciendo la necesidad de minería de uranio, de instalaciones de almacenamiento de combustible gastado y, eventualmente, eliminar la necesidad de instalaciones de enriquecimiento y plantas de reprocesamiento de combustible nuclear.

Otro aspecto relevante son las distintas alternativas de refrigeración de los reactores propuestos, tal como se muestra en el gráfico 8. Existe una tendencia a utilizar refrigerantes con capacidades térmicas que mejoran algunos parámetros del agua, como la conductividad térmica o el punto de ebullición. El calor específico del agua es difícil de superar por ser particularmente alto dentro de la naturaleza, pero esto se compensa con una mejor conducción de calor y con puntos mayores de ebullición, mejorando así la capacidad de extraer calor del núcleo y aumentando los márgenes de seguridad de la operación del reactor.

31 El Foro es un esfuerzo internacional cooperativo que se creó para llevar a cabo la investigación y los desarrollo necesarios para establecer la viabilidad y capacidades de rendimiento de los sistemas de energía nuclear de próxima generación. <https://www.gen-4.org/gif/>

32 En este tipo de reactores no existe el elemento moderador para los neutrones, y por tanto el flujo de neutrones cae en la zona de los neutrones rápidos (alta energía). A este tipo de reactores también se los conoce como reactores reproductores, y permiten obtener un mejor aprovechamiento de los recursos existentes de uranio. <https://www.fornuclear.org/es/energia-nuclear/faqas-sobre-energia/capitulo-8/115746-110-ique-es-un-reactor-rapido>

33 Se denomina “uranio empobrecido” a aquel que contiene una fracción de isótopo U-235 inferior a la natural (0,71%).

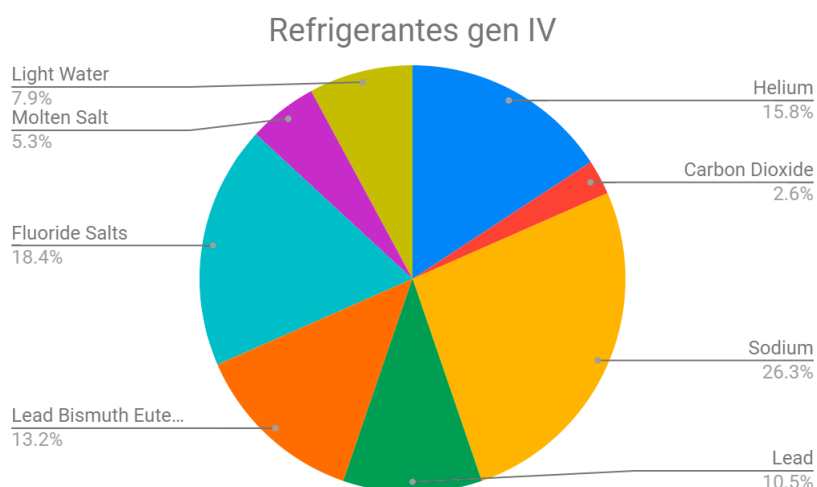


Gráfico 8: refrigerantes reactores IV Generación. Fuente: elaboración propia con datos del Gen IV International Forum GIF (2018).

En el gráfico 9 se observa la distribución de temperaturas para los distintos modelos de reactores propuestos. Asimismo, las altas temperaturas de salida del refrigerante permiten realizar otras aplicaciones complementarias a la generación nucleoelectrónica, como las siguientes:

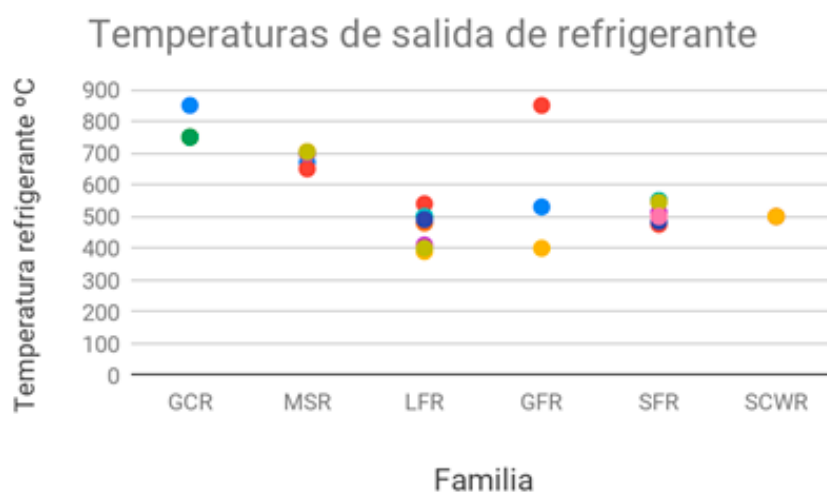


Gráfico 9: temperaturas de salida de refrigerante según familia. Fuente: elaboración propia con datos del Gen IV International Forum GIF (2018).

3.2.4. Aplicaciones

Un reactor nuclear de potencia, tal como las centrales termoeléctricas, puede ofrecer servicios de cogeneración, lo que consiste en la obtención de forma simultánea de energía eléctrica y energía térmica útil (vapor, agua caliente sanitaria, procesos de desalinización, etc.). En este sentido, los reactores SMR podrían representar una ventaja por el hecho de ser más flexibles en su emplazamiento, lo que permitiría proporcionar este tipo de servicios tanto a zonas aisladas como también la posibilidad de ubicarse en lugares más cercanos al consumo, reduciendo, por ejemplo, el costo de transmisión del agua desalinizada hacia los puntos que lo requieran.

Asimismo, algunos diseños de reactores de Generación IV logran alcanzar mayores temperaturas en el refrigerante (extraen mayor calor del núcleo para generación de vapor), lo que convierte la producción de hidrógeno en una opción atractiva de explorar, dada la mejora en la eficiencia

termodinámica del proceso. La producción a gran escala de este recurso podría abrir las puertas a usos industriales como combustible libre de emisiones, lo que resultaría atractivo para industrias que se vean penalizadas por las mismas.

Si bien, prácticamente, todos los reactores podrían producir hidrógeno, solo los MSR y los reactores refrigerados por gas (GCR y GFR) pueden lograr hacer los ciclos de mayor eficiencia de producción de hidrógeno. De esa forma, se podrían suplir más necesidades que solo la eléctrica para los hogares o industrias.

3.2.5. Flexibilidad de operación

Dado que aún no están disponibles en el mercado los reactores SMR, no se puede evidenciar su comportamiento dentro del sistema eléctrico, ni estudiar su respuesta ante alguna perturbación o transitorio³⁴ del sistema. Sin embargo, existe variada documentación que respalda la flexibilidad³⁵ que un reactor SMR tipo PWR puede alcanzar³⁶. Por ejemplo, la naturaleza modular de los diseños SMR permite variar la producción de la planta, pudiendo:

1. conectar y desconectar uno o más módulos durante períodos prolongados de entrada o salida de generación eólica
2. ajustar la potencia del reactor para uno o más módulos durante períodos intermedios para compensar los cambios por hora en la generación eólica, o
3. evitando el paso del vapor a través de la turbina para respuestas rápidas a las variaciones de la generación eólica. Si bien en teoría esto sería técnicamente posible, queda aún pendiente el ver cómo repercutirá esto en la rentabilidad de la central y si este modo de operación flexible permite que esta sea viable económicamente.

Adicionalmente, algunos diseños SMR podrían también cumplir roles relacionados con resiliencia y seguridad de suministro, al no requerir estar conectados a una red eléctrica ya que un solo módulo puede suministrar toda la carga que necesita la planta para operar desconectada de la red. Estos reactores estarían entre los primeros generadores en reiniciarse por sí solos ante una emergencia y podrían sostener cargas críticas durante períodos prolongados si se extendiera el tiempo de recuperación.

La capacidad de operar sin electricidad externa resulta de importancia porque los reactores nucleares actualmente en servicio, por motivos de seguridad, deben apagarse si se pierde totalmente la alimentación de la red eléctrica externa, y no pueden reiniciarse hasta que la red esté operativa.

Las características especiales de estos nuevos diseños permitirán que el reactor continúe funcionando incluso si las líneas de transmisión quedan fuera de servicio. Asimismo, si una planta que comprende varias unidades SMR se apaga, esta podría iniciarse independientemente de la red y ayudar así a restablecer las operaciones normales de la red.

Todas estas características, sin embargo, deberán ser comprobadas cuando los primeros de estos reactores de potencia comiencen a entrar en operación.

3.2.6. Desafíos pendientes

Dentro de las barreras principales que tienen las nuevas tecnologías frente a una implementación a corto plazo, está la maduración y certificación de los nuevos conceptos. Al ser propuestas con innovaciones significativas a la tecnología convencional, existen múltiples aristas que deben ser revisadas y certificadas para poder llevar los diseños de IV Generación al mercado.

³⁴ En una central nuclear, cualquier variación significativa sobre su valor nominal estable de uno o más parámetros importantes de operación: temperaturas y presiones en diversos puntos del sistema, potencia, caudal de refrigerante, etc.
³⁵ Ingersoll, D.T., Colbert, C., Houghton, Z., Snuggerud, R., Gaston, J.W., & Empey, M. (2015). Can nuclear power and renewable energies be friends?

³⁶ Existen SMR de varios tipos, incluyendo los de tipo PWR.

Para validar los nuevos conceptos, se debe seguir investigando y experimentando en todas las ciencias correspondientes (ciencia de materiales, termodinámica, combustible, reprocesamiento, física, etc.) y avanzar en los procesos de evaluación y certificación de los modelos por parte de los organismos reguladores.

3.3. Aspectos de seguridad nuclear

3.3.1. Cómo se ha incorporado la experiencia de los accidentes

El término “seguridad nuclear” hace referencia a la protección de las personas y al medio ambiente contra los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes. Si bien los accidentes ocurridos han tenido repercusiones y han generado un gran temor en la sociedad, estos han sido ampliamente estudiados y discutidos generando cambios y actualizaciones en diversos ámbitos de la industria nuclear, lo que ha contribuido a introducir mejoras sustanciales en las prácticas y en los estándares de seguridad de las centrales nucleares.

Si bien los tres eventos más relevantes a escala global han sido Three Mile Island, Chernobyl y Fukushima, existen otros incidentes de menor escala que han contribuido a detectar oportunidades de mejora y a generar cambios en la industria.

El informe “Estudio sobre el Estado del Arte de la Industria Nuclear en términos de Seguridad” (IDOM - CCHEN 2017), realiza un análisis de cada uno de estos eventos, abordando las causas raíz que motivaron los sucesos, la evaluación de las vulneraciones, debilidades y fallos en los principios de la seguridad nuclear, y la identificación de las distintas medidas implementadas después de los eventos para fortalecer la industria e impedir la recurrencia futura de eventos similares.

En síntesis, el estudio señala que los principales cambios con respecto a la seguridad de las centrales nucleares corresponden a:

- Reevaluación de las vulnerabilidades de las centrales nucleares de potencia respecto a eventos externos extremos y de muy baja ocurrencia, con potencial afectación a varias unidades en un mismo emplazamiento, y evaluación del margen disponible para hacer frente a estos eventos, respecto a aquello considerado en las bases de diseño originales. En el caso europeo, estas reevaluaciones fueron denominadas Stress Test, o Pruebas de Resistencia.
- Mejora de las capacidades para refrigerar el núcleo del reactor y las piscinas de combustible gastado, en caso de eventos de pérdida total de alimentación eléctrica conocido como Station Blackout (SBO). Las piscinas de combustible gastado han resultado ser uno de los puntos de atención más relevantes, debido a su fragilidad frente a eventos sísmicos como el ocurrido en Fukushima Daiichi NPP.
- Los sistemas de seguridad deben ser intrínsecamente seguros, siendo capaces de hacer frente a ciertos transitorios sin la intervención del operador. Esto es, que los reactores cuenten con capacidad para reaccionar automáticamente ante cualquier cambio o alteración en los parámetros de operación.
- Importancia de contar con análisis de seguridad (probabilista y determinista) detallados y en profundidad, para contemplar todo el espectro de posibilidades, y estos deben contar con revisiones técnicas realizadas por organismos independientes.
- Generación de nuevos procedimientos de operación y de emergencia. Los procedimientos de operación deben estar basados en síntomas, sin la necesidad de que el operador realice ningún diagnóstico de la situación. Así, se minimiza el potencial error humano del operador.
- Instauración de una Cultura de Seguridad en materia nuclear, tanto a nivel nacional como a nivel local, considerando nivel legislativo, regulatorio, de los titulares de las instalaciones, incluyendo a supervisores y operadores. La seguridad es siempre la prioridad frente a la producción.
- Organismo regulador nuclear efectivo y completamente independiente. Se debe asegurar independencia y autoridad del organismo regulador nuclear, para evitar conflictos de interés, de asignación de responsabilidades o problemas con otras instituciones del Estado. Esto resulta

fundamental para prevenir y manejar adecuadamente accidentes, tal como lo ocurrido en Fukushima-Daiichi. “En la época del accidente, la regulación de la seguridad nuclear en Japón estaba a cargo de varias organizaciones con diferentes funciones y responsabilidades y con interrelaciones complejas. No estaba totalmente claro cuáles de ellas tenían la responsabilidad y la autoridad de emitir instrucciones vinculantes sobre cómo responder sin demora a las cuestiones de seguridad”³⁷.

3.3.2. Avances en el diseño para la seguridad nuclear

Como ya se mencionó en capítulos anteriores, uno de los avances significativos en el diseño de las nuevas centrales nucleares de potencia corresponde el concepto de “seguridad pasiva”, lo que representa una mejora sustancial en la seguridad de las centrales.

Otras mejoras implementadas en el ámbito de seguridad es la adopción de las lecciones aprendidas y la evolución natural de la tecnología y la industria nuclear, en términos de sistemas “redundantes, variados y separados”, como refuerzo a la defensa en profundidad. Estas incluyen, pero no se limitan a: múltiples bombas de refrigerante, mecanismos activos de manejo de reactividad del núcleo, edificios de contención resistentes a ataques terroristas o aviones, entre otras.

3.3.3. Otras áreas reforzadas

El estudio de IDOM también señala que no solo la industria nuclear ha experimentado evolución en el tema de seguridad, sino que también se han reforzado y creado instituciones y organismos técnicos para fomentar y mantener una cooperación internacional e intercambio de información y para compartir experiencia operativa.

Con este fin, se han creado organismos como la WANO (World Association of Nuclear Operators) en 1986, o WENRA (Western European Nuclear Regulators Association) en 1999, entidad que permitió agrupar a los cuerpos reguladores de la Unión Europea y de Suiza, para iniciar una cooperación entre ellos. La creación de ambos organismos tuvo como objetivo lograr una armonización de los estándares de seguridad nuclear, tanto a nivel europeo como global.

Tras el accidente de Fukushima, hubo importantes repercusiones a escala global sobre la seguridad nuclear, en todos los ámbitos, prestando especial atención a causas de origen externo (tsunamis, inundaciones, entre otros). Por ello, en relación a la Seguridad Operacional, esta se reforzó con medidas para enfrentar y gestionar accidentes severos.

Algunas medidas corresponden a: **mejora de las guías de accidente severo** (incluyendo equipos, procedimientos y entrenamiento), **creación de centros de emergencia** en las centrales nucleares, **dotación de equipos portátiles** para inyectar agua y equipamiento suficiente para hacer frente a un accidente severo, y la **creación de centros de emergencia generales centralizados**, para hacer frente a una emergencia en cualquiera de las centrales.

3.3.4. Experiencia operacional con terremotos

Actualmente, cerca del 20% de los reactores nucleares del mundo, se ubican en zonas con una sismicidad importante, por lo que las centrales de energía nuclear de potencia se diseñan de acuerdo a los requerimientos específicos que le permitan soportar la actividad sísmica³⁸ a la que estaría potencialmente expuesta. Por ejemplo, en Francia son diseñadas para soportar terremotos mayores a los calculados para un periodo de 1.000 años, para cada uno de los sitios escogidos³⁹.

37 IDOM-CCHEN, *Estudio sobre el Estado del Arte de la Industria Nuclear en términos de Seguridad*. 2017.

38 World Nuclear Association, *Nuclear Power Plants and Earthquakes*, 2018.

39 World Nuclear Association, *Nuclear Power Plants and Earthquakes*, 2018.

Una instalación de tipo nuclear ubicada en una zona de alta actividad sísmica será igualmente segura que una ubicada en una zona menos sísmica, siempre y cuando ambas sean diseñadas de acuerdo al nivel de riesgo requerido. La diferencia se reflejará, principalmente, en los costos de diseño y construcción de la central.

Cabe mencionar que el accidente ocurrido en Fukushima no se debió al sismo en sí mismo, sino que a la destrucción de los sistemas eléctricos de alimentación y de los equipos de respaldo, dedicados a enfriar el núcleo del reactor, provocado por el tsunami⁴⁰. Esto se aprecia también en el caso de la central nuclear de Onagawa, la que a pesar de estar más cercana al epicentro del terremoto de Japón de 2011, no tuvo ninguna dificultad en mantener segura la central, debido, en parte, a la correcta gestión de la seguridad de los sistemas de la central y al correcto diseño de la misma.

En este contexto, el estudio efectuado por IDOM analizó en detalle una serie de eventos sísmicos ocurridos a lo largo de la historia en emplazamientos que cuentan con centrales nucleares, para determinar cuál ha sido la afectación del sismo sobre la seguridad de las centrales.

Tras la revisión de estos eventos, el estudio concluye que:

“No ha habido ningún sismo registrado de cierta magnitud (ni de altas intensidades), ni cuando las aceleraciones que éste ha provocado han sido mayores que las aceleraciones previstas en el diseño, el cual haya comprometido o afectado la seguridad de las centrales nucleares, en ninguna de las barreras físicas establecidas en la defensa en profundidad, ni en ninguna de las funciones fundamentales de seguridad”.

Esto significa que los eventos sísmicos no han perjudicado ni comprometido ninguno de los sistemas de seguridad que los diseños de las centrales han previsto, por lo tanto, ningún accidente nuclear ha ocurrido por causa directa de un sismo a lo largo de la historia. Esta conclusión es relevante, ya que implica que no ha habido relación entre los eventos sísmicos y la falla de los sistemas de seguridad de los reactores, a la vez que estos han demostrado robustez en su diseño para resistir grandes eventos sísmicos.

3.3.5. Estado de la infraestructura de seguridad en Chile

Una de las principales preocupaciones respecto a la implementación de un proyecto nuclear de potencia en el país es la alta sismicidad del territorio. Sin embargo, tal como se ha mencionado, históricamente, la variable sísmica no ha afectado ninguna de las barreras físicas establecidas en la defensa en profundidad, ni en ninguna de las funciones fundamentales de seguridad de los reactores nucleares de potencia que existen en el mundo.

El estudio **“Estado del Arte de la Industria Nuclear en términos de Seguridad”** evaluó las condiciones de seguridad del país para un programa nuclear y concluyó lo siguiente:

“Aún incluso en zonas altamente sísmicas como puede ser Chile, el diseño, la construcción y la operación segura de centrales nucleares es plenamente posible, teniendo en cuenta los criterios tecnológicos adecuados a este factor, como por ejemplo contar con la información de fallas sismológicas y estudios de mecánica de suelos en el emplazamiento, así como una selección adecuada del emplazamiento. Además, Chile es un país con experiencia respecto al diseño sísmico, y cuenta con normativa específica para ello.”

40 OIEA, *El accidente de Fukushima Daiichi*, Informe del Director General, 2015.

Asimismo, el estudio **Generación Núcleo-Eléctrica en Chile: Hacia una Decisión Racional** indica que *“En nuestro país existe una vasta y exitosa experiencia en diseño sísmo-resistente. En el caso de instalaciones industriales, se aplica la norma NCh2369:2003, basada en el principio de “continuidad de operación”, es decir, en el caso de centrales generadoras de energía eléctrica, por ejemplo, éstas deben seguir operando luego de un sismo excepcionalmente severo”*.

En este sentido, Chile dispone ya de una extensa y robusta normativa de diseño sísmico para el diseño de infraestructura con aislación sísmica y disipación de energía, construcción de estructuras en zonas susceptibles de inundación por tsunamis o seiches⁴¹, y diseño sísmico de componentes y sistemas no estructurales, a través de varias normas que se han ido actualizando en el tiempo, como son:

- NCh433: 96 Mod. 2009/DS 61, de “Diseño Sísmico de Edificios”,
- NCh430: 2008 / DS 60, de “Hormigón armado - Requisitos de diseño y cálculo”.
- NCh2369: 2003, de “Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales”
- NCh2745: 2013, de “Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica”.

Este diseño ha demostrado ser eficaz, como quedó manifestado, por ejemplo, en las centrales eléctricas de Tocopilla, cuando después del sismo de magnitud 7,7MW ocurrido en 2007, estas continuaron operando, o en 2010 cuando Metro de Santiago continuó con su operación a las pocas horas del movimiento registrado como consecuencia del sismo⁴².

No obstante, el país aún tiene oportunidades de mejora en otros aspectos relacionados con la seguridad, si se desea avanzar hacia la construcción de la infraestructura nacional requerida para la implementación segura de un PNP. El estudio de IDOM recomienda lo siguiente:

- El desarrollo y capacitación de los recursos humanos y compromiso con la seguridad.
- Considerar los requerimientos que tendrán las actividades y organizaciones encargadas de desarrollar y mantener un potencial PNP.
- La importancia de que el gobierno de Chile establezca, garantice y mantenga los recursos humanos y económicos necesarios para el grupo encargado del desarrollo del PNP.
- Fortalecimiento y formación en Cultura de Seguridad.
- Comunicación y aceptación pública.
- Creación y desarrollo de un Organismo Regulador que cumpla con una independencia efectiva a todos los niveles.
- Establecimiento de organizaciones de soporte técnico.
- Formalización del Plan de Emergencias Radiológicas.

Finalmente, es necesario recalcar, que después de cada uno de los accidentes e incidentes ocurridos, la industria nuclear ha aprendido y respondido aplicando medidas para impedir que el mismo tipo de evento vuelva a suceder, mejorando así la seguridad nuclear en su conjunto. Esto proviene generalmente de los requerimientos exigidos por los organismos reguladores, pero también de las propias entidades explotadoras que promueven actuaciones claras para hacer frente a la recurrencia de estos eventos.

3.3.6. Acuerdos internacionales y cooperación en materias de seguridad nuclear y protección radiológica

A lo largo de los años, el país ha suscrito acuerdos internacionales y de cooperación con el objetivo de mejorar y reforzar los niveles de seguridad en su territorio (ver Anexos). Además, ha elaborado su regulación principalmente en base al Código de Conducta sobre Seguridad y Protección de las Fuentes Radiactivas y la Guía Complementaria sobre la Importación y Exportación de Fuentes Radiactivas desarrollados por el OIEA.

⁴¹ Onda estacionaria que afecta a un cuerpo de agua encerrado o parcialmente encerrado.

⁴² Fuente: Generación Núcleo-Eléctrica en Chile: Hacia una Decisión Racional, 2015.

Actualmente, el país cuenta con dos (2) autoridades regulatorias, la CCHEN y el Ministerio de Salud (Minsal), quienes cuentan con su respectiva normativa y protocolos en materia de protección radiológica, física y gestión de emergencias para las aplicaciones actuales. Estas entidades cuentan con amplia experiencia en fiscalización de instalaciones nucleares destinadas a la investigación y a instalaciones radiactivas. Sin embargo, en caso de avanzar hacia un PNP, se deberán adoptar acciones adicionales para incorporar las medidas que este tipo de programas requiere.

3.4. Consideraciones ambientales para un proyecto nuclear de potencia

La **Política Energética 2050** establece que, si bien la energía es un factor clave para el desarrollo social y económico, este debe ser en base a *“energía compatible con el medioambiente, donde la infraestructura energética genere bajos impactos ambientales y el sistema se base en energías bajas en emisiones de gases efecto invernadero”*⁴³.

En este punto es importante recordar que toda tecnología de generación energética genera impactos, lo importante es que estos sean gestionados de acuerdo a estándares que aseguren la protección de las personas y el medio ambiente.

3.4.1. Enfoque OIEA Milestones en relación a medio ambiente

El OIEA, en su enfoque Milestones⁴⁴, identifica hitos que se deben ir cumpliendo a través del proceso de implementación de un PNP, de forma de incorporar la dimensión ambiental a lo largo de toda la vida útil del proyecto.

Fase 1: El país está listo para un compromiso informado sobre un PNP

Durante esta fase, la NEPIO debe evaluar el marco regulatorio en materia de protección ambiental y su aplicación en las fases de selección de emplazamiento, construcción, operación, mantenimiento y desmantelamiento de una central nuclear. De esta misma forma, se debe comenzar con el levantamiento de la información ambiental de base con el fin de establecer los criterios de exclusión y elusión para el sitio de futuro emplazamiento.

Fase 2: El país está listo para licitar la primera central nuclear de potencia

Las acciones identificadas para la Fase 1 deben ser implementadas. El regulador ambiental ya debe poseer los conocimientos y habilidades necesarias en materia nuclear, y para eso, los límites de acción tanto del regulador ambiental como el nuclear, deben estar definidos.

La evaluación de impacto ambiental ya se debe haber realizado y debe presentarse ante la autoridad competente por parte del operador o responsable del proyecto. Esto se debe traducir a las especificaciones técnicas incluidas en el proceso de licitación.

Fase 3: El país está listo para licenciar y operar la primera central nuclear de potencia

Para esta fase es necesario que todos los aspectos ambientales sean considerados en el proceso de licenciamiento. Así también, los planes de monitoreo de aspectos ambientales deben estar implementados.

Al ser los programas nucleares proyectos intergeneracionales (es decir, requieren compromiso del Estado a largo plazo), sensibles desde el punto de vista social, con aspectos regulatorios particulares y con implicancias transfronterizas, el OIEA recomienda la aplicación de un Enfoque de Evaluación Ambiental Estratégica (EAE)⁴⁵ al nivel más alto de decisión del Estado, para la implementación de proyectos como:

⁴³ Gobierno de Chile, *Energía 2050 Política Energética de Chile*, 2015.

⁴⁴ Ver Sección 2.2.

⁴⁵ OIEA, *Strategic Environmental Assessment for Nuclear Power Programmes: Guidelines*, 2018.

- Inicio de un nuevo programa de energía nuclear a nivel país.
- Construcción de nuevos reactores.
- Implementación de estrategias de gestión de desechos radiactivos o desmantelamiento de centrales nucleares de potencia.
- Extensión de la vida útil de un reactor.

La Evaluación Ambiental Estratégica (EAE) es un enfoque analítico y participativo que tiene como objetivo incorporar consideraciones ambientales en políticas, planes y programas, integrando aspectos económicos y sociales. De esta forma, este tipo de evaluación se centra en determinar líneas estratégicas de acción de forma de guiar los proyectos hacia un desarrollo sostenible.

Esta herramienta no reemplaza la evaluación ambiental de un proyecto, sino que más bien la complementa (figura 5)⁴⁶. En Chile, actualmente, este enfoque se aplica a la evaluación de Políticas, Planes, Instrumentos de Planificación Territorial, Zonificaciones del Borde Costero, Instrumentos de Ordenamiento Territorial, entre otros.

Beneficios que se pueden derivar de la aplicación de esta estrategia:

1. Proporcionar evidencia ambiental para apoyar decisiones informadas.
2. Mejorar la identificación de nuevas oportunidades.
3. Prevenir errores costosos.
4. Desarrollar la participación pública en la toma de decisiones para mejorar la gobernanza.
5. Facilitar la cooperación transfronteriza.



Figura 5: evaluación de impacto ambiental y evaluación ambiental estratégica.

Fuente: elaboración propia (2019).

3.4.2. Aspectos ambientales relevantes del uso de energía nuclear de potencia

Los aspectos comúnmente analizados en un proyecto de generación energética son aquellos como uso de suelo, agua, biodiversidad, aspectos socioeconómicos y culturales, emisiones atmosféricas, ruido, manejo de desechos entre otros. En el caso de las centrales nucleares, el manejo de desechos radiactivos, la liberación de radiación ionizante y uso de agua - suelo, constituyen aspectos que reciben particular atención.

Desechos Radiactivos

El objetivo principal de la gestión de desechos radiactivos es que no representen un riesgo para la población, bienes y medio ambiente. Esto se aborda a través de medidas orientadas a almacenarlos de forma segura mientras disminuye su grado de actividad.

46 Ministerio de Medio Ambiente, *Evaluación Ambiental Estratégica*.

De acuerdo a esta característica, los desechos se pueden diferenciar⁴⁷ entre aquellos con muy baja actividad, los cuales pueden ser almacenados sin medidas particulares de seguridad por un periodo limitado de tiempo, hasta desechos de alta actividad (incluyendo el combustible gastado) los que deben ser dispuestos contando con medidas de contención y aislamiento especiales.

Los desechos se originan durante la operación del reactor nuclear en las distintas etapas del ciclo del combustible y en el desmantelamiento de la central. Además, existen otras actividades que también generan desechos radiactivos como la industria, minería, hospitales, clínicas, universidades y centros de investigación. Por ejemplo, en Chile se generan anualmente entre 15 y 20 m³ de desechos radiactivos, la mayoría provenientes de la industria, así como de los generados de actividades realizadas en la CCHEN (gráfico 10).

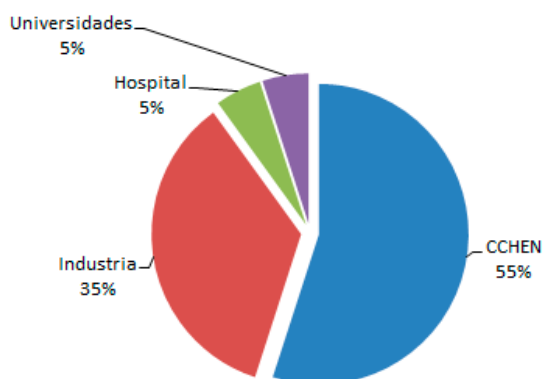


Gráfico 10: generación de desechos radiactivos en Chile. Fuente: CCHEN (2019)⁴⁸.

En términos de cantidad de generación, una central de 1.000 MWe, utilizando uranio enriquecido al 4,5% como combustible, genera cerca de 27,6 toneladas de combustible gastado (desecho de alta actividad) al año⁴⁹. La mayoría de los desechos que se generan en una central nuclear corresponden a desechos de baja y media actividad, como filtros de agua o aire y otros desechos industriales contaminados con sustancias radiactivas, por ejemplo. Solo un pequeño porcentaje corresponde a desechos de alta actividad, incluyendo combustible gastado (gráfico 11).

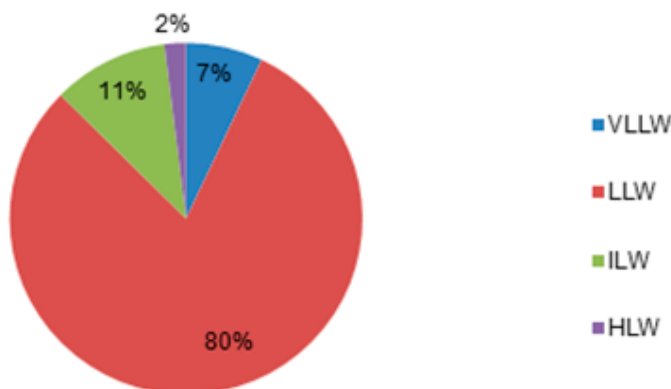


Gráfico 11: resumen desechos radiactivos almacenados y en disposición final (m³)^{50 51}
Fuente: adaptación OIEA (2018)

⁴⁷ Desechos exentos (EW); Desechos de muy corta vida (VSLW); Desechos de muy baja actividad (VLLW); Desechos de baja actividad (LLW); Desechos de media actividad (ILW) y Desechos de alta actividad (HLW). En esta última clasificación cae el combustible gastado.

⁴⁸ Comisión Chilena de Energía Nuclear, *Curso de Elementos de Protección Radiológica Operacional*, 2019.

⁴⁹ World Nuclear Association, *The Nuclear Fuel Cycle*, 2017.

⁵⁰ OIEA realiza estimación de desechos generados a través de las cantidades de desechos en almacenamiento temporal y en disposición final.

⁵¹ Ver nota 48.

Comparado con otras fuentes energéticas, la cantidad de desechos generados por la nucleoelectricidad es significativamente menor⁵² a lo generado, por ejemplo, en centrales a carbón⁵³ (tabla 1).

Desechos sólidos provenientes del uso de diferentes combustibles (g / kWh)	
Ceniza de carbón	84
Ceniza de lignita	172
Ceniza de petróleo	0,8
Desechos Radiactivos ¹	0,2 ²

Tabla 1: comparativo de generación de desechos por tipo de combustible.
Fuente: OIEA (2016)⁵⁴

Los desechos de baja e intermedia actividad son, comúnmente, almacenados en instalaciones a nivel de suelo. Las condiciones para su diseño estarán dadas por las características del residuo y condiciones ambientales locales, entre otros. Esto, para establecer un almacenaje provisorio seguro por varios años.

En términos del combustible gastado, que corresponde a desechos de alta actividad, son almacenados en seco en barriles o tanques a la espera de que bajen su actividad y calor, en lugares adaptados cercanos al reactor. Luego, estos pueden ser almacenados en “húmedo” utilizando piscinas de concreto que contienen agua a la espera del decaimiento de su grado de actividad, para luego ser dispuesto en unidades de almacenamiento temporal (ciclo del combustible abierto).

Actualmente, no existen repositorios geológicos profundos para la disposición final de desechos de alta actividad. Sin embargo, en Estados Unidos se encuentra una instalación similar, el WIPP⁵⁵ (Waste Isolation Pilot Plant), una disposición profunda en formaciones geológicas estables que se utiliza solo para disponer desechos (ropa, herramientas u otros) que están contaminados con sustancias radioactivas denominados “Transuránicos”⁵⁶, así como también desechos provenientes de Defensa. Además del WIPP, Estados Unidos cuenta con un proyecto de repositorio geológico (Yucca Mountain), para realizar la disposición final de desechos de alta actividad. Sin embargo, este proyecto ha sido pospuesto por décadas debido a la controversia que ha generado en la opinión pública y a nivel político.

En otros países se observan avances en el desarrollo de repositorios geológicos. En junio de 2019, la empresa Posiva anunció el comienzo de la construcción de una central de encapsulamiento de combustible gastado en la central Olkiluoto ubicada en Finlandia, que podría estar en operación en 2024⁵⁷. A esto se suma la puesta en marcha de la nueva instalación geológica de Francia (Cigéo), que se proyecta esté operativa para el 2025⁵⁸. De esta misma forma, otros países también investigan la materia y cuentan con proyectos para el desarrollo de este tipo de instalaciones. Reino Unido, Canadá, Finlandia, Suecia y Suiza⁵⁹ están en proceso de búsqueda de lugares de emplazamiento para una instalación definitiva como una solución a largo plazo.

52 Principalmente, debido a la alta densidad energética del combustible nuclear.

53 Estos desechos también contienen trazas de elementos radiactivos (materiales radiactivos naturales como uranio, radio, torio y potasio).

54 OIEA, *Nuclear Power and Sustainable Development*, 2016.

55 U.S. Department of Energy, *Waste Isolation Pilot Plant (WIPP)*, 2019.

56 Elementos transuránicos: elementos pesados con un número atómico superior a 92, son radiactivos. Los más conocidos son plutonio, americio, neptunio y curio.

57 OIEA, *Developing the First Ever Facility for the Safe Disposal of Spent Fuel*, 2019.

58 Électricité de France, *Radioactive waste*, 2019.

59 OIEA, *Storage and Disposal of Radioactive Waste*, 2018.

Radiación ionizante

Diariamente, solo por el hecho de vivir en el planeta Tierra, estamos expuestos a la radiación ionizante. Esta puede ser de origen cósmico (radiación solar), terrestre (torio, radio, uranio, radón), o bien, puede generarse por la interacción entre la radiación cósmica, atmósfera y las aguas naturales (carbono 14, berilio 7 y 10, sodio 22 y tritio).

Estas son comúnmente llamadas fuentes de radiación natural o de fondo (*background*). De acuerdo al OIEA (2019), nuestro cuerpo recibe en promedio 2,4 mSv/año producto de la exposición a estas fuentes. También existe exposición producto de actividades de carácter antropogénico, tales como aplicaciones médicas, como exámenes de rayos-X; viajes en avión, fumar, exposición a luz o calor. Por ello, el cuerpo humano está constantemente expuesto a la radiación ionizante.

En el gráfico 12 se observan porcentajes referenciales informados por la U.S. Environmental Protection Agency, donde se aprecian las contribuciones de radiación de las diferentes fuentes tanto de fondo como artificiales médicas.

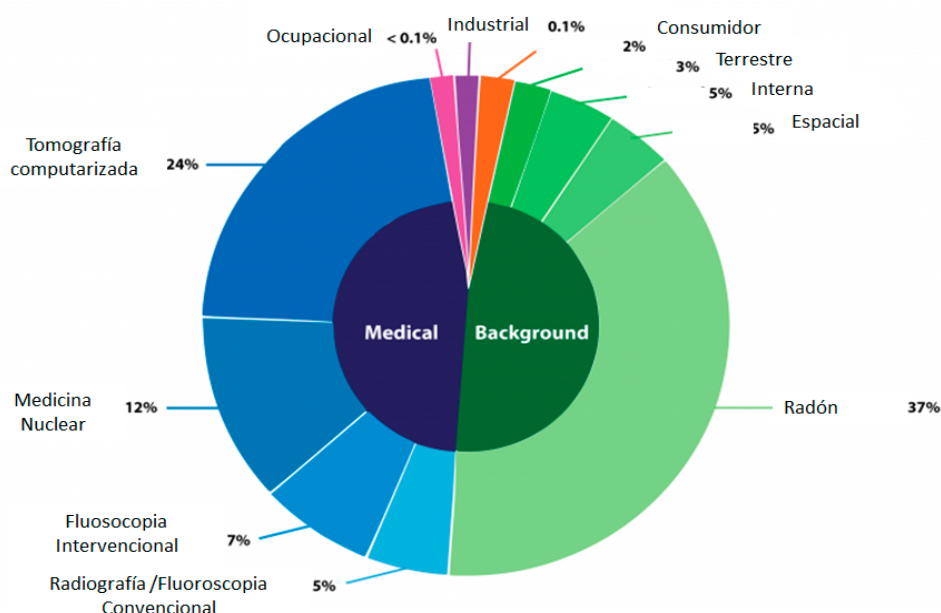


Gráfico 12: fuentes de exposición a radiación ionizante. Fuente: U.S. Environmental Protection Agency (2019).

Durante la operación normal de una central nuclear, las emisiones de radiación ionizante son controladas a través de los sistemas de seguridad para protección radiológica de la central, que cuentan con distintas medidas de gestión (ejemplo: ALARA⁶⁰) y barreras de protección, cuyo diseño y ubicación garantizan que las dosis se mantengan siempre por debajo de los límites autorizados.

60 ALARA (*As Low As Reasonably Achievable* o *Tan Bajo como sea Razonablemente Posible*) es el criterio general que la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) y los organismos reguladores nacionales imponen a los propietarios de instalaciones nucleares y radiactivas para que controlen los efluentes de las mismas, y así mantener los niveles de radiactividad lo más bajo posible. El criterio establece que debe evitarse toda exposición no justificada de los seres vivos, y mantener las exposiciones tan bajas y alejadas de los límites fijados por el organismo regulador, como sea posible, teniendo en cuenta el estado de la tecnología, y los factores económicos y sociales que puedan intervenir en toda irradiación (el término original era "As Low As Practicable"). Fuente: <https://www.fornuclear.org/es/energia-nuclear/glosario/62-alara-as-low-as-reasonably-achievable>

Además, se generan bajas emisiones de efluentes líquidos y gaseosos, que son monitoreadas y controladas con el fin de asegurar el cumplimiento de los estándares internacionales y la normativa de cada país.

Es necesario, sin embargo, mantener la perspectiva de lo que significa la cantidad de radiación ionizante que podría recibirse a causa de la exposición a una central nuclear (figura 6), por ejemplo: “una persona que pase un año en los límites del sitio de una central nuclear recibiría adicionalmente menos del 1% de lo que recibiría producto de la exposición de radiación de fondo”⁶¹.



Figura 6: comparativa de dosis de radiación ionizante debido a causas artificiales o antropogénicas.
Fuente: IDOM - CCHEN (2018).

Los países que implementan un PNP tienen la responsabilidad de generar un marco regulatorio radiológico, que puede ser desarrollado utilizando como referencia los estándares sugeridos por el OIEA. Dichos estándares se aplican para evaluar los riesgos asociados a la radiación ionizante y establecer metodologías y criterios (protección radiológica operacional), para resguardar a la población, bienes y medio ambiente. Esta evaluación puede ser realizada por el regulador ambiental, pero debe ser consistente a la realizada por el regulador nuclear.

En el marco de una Evaluación de Impacto Ambiental, el OIEA recomienda la implementación de una Evaluación de impacto radiológico ambiental con enfoque prospectivo (REIA)⁶², cuyo objetivo es determinar si el proyecto de central u otras instalaciones cumplen con la normativa relativa a protección del público y el medio ambiente contra los riesgos radiológicos. Para esto es necesario realizar una evaluación en cada una de las etapas del proyecto.

Uso de agua

La mayoría de las centrales de generación de energía utilizan agua para refrigeración en cantidades importantes. Por eso, las centrales a combustible fósil y las centrales nucleares de potencia están, en su mayoría, cerca de sectores costeros o en inmediaciones de grandes cuerpos de agua (lo que no constituye un requisito estricto y excluyente, sino que por costos y simplicidad del proceso).

61 U.S. Nuclear Regulatory Commission, *Frequently Asked Questions (FAQ) About Radiation Protection*, 2017.

62 OIEA, *Prospective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities*, 2018.

En términos de sistema de refrigeración, existen sistemas abiertos donde el agua se utiliza una vez y es devuelta al cauce de agua (once-through), y otros donde el agua se recircula para su uso (closed-cycle) y es enfriada a través de torres o piscinas de enfriamiento (figura 7).

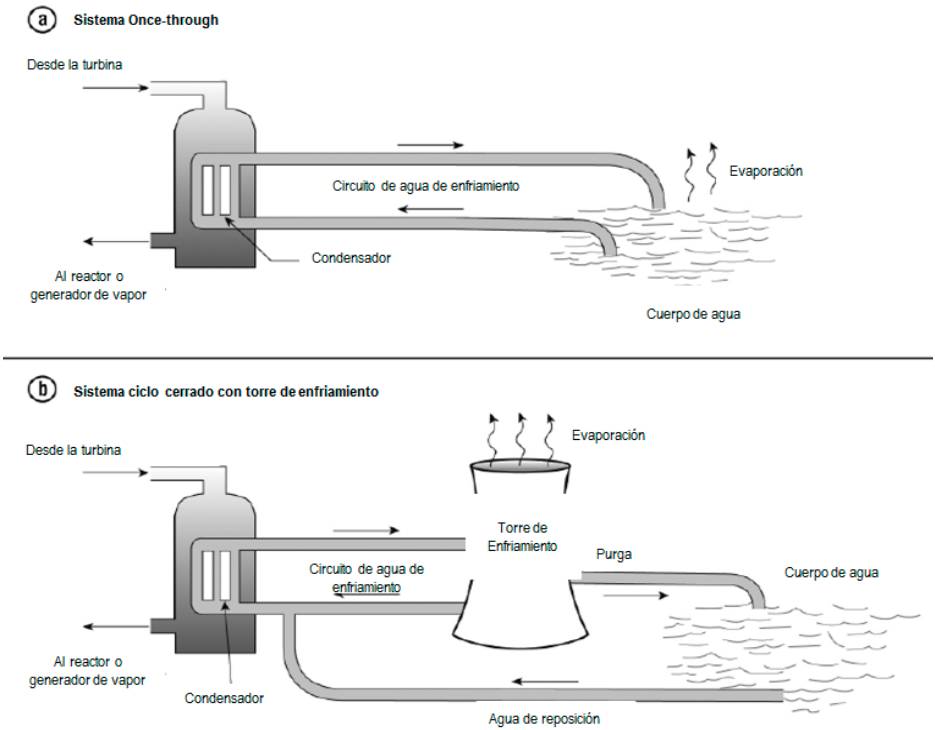


Figura 7: sistemas para uso de agua en centrales de energía nuclear.
Fuente: U.S Nuclear Regulatory Commission (2013)

Comparativamente, una central nuclear utiliza más agua que una planta que usa combustible fósil. Una central nuclear de 1.000 MW(e) con el sistema once-through requeriría 26–64 m³/s (valor típico 50 m³/s), una planta de combustible fósil 21–53 m³/s y una planta de ciclo combinado de gas natural 8–21m³/s ⁶³. En la tabla 2, se pueden observar los valores comparativos por MWh para distintos tipos de sistemas de enfriamiento para distintas fuentes energéticas.

Tipo de Combustible para generación de energía	Once-through	Piscinas de enfriamiento	Torre de enfriamiento
Nuclear	95-230	2-4	3-4
Combustible Fósil	76-190	1-2	2
Gas Natural	29-76		1

Tabla 2: Uso de agua de diferentes sistemas de refrigeración (m³/MWh). Fuente: OIEA (2012).

La alternativa de la aplicación de desalinización de agua de mar adquiere relevancia cuando se trata de ahorro de agua en este tipo de procesos. Existen experiencias, como las de Japón, donde la operación de generación de energía eléctrica acompaña la producción de 14.000 m³/día de agua potable⁶⁴. Así también, plantas de Corea del Sur producen agua que es utilizada en el sistema de refrigeración de los mismos reactores.

63 OIEA, *Efficient Water Management in Water Cooled Reactors*, 2012.
64 World Nuclear Association, *Desalination*, 2019.

Otras medidas apuntan al uso de sistemas de refrigeración en seco, reciclado de corrientes de agua en la central, modificaciones que mejoran la eficiencia térmica de la central y reúso de agua residual. De esta forma, para una gestión sustentable del agua en una central nuclear es importante apuntar a un diseño adecuado del sistema de refrigeración, ya que de este dependerá la disminución del uso de agua.

Un ejemplo exitoso de gestión del agua en una central nuclear es el caso de la central Palo Verde ubicada en el desierto de Sonora, Estados Unidos (figura 8). A diferencia de la mayoría de las centrales nucleares, esta instalación reutiliza las aguas residuales de las ciudades más cercanas (Phoenix, Glendale, Scottsdale, Tempe, Mesa y Tolleson) como agua de enfriamiento, previo tratamiento. La demanda de agua de las nueve (9) torres de enfriamiento, es de aproximadamente 151 - 189 m³/ minuto⁶⁵.



Figura 8: central de energía nuclear Palo Verde. Fuente: Nuclear Energy Institute (2018).

La disponibilidad de agua podría dejar de representar un factor restrictivo con el desarrollo de una nueva generación de reactores⁶⁶, que trae consigo una serie de alternativas que utilizan fluidos refrigerantes distintos del agua. Algunos de ellos son: reactores de espectro térmico que utiliza gases como el helio para refrigerar y grafito para la moderación (Gas Cooled Reactor), reactores refrigerados con sodio (Sodium Fast Reactor), otros reactores que utilizan plomo y bismuto (Lead Fast Reactor), otros sistemas de refrigeración en base a sales fundidas (sodio, litio y berilio) entre otros.

Emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI)

La energía nuclear no genera emisiones de gases efecto invernadero durante su operación normal. Es por esta razón que es considerada por la International Energy Agency (IEA) (2019) una opción relevante que debe ser evaluada para hacer frente al cambio climático⁶⁷.

En el análisis realizado en el “**Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile**” IDOM - CCHEN (2018), se observa la cantidad de emisiones provenientes del uso de combustibles fósiles comparadas con las emisiones de la energía nuclear y energías renovables (gráfico 13). Estas fueron evaluadas bajo el enfoque de “Análisis de Ciclo de Vida”, que considera además de las emisiones por concepto de operación, las emisiones indirectas que se generan en procesos complementarios como la minería y gestión de desechos entre otros.

65 Nuclear Energy Institute, *Palo Verde 2018 Visitor Guide*, 2018.

66 The Generation IV International Forum, *Generation IV Systems*, 2013.

67 International Energy Agency, *Nuclear Power in a Clean Energy System*, 2019.

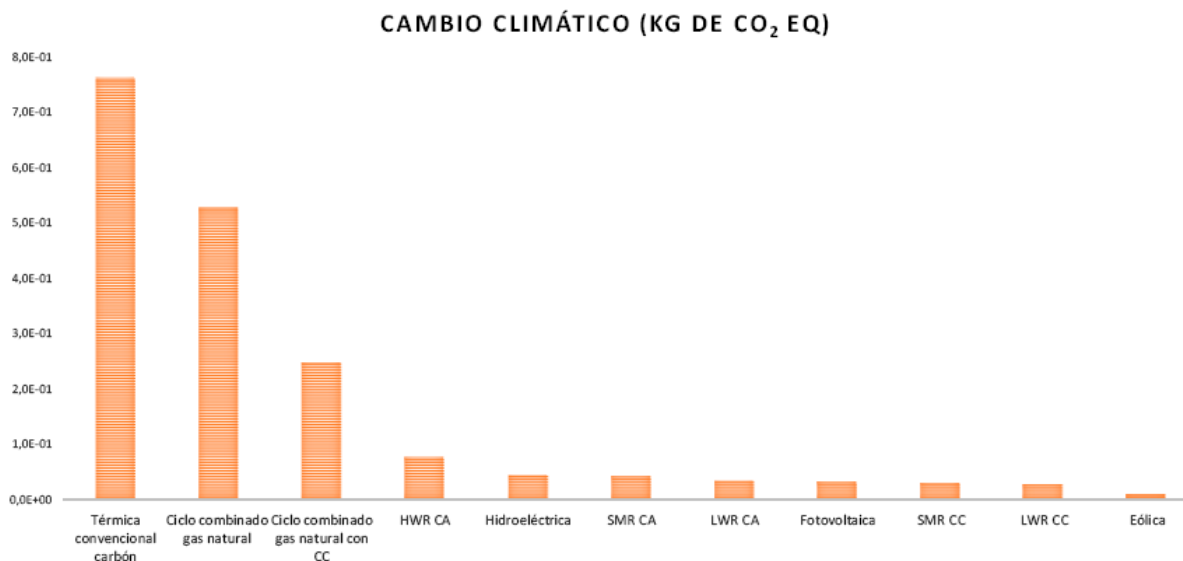


Gráfico 13: comparativa en la variable cambio climático. Fuente: IDOM - CCHEN (2018)⁶⁸.

Los beneficios que ha demostrado el uso de la energía nuclear, en términos de contaminantes atmosféricos, son altos. Sin el aporte de la energía nuclear, la IEA estima que las emisiones del sector de generación eléctrica hubiesen sido un 20% más alto durante el periodo 1971-2018⁶⁹.

Sumado a eso, se encuentra su aporte para combatir la contaminación atmosférica, ya que la energía nuclear no genera óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre ni material particulado, que sí generan, en cambio, los combustibles fósiles. De acuerdo a Kharecha P. y Hansen J. (2013)⁷⁰, la industria nuclear global ha evitado, en promedio, 1,84 millones de muertes (periodo de 1971 al 2009) relacionadas con la contaminación del aire. Estas ventajas muchas veces no son valorizadas bajo los sistemas actuales de evaluación de viabilidad en el ámbito de la generación eléctrica.

Adicionalmente, de acuerdo a la IEA, la energía nuclear es la tecnología baja en carbono que más energía genera en las economías avanzadas como Bélgica, Finlandia, Francia, Corea, Suecia, Reino Unido y Estados Unidos. Otro tipo de energías con mayor aporte energético son también la hidroeléctrica y, en menor grado, las energías variables como la eólica y la solar, tal como se observa en el siguiente gráfico.

68 Tecnologías nucleares: HWR, SMR y LWR (ciclo abierto y cerrado)

69 International Energy Agency, *Nuclear Power in a Clean Energy System*, 2019.

70 Kharecha, P.A., and J.E. Hansen, 2013: Prevented mortality and greenhouse gas emissions from historical and projected nuclear power. *Environ. Sci. Technol.*, 47, 4889-4895, doi:10.1021/es3051197.

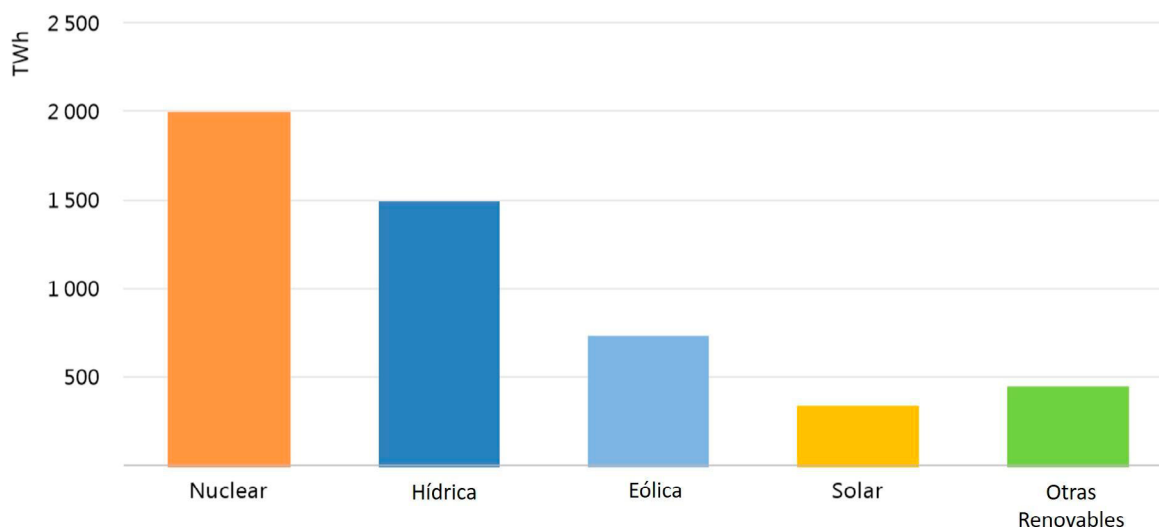


Gráfico 14: generación electricidad baja en carbono en economías avanzadas por fuente, 2018.
Fuente: IEA (2019).

Por estas razones, IEA⁷¹ enfatiza el hecho de que es necesario mantener abierta la opción nuclear, aprovechar la vida útil de las centrales existentes, evaluar sus externalidades positivas y su valor ambiental y de seguridad energética, estudiar la integración de la energía nuclear con una matriz de energías renovables variables, mejorar los aspectos regulatorios, crear instrumentos económicos atractivos, mejorar los tiempos de licenciamiento y apoyar el desarrollo de nuevas tecnologías, como los SMRs.

Uso de terreno

El uso de terreno para la producción de energía nuclear es considerablemente más bajo por unidad de energía, si se compara con otras tecnologías de generación, como las hidroeléctricas de represas y los paneles fotovoltaicos, incluso considerando actividades indirectas del ciclo del combustible nuclear, como es la minería de uranio⁷².

Adicionalmente, el impacto de este tipo de tecnologías es importante debido a que el uso del terreno es de carácter “excluyente” es decir, no es posible de compartir con otras actividades como la agricultura y el pastoreo, como sí es el caso de la energía eólica. La energía eólica, si bien requiere de gran espacio para su instalación, no compite con otras actividades que puedan llevarse a cabo, como por ejemplo zonas de cultivo.

En el caso de la energía nuclear, esta produce más energía por unidad de área que otro tipo de tecnologías, debido a su alta densidad energética. De acuerdo a la United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) y la International Renewable Energy Agency (IRENA), para la energía nuclear la intensidad de uso de suelo es de 0,1 m²/MWh, comparado con la producción a carbón, con 5 m²/MWh. En términos de energía renovables, la energía eólica utiliza 1 m²/MWh y la energía solar fotovoltaica 10 m²/MWh⁷³.

De acuerdo al análisis (gráfico 15) realizado en el “Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile” (IDOM - CCHEN, 2018), los proyectos de hidroeléctricas de represas y centrales fotovoltaicas presentan un mayor uso de terreno, seguido por fuentes con mayor densidad energética como centrales a carbón, gas natural y la energía nuclear⁷⁴.

71 IEA (2019). “Nuclear Power in a Clean Energy System”.

72 IDOM (2018). “Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile”.

73 Valor típico estimado por la publicación.

74 Tecnologías nucleares: HWR, SMR y LWR (ciclo abierto y cerrado)

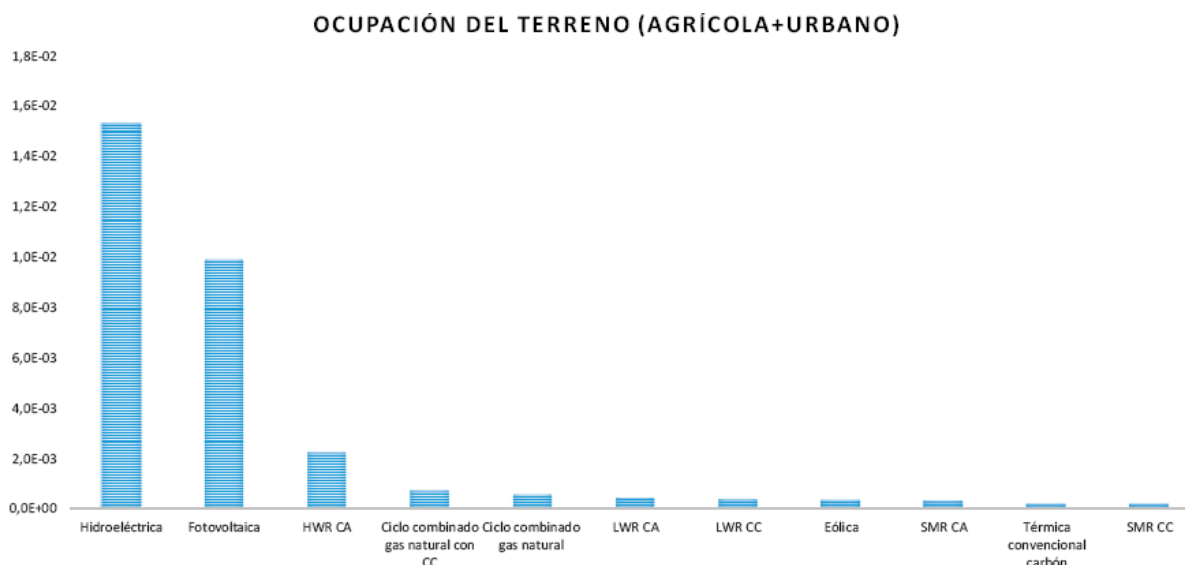


Gráfico 15: comparativa de uso de terreno en diferentes tecnologías (m² * año).
Fuente: IDOM - CCHEN (2018).

De esta forma, la energía nuclear presenta menor impacto en el uso de terreno que otras fuentes energéticas. Esto representa una ventaja para sectores que tengan alta demanda energética y donde se prefiere priorizar, por ejemplo, el uso de suelo para actividades agrícolas o ganaderas. Por tanto, es otra variable de interés a considerar cuando se evalúan alternativas. Esta ventaja se acentúa aún más en el caso de la aplicación de tecnologías nucleares modulares (SMR).

3.5. Consideraciones para el Emplazamiento de una Central Nuclear de Potencia

Todo proyecto de emplazamiento de una central de generación energética debe ser evaluado para determinar los efectos que pudiera tener en la población y medio ambiente circundantes, así como también los condicionantes que el emplazamiento pueda imponer sobre el diseño de la central.

El OIEA ha desarrollado lineamientos y estándares generales⁷⁵ para el proceso de selección de emplazamiento, los cuales representan la experiencia y el consenso internacional, y establecen los aspectos y criterios necesarios para evaluar y caracterizar lugares de emplazamiento, principalmente desde el punto de vista de la seguridad. Para esto, se propone establecer un proceso de selección que se basa en identificar regiones potenciales, a través de barridos de información, hasta llegar a la identificación de sitios idóneos. Para esto, se utilizan diversos criterios (de exclusión, elusión y de idoneidad) para identificar qué tan favorable es un sitio en particular.

La evaluación debe tener en cuenta aspectos de seguridad nuclear, protección física⁷⁶, logística, costos, aspectos socioeconómicos y ambientales para los cuales se requiere información relativa a aspectos tales como: demografía, meteorología, hidrología superficial y subterránea, geología, geotecnia, sismología, usos de suelo y aguas, factores ecológicos, medioambientales y factores imputables al ser humano. Si en la evaluación se identificaran deficiencias que no pueden ser compensadas por medidas de diseño, de ingeniería o procedimientos administrativos, el sitio debe ser descartado inmediatamente.

⁷⁵ OIEA, *Managing Siting Activities for Nuclear Power Plants*, 2012 | OIEA, *Site Survey and Site Selection for Nuclear Installations*, 2015.

⁷⁶ Protección física: marco jurídico internacional de la seguridad física nuclear está constituido por instrumentos jurídicos y principios reconocidos, concebidos para prevenir y detectar actos delictivos y otros no autorizados, asociados o dirigidos a materiales nucleares u otros materiales radiactivos, e instalaciones y actividades conexas, para dar respuesta a esos actos.

A modo de realizar un primer ejercicio de acercamiento en estas temáticas, la CCHEN desarrolló el estudio: “Consideraciones para el emplazamiento de una Central Nuclear de Potencia (CNP) en Chile” (2018) en el cual se realizó un análisis preliminar de carácter regional de aquellas áreas del país en las cuales existen aspectos que pueden resultar restrictivos para la ubicación de una central de energía nuclear (ver mapas de ejemplo en Anexos).

Este estudio no busca identificar un lugar en particular, sino que más bien identificar las zonas de exclusión, es decir, áreas donde no es factible construir una central nuclear.

Entre los aspectos evaluados que se consideran se pueden mencionar:

- Distancia hacia centros poblados (considerando la densidad poblacional)
- Existencia de zonas de peligro: remoción en masa, volcanismo, fallas activas, tsunamis, riesgo sísmico, entre otros
- Condiciones meteorológicas locales
- Cercanía a instalaciones peligrosas o militares
- Riesgos asociados a tráfico aéreo (presencia de aerovías y aeropuertos)
- Focos de fuego
- Existencia de suministro eléctrico
- Existencia de suministro de agua
- Existencia de líneas de transmisión (infraestructura habilitante)
- Existencia de zonas indígenas
- Existencia de zonas de interés patrimonial y/o arqueológicos
- Existencia de zonas turísticas
- Existencia de zonas protegidas o ambientalmente vulnerables

Se identificaron zonas de exclusión donde no es posible emplazar centrales nucleares. Además, se identifican áreas en regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama y Coquimbo (ver Anexos), a modo de ejemplo, que presentan superficie disponible para ser consideradas en un análisis de selección de sitios para emplazamiento. Que exista una mayor área disponible en el norte del país no implica que no puedan realizarse evaluaciones en el sur de Chile (figura 9).

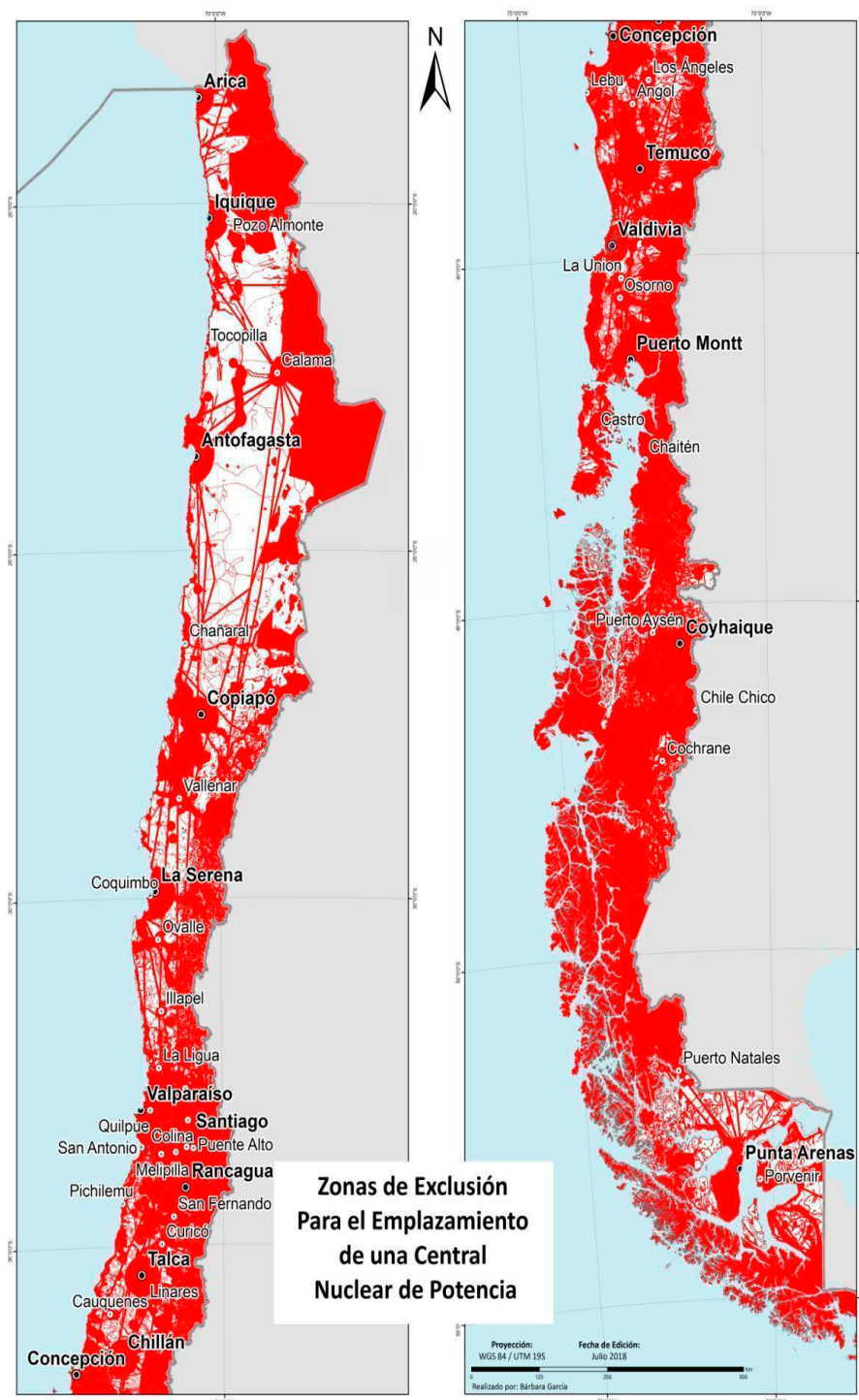


Figura 9: mapa país con zonas de exclusión. Fuente: CCHEN (2018)

Además de los aspectos mencionados, existen otros que obedecen, principalmente, a temas logísticos y de costos, que pueden hacer más o menos favorable el sitio de emplazamiento desde el punto de vista estratégico, pero que no lo inhabilitan. Por ejemplo: cercanía a un suministro eléctrico, conectividad y cercanía a centros de consumo y servicios, existencia de líneas de transmisión (infraestructura) y cercanía a suministro de agua. La cercanía de la fuente de agua se convierte en una variable que puede hacer más o menos costoso un proyecto, pero que no representa, necesariamente, una limitación insalvable para su emplazamiento, tal como lo demuestra el caso de la central nuclear Palo Verde, mencionada con anterioridad.

Finalmente, existen otros aspectos que deben ser evaluados en etapas más avanzadas del proceso de selección, cuando el área ya esté acotada y se esté próximo a la selección del sitio idóneo, tales como condiciones meteorológicas locales, cercanía a instalaciones peligrosas o militares, focos de fuego y riesgo sísmico.

Dentro de estos últimos mencionados, el análisis de riesgo sísmico resulta de especial interés en el país. En el estudio realizado por la CCHEN, se trazó la ubicación de ciertas fallas potencialmente activas, sin embargo, con esta información no resulta posible evaluar el riesgo potencial que estas pudiesen representar, debido a que es necesario realizar estudios específicos para cada una de las fallas con un alcance geográfico que dependerá de sus características particulares. No resulta posible aplicar un mismo criterio de distancia para todas las fallas.

Adicionalmente, los mapas de zonificación sísmica existentes en el país pueden ser utilizados como una guía para edificaciones con vida útil aproximada de 50 años, pero no podría ser aplicado a proyectos del tipo nuclear o de instalaciones estructurales que tienen periodos de vida mucho mayores, ya que las consideraciones de seguridad de estas últimas son distintas⁷⁷.

De esta misma forma, cabe considerar el efecto de amplificaciones por efecto de sitio, lo cual significa que las condiciones locales del lugar deben contar con una evaluación específica para ese sitio ya que, por ejemplo, el tipo de suelo (blando o duro) puede hacer variar significativamente el alcance y la magnitud de un movimiento sísmico⁷⁸. A causa de esto, con la información disponible a la fecha, no es posible representar a través de mapas cuál sería el riesgo sísmico para proyectos nucleares en nuestro país.

En conclusión, el peligro sísmico asociado a un proyecto de esta naturaleza estará determinado, principalmente, por las características del sitio en particular, por lo cual se requerirá de estudios específicos de sismicidad, una vez que el sitio haya sido seleccionado.

Es importante señalar que, en este estudio, se consideraron exigencias regulatorias vigentes para las centrales nucleares actuales, convencionales y de gran tamaño. Por ello, algunas de estas restricciones pudiesen flexibilizarse con la introducción de nuevas tecnologías nucleares modulares y de menor tamaño, con sistemas pasivos de seguridad, menores requerimientos de suelo y de zona de exclusión, entre otros.

En concordancia con lo presentado en informes anteriores⁷⁹, desde el punto de vista territorial, el estudio concluye que el desarrollo de la energía nuclear en Chile no contraviene los planes y políticas nacionales, ni regionales y resulta compatible con las directrices orientadoras de las regiones en materia energética. En la actualidad ninguna de ellas impediría el emplazamiento de una central nuclear en el país.

En general, todas las regiones tienen como objetivo primordial potenciar el desarrollo de energías renovables, quedando establecido en la necesidad de “diversificar la matriz energética a través de fuentes estables, seguras y limpias”, lo que concuerda con las características de una central nuclear de potencia.

No obstante, al avanzar hacia fases posteriores del proceso, y una vez que el sitio es seleccionado, la planificación territorial a nivel local toma más relevancia, debido a la aplicación de los criterios de zonificación de los planes reguladores comunales, por ejemplo, donde sí podrían aparecer restricciones específicas, según la localización del sitio en particular que haya sido seleccionado.

⁷⁷ Centro Sismológico Nacional Universidad de Chile, *Avances en la zonificación sísmica de Chile*, 2016.

⁷⁸ Leyton F., Ruiz S., *Notas CCHEN*, 2018.

⁷⁹ Comisión Chilena de Energía Nuclear, *Generación Nucleoeléctrica en Chile: Hacia una decisión racional*, 2015.

3.6. Aspectos económicos

Estimar los costos que podría tener la implementación de una central nuclear de potencia en un país, constituye un proceso complejo y que conlleva un alto grado de incertidumbre. La información internacional que podría utilizarse como referencia, presenta un alto grado de dispersión y varía fuertemente con la ubicación de las centrales nucleares.

Adicionalmente, la información disponible es escasa y corresponde a centrales de distintas tecnologías, años de construcción y edificadas bajo distintos contextos, que no son necesariamente comparables entre sí. Esta estimación se dificulta aún más, dado el actual paso hacia las tecnologías de Tercera Generación (Gen III/III+), aumentando la incertidumbre respecto a los costos que estas tecnologías podrían alcanzar. Por último, no se debe olvidar que la viabilidad económica que puede tener una central nuclear en un mercado determinado dependerá también de los costos de las tecnologías alternativas, los que varían de país en país y están en permanente evolución.

Sin embargo, se pueden establecer algunos conceptos generales que resultan comunes y transversales a la tecnología nuclear. Entre estos, se encuentra, por ejemplo, que las centrales nucleares de potencia son altamente intensivas en capital, requieren largos tiempos para su construcción y extensos períodos para la recuperación del capital invertido. El costo de inversión de una central nuclear convencional⁸⁰ es el factor de mayor influencia en el Costo Nivelado de la Energía (LCOE, por sus siglas en inglés), representando aproximadamente el 60% del mismo⁸¹. Por ello, la estructura, monto de los intereses y la extensión del período de construcción son temas fundamentales a convenir y controlar, para estimar con certeza el real costo de financiamiento del proyecto y, con ello, su costo final.

El costo del combustible, por el contrario, representa una fracción muy baja del LCOE, alcanzado aproximadamente un 15% del mismo, lo que significa que el costo de generación es muy poco sensible a potenciales alzas en su precio, lo que hace que estos se mantengan estables y predecibles en el tiempo.

El tiempo de construcción estimado para las centrales nucleares convencionales es de al menos cinco años, siendo el estándar internacional utilizado de siete años, que no incluye el tiempo necesario para certificaciones y permisos regulatorios, ni tampoco el tiempo requerido para la preparación de la infraestructura nuclear del país, proceso que puede tardar entre 10 y 15 años, dependiendo del nivel de desarrollo del país al respecto. El período normal estimado de operación de las centrales nucleares es de 60 años, normalmente con una revisión para su relicenciamiento al año 40.

3.6.1. Costo nivelado de la energía (LCOE)

Para comparar las distintas alternativas de generación, se suele utilizar el Costo Nivelado de la Energía (LCOE), que corresponde al costo total de construcción y operación de una central durante toda su vida útil dividido por el total de energía despachada durante ese mismo periodo de tiempo, incluyendo el costo de financiamiento.

El siguiente gráfico muestra la comparación de LCOE para centrales a carbón, nuclear y turbinas a gas de ciclo combinado, para distintas tasas de descuento. Del gráfico 16 se desprende que, mientras las otras tecnologías no sufren grandes variaciones, la tecnología nuclear resulta muy sensible a la tasa de descuento y, al mismo tiempo, presenta una dispersión importante de sus costos para una misma tasa.

80 Considerando la información de las centrales nucleares construidas, lo que ha demostrado ser efectivo independiente del tipo de tecnología en particular.

81 World Nuclear Association, *Nuclear Power Economics and Project Structuring*, 2017.

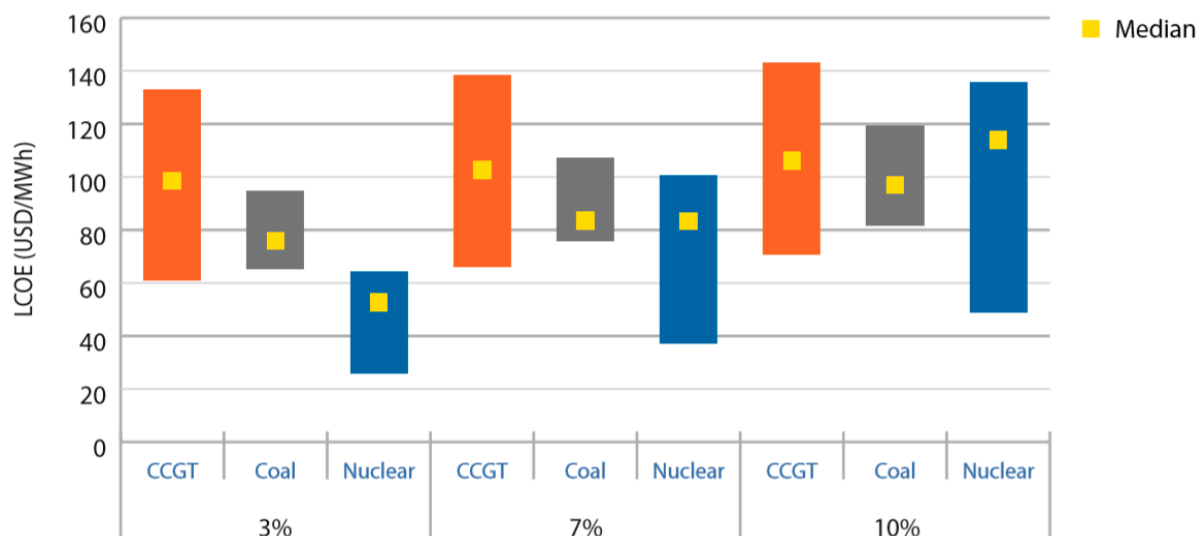


Gráfico 16: comparación de costo nivelado de la energía. Fuente: IEA / OECD- NEA (2015)⁸².

El gráfico anterior muestra un LCOE que fluctúa entre 29 USD/MWh en Corea hasta 64 USD/MWh en Reino Unido, para una tasa de descuento del 3%; entre 40 USD/MWh (Corea) hasta 101 USD/MWh (Reino Unido) al 7% y entre 51 USD/MWh (Corea) y 136 USD/MWh (Reino Unido) al 10%, para el caso de la energía nuclear.

Información referente a los LCOE históricos para otros países OECD se presenta en los gráficos 17 y 18 (tasas de descuento del 5% y del 10%):

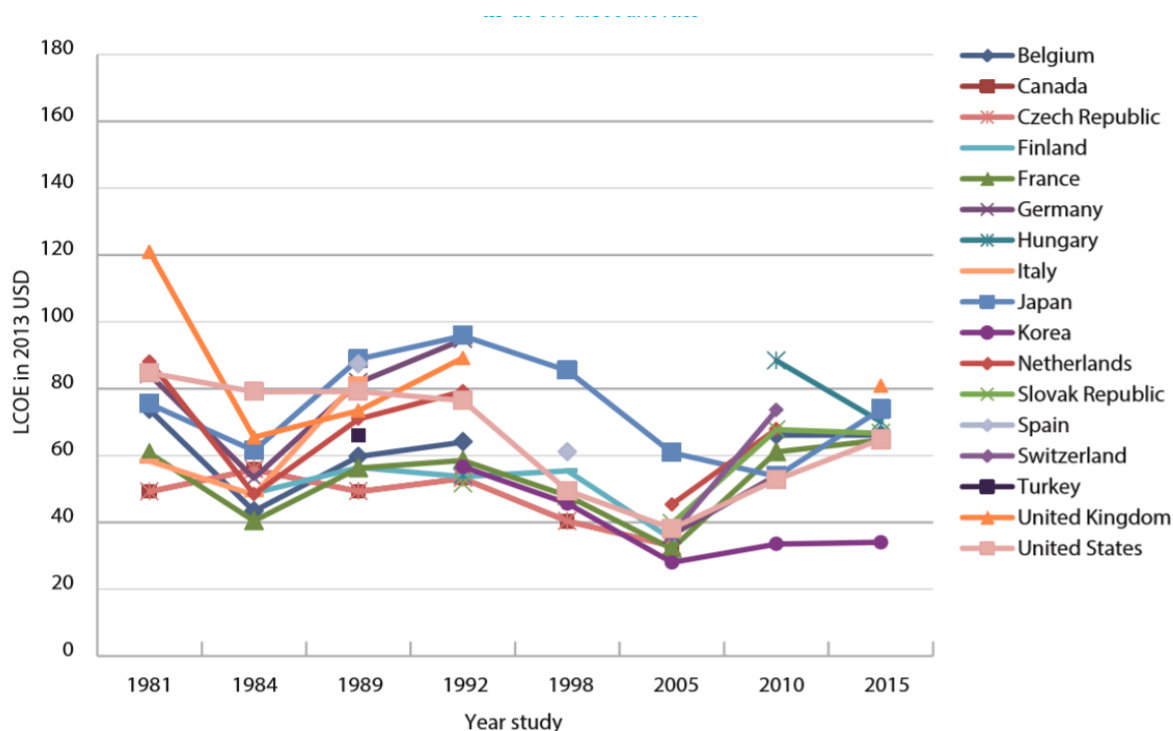


Gráfico 17: LCOE histórico para países OECD, 5% para la energía nuclear. Fuente: IEA / OECD-NEA (2015).

82 "Projected Costs of Generating Electricity": estudio consideró 11 centrales nucleares pertenecientes a 10 países distintos. No se especifica tipo de tecnología.

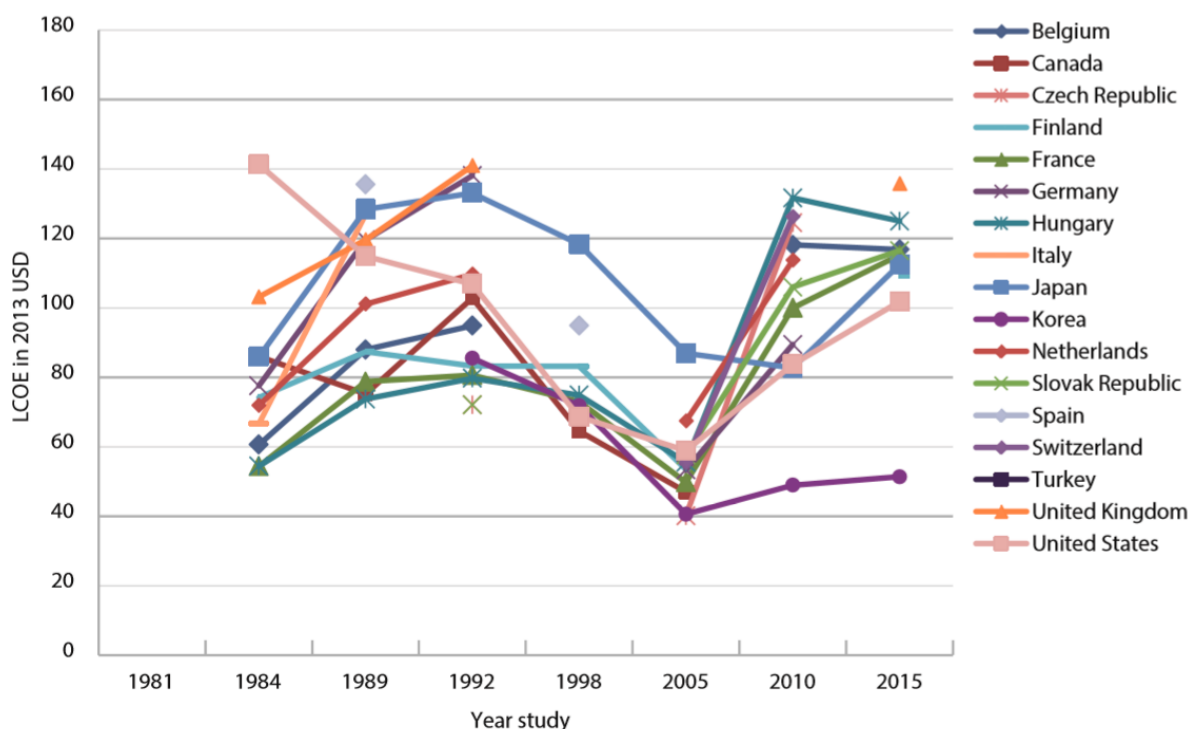


Gráfico 18: LCOE histórico para países OECD, 10%. Fuente: IEA / OECD-NEA (2015).

Con respecto a países No-OECD, el informe de la IEA-NEA⁸³ presenta valores para China, que van entre 26 USD/MWh y 31 USD/MWh para una tasa del 3%, entre 37 USD/MWh y 48 USD/MWh al 7% y 49 USD/MWh y 64 USD/MWh al 10%.

3.6.2. Costo de inversión

El costo de inversión para proyectos de generación nuclear es relativamente más alto que para otros tipos de tecnología. Esto, debido a la necesidad de incorporar materiales, elementos, equipos y exigencias adicionales de seguridad. Dentro de este costo, se incluye el Costo Overnight, Costo de Financiamiento y Contingencias, siendo el primero de estos el principal componente del costo total de inversión.

El rango en que se mueven estos costos es extenso, ya que incluye reactores de diversos diseños, así como consideraciones y condiciones específicas de cada país, como mano de obra, regulación y condiciones económicas locales.

3.6.3. Costo Overnight

Representa el costo de inversión, sin considerar financiamiento ni escalamiento. El rango en que se mueven los costos overnight es extenso, variando desde 2.021 USD/kWe en Corea hasta 6.215 USD/kWe en Hungría, para los países pertenecientes a la OECD.

Entre los países no OECD, China presenta los valores más bajos, alcanzado el rango de 1.807 USD/kWe y 2.615 USD/kWe⁸⁴. La tabla 3 presenta los costos overnight en comparación con otras tecnologías de generación:

83 International Energy Agency / OECD Nuclear Energy Agency, *Projected Costs of Generating Electricity*, 2015.

84 International Energy Agency / OECD Nuclear Energy Agency, *Projected Costs of Generating Electricity*, 2015.

Tecnología	N° de plantas	Capacidad Neta ³ (MWe)				Costo Overnight ⁴ (USD/kWe)			
		Mín	Prom	Med	Máx	Mín	Prom	Med	Máx
Gas Natural - CCGT	13	350	551	475	900	627	1.021	1.014	1.289
Gas Natural - OCGT ⁵	4	50	274	240	565	500	708	699	933
Coal	14	605	1.131	772	4.693	813	2.080	2.264	3.067
Nuclear	11	535	1.434	1.300	3.300	1.807	4.249	4.896	6.215
Solar PV ⁶ - Residencial	12	0,003	0,007	0,005	0,02	1.807	2.379	2.297	3.366
Solar PV - Comercial	14	0,05	0,34	0,022	1	728	1.583	1.696	1.977
Solar PV - Gran	4	1	19,3	2,5	200	937	1.555	1.436	2.563
Solar Térmico (CSP ⁷)	4	50	135	146	200	3.571	5964	6.072	8.142
Eólica Marina	21	2	38	20	200	1.200	1.911	1.804	2.999
Eólica Terrestre	12	2	275	223	833	3.703	4.985	4.998	5.933
Hidroeléctrica de Pasada	12	0,4	3,1	2	10	1.369	5.127	5.281	9.400
Hidroeléctrica	16	11	1.093	50	13.050	598	3.492	2.493	8.687
Geotérmica	6	6.8	62	27	250	1.493	4.898	5.823	6.625
Biomasa y Biogás	11	0.2	154	10	900	587	4.447	4.060	8.667

Tabla 3: Estadísticas para distintas tecnologías de generación. Fuente: IEA / OECD-NEA (2015).

3.6.4. Costo de Financiamiento

El costo de financiamiento está directamente relacionado con el período de construcción, así como con las condiciones de deuda pactadas. Por el tamaño de la inversión y los largos períodos de construcción, los costos financieros representan al menos un 10% de la inversión inicial⁸⁵, por lo que resultan fundamentales las condiciones de financiamiento que se puedan pactar, ya que esto tendrá gran impacto en el costo total del proyecto. Un estudio de la Universidad de Chicago⁸⁶, arrojó, para un período de construcción de 5 años, que el interés acumulado llega a un 30% del total de los costos, mientras que para un período de construcción de 7 años, puede alcanzar el 40%.

La forma para financiar un proyecto nuclear dependerá en gran medida del modelo de propiedad de la planta y de la naturaleza del mercado energético en el cual esté inserta. Los mercados energéticos varían en su nivel de regulación, lo que puede afectar de manera significativa las opciones de financiamiento disponible, debido a distinta asignación y cuantificación del riesgo de los distintos actores del proyecto. En mercados regulados las empresas podrán acceder más fácilmente a deuda, mientras que en mercados desregulados deberán recurrir a un mayor grado de emisión de acciones para financiarse⁸⁷.

En cualquiera de los casos, el apoyo del gobierno resulta fundamental para la viabilidad financiera del proyecto, el que puede darse a través de la participación en la propiedad de la central (totalidad o parte), como también en la entrega de garantías para préstamos con terceros. Esto contribuirá a reducir la percepción de riesgo de las posibles entidades financieras, lo que permitirá acceder a mejores condiciones de financiamiento.

Asimismo, el Estado puede instaurar políticas que ayuden a cuantificar y considerar los costos externos medioambientales y del sistema de cada una de las tecnologías, con lo que el beneficio económico de la tecnología nuclear podría ser más visible para los potenciales inversionistas.

85 IDOM-CCHEN, *Estimación de costos y análisis de rentabilidad del proyecto de implantación de una central nuclear en Chile*, 2017.

86 Universidad de Chicago, *The Economic Future of Nuclear Power*, 2004.

87 World Nuclear Association, *Nuclear Power Economics and Project Structuring*, 2017.

3.6.5. Costo de contingencias

Con respecto a los Costos de Contingencia, para la tecnología nuclear, estos se estiman en un 15% de los Costos Overnight, a diferencia de las otras tecnologías de generación donde generalmente se asume un 5%⁸⁸.

3.6.6. Costos de operación

Mientras el costo de inversión de la tecnología nuclear es elevado, el costo de operación es considerablemente más bajo que para otras tecnologías de generación, siendo solo superadas por aquellas que no requieren combustible para su operación, como la energía eólica o solar. En Estados Unidos, el costo de operación de las centrales nucleares se encuentra en el rango de los 2,4 cent/KWh, mientras que en Europa se ha llegado a valores tan bajos como 1 Cent-Euro/KWh, situación de Finlandia y Suecia⁸⁹.

Costo de combustible

Una de las características de la energía nuclear es su gran densidad energética, lo que implica que se requiere muy poco combustible para generar una gran cantidad de energía (1 kg de Uranio natural puede generar 200.000 veces la cantidad de energía de lo que genera 1 kg de carbón)⁹⁰. Por ello, y contrariamente a lo que ocurre con otras tecnologías, el costo del combustible nuclear tiene un bajo impacto sobre el LCOE por lo que, pese a que el mercado del uranio suele ser bastante estable, incluso si este se encareciese sustancialmente, su impacto sería acotado⁹¹.

El gráfico 19 es un ejemplo del efecto que tendría el incremento del precio del uranio en el costo del combustible. Así, si se doblara el precio del uranio, por ejemplo de \$25 a \$50 USD/lb U_3O_8 , solo produciría un incremento en el precio del combustible de 5 a 6,2 USD/MWh, trayendo con ello, un incremento en el costo de generación de 13 USD/MWh a 14,2 USD/MWh⁹², no más de un 10%. Si bien, existe un impacto, este es mínimo comparado con lo que ocurre en otro tipo de tecnologías.

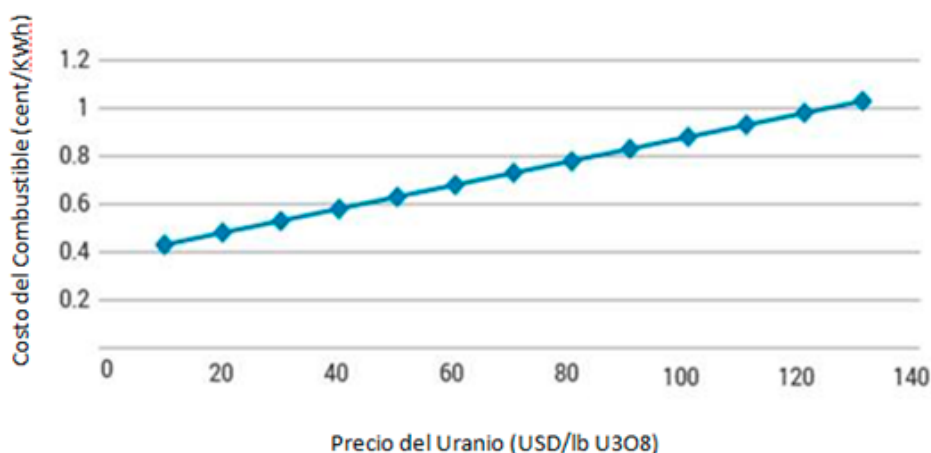


Gráfico 19: ejemplo efecto del precio del uranio U_3O_8 (USD/lb) en el Costo del Combustible.

Fuente: World Nuclear Association (2019)

88 International Energy Agency / OECD Nuclear Energy Agency, *Projected Costs of Generating Electricity*, 2015.

89 World Nuclear Association, *Nuclear Power Economics and Project Structuring*, 2017.

90 World Nuclear Association, *Economics of Nuclear Power*, 2019.

91 IDOM-CCHEN, *Modelo y estimación de Costos para la implantación de una central nuclear en Chile*, 2017.

92 World Nuclear Association, *Economics of Nuclear Power*, 2019.

Como referencia, el precio de la libra de U_3O_8 a diciembre de 2019 rondaba los 25 USD/lb. Asimismo, como se aprecia en el gráfico 20, con excepción de la llamada “Burbuja de Uranio”, ocurrida en 2007, estos precios se han caracterizado por mantenerse relativamente estables en el tiempo.

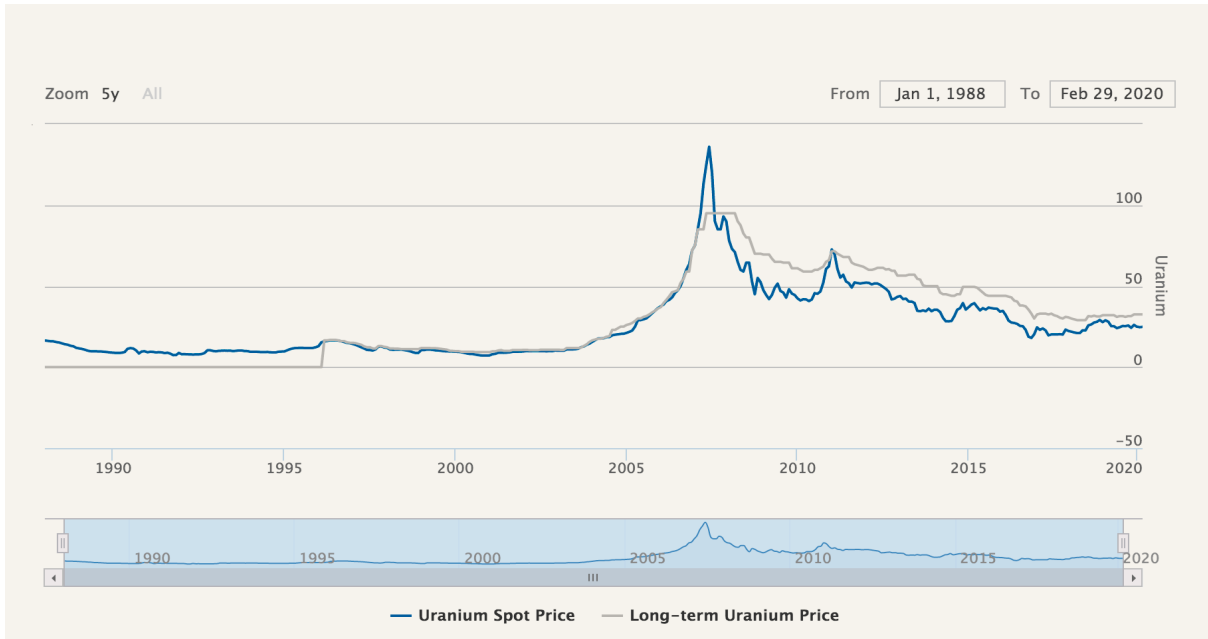


Gráfico 20: variación del precio al uranio en el tiempo. Fuente: Cameco (2020)⁹³.

De forma adicional a lo requerido para la fabricación del combustible, o front-end, (minería, enriquecimiento y fabricación del combustible), se debe considerar también el back-end, que implica todo lo relacionado con la gestión de combustible gastado y su almacenamiento. Los valores generalmente utilizados, a nivel internacional, para estos costos corresponden a 7 USD/MWh para el Front-end y 2,33 USD/MWh para el Back-end.

Costo de operación y mantenimiento (O&M)

Con respecto a los costos de Operación y Mantenimiento, la información internacional presenta una gran dispersión, tal como se presenta en la tabla 4:

Caso Mediana: Nuclear	Capacidad Neta (MWe)	Costo Overnight (USD/kWe)	Costos de Combustible (USD/MWh)	Costos Fijos de O&M (USD/MWe)	Costos Variables de O&M (USD/MWh)
Nº de países	11				
Conteo	11	11	9	5	10
Máximo	3.300	6.215	14	204.261	15
Mínimo	535	1.807	5,09	43.178	0,9
Promedio	1.434	4.249	9,74	100.169	7,8
Mediana	1.300	4.896	9,33	68.800	6,9
Delta	2.765	4.408	9,06	161.083	13,7

Tabla 4: Costos Tecnologías Nuclear para países OECD. Fuente: IEA / OECD-NEA (2015).

93 <https://www.cameco.com/invest/markets/uranium-price>

Para los nuevos diseños de reactores tipo SMR, los proveedores proyectan que los Costos de Operación y Mantenimiento totales serían menores que los de reactores de 2ª y 3ª generación que se encuentran operando actualmente⁹⁴. Asimismo, se proyecta que, debido a la estandarización, la simplicidad y automatización de los componentes, el personal operativo podría reducirse alrededor de 0,7 empleados por MW, inferior al promedio de la industria nuclear, el cual es aproximadamente 0,9 empleados por MW⁹⁵.

Resulta importante mencionar que los costos O&M se ven fuertemente influenciados por los requisitos regulatorios, los que pueden variar de país en país, dependiendo de las circunstancias. Estos pueden generar aumentos en los costos, por ejemplo, debido a mayores exigencias de inspecciones, elementos de protección, mayores requisitos de entrenamiento del personal o refuerzo de medidas de seguridad⁹⁶.

3.6.7. Otros costos

Desmantelamiento y clausura

El proceso de desmantelamiento y clausura es el que se lleva a cabo al final de la vida operativa de una central nuclear. Esto consiste en una serie de acciones y procesos técnicos y administrativos, que incluye desmantelamiento, demolición y limpieza, hasta llevar el sitio al estado de no requerir medidas de protección radiológica ni controles regulatorios. El costo de este proceso se estima entre un 10 y 15% del costo capital inicial, pero dado que se va descontando a lo largo de la vida operativa de la central, contribuye de forma marginal al costo de generación, estimándose en unos 0,1-0,2 cent/kWh⁹⁷.

Costos externos

Existen, además, otros costos externos que se relacionan con medio ambiente y salud. Tal como se presenta en el gráfico 21, la energía nuclear presenta montos muy reducidos, donde la tecnología nuclear es comparable a la energía eólica e hidroeléctrica, cuyos montos corresponden casi en su totalidad al resto de la cadena energética y no a la generación eléctrica. Por el contrario, tecnologías como el carbón y el petróleo, presentan altos costos externos, siendo casi la totalidad de ellos atribuibles a la generación eléctrica.

94 Geoffrey A.Black, Fatih Aydogan, Cassandra L.Koerner, *Economic viability of light water small modular nuclear reactors: General methodology and vendor data*, 2019.

95 OECD Nuclear Energy Agency, *Measuring Employment Generated by the Nuclear Power Sector*, 2018.

96 World Nuclear Association, *Nuclear Power Economics and Project Structuring*, 2017.

97 World Nuclear Association, *Economics of Nuclear Power*, 2019.

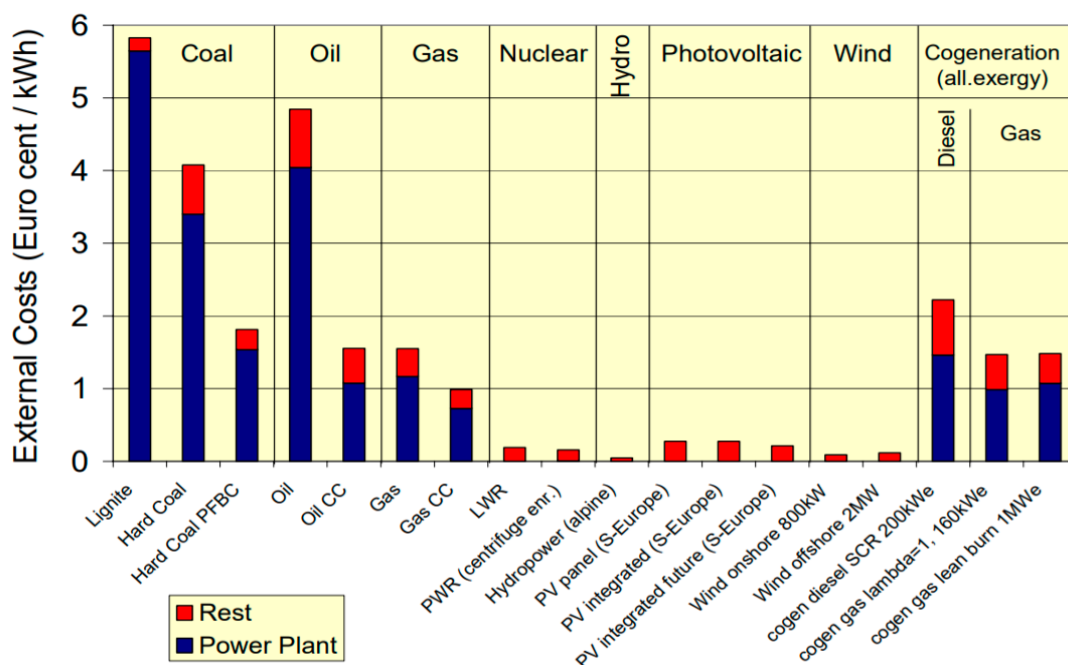


Gráfico 21: costos externos de sistemas energéticos asociados a emisiones de centrales de generación energética y resto de cadena energética. Fuente: European Community under the 'EESD' Programme (2015)⁹⁸.

3.6.8. Factores relevantes que influyen en los costos

Tiempo de construcción

El tiempo de construcción del proyecto constituye uno de los principales factores que históricamente han influido en la desviación de los costos presupuestados al inicio. El alargamiento del tiempo de construcción conlleva tener más tiempo a la mano de obra, ingeniería y gestión del proyecto contratada y un importante sobrecosto a nivel financiero al tener que alargar el período de préstamo y por lo tanto aumentar el valor de los intereses.

Un ejemplo es lo ocurrido con la construcción de la unidad 3 de la central nuclear Olkiluoto, Finlandia, primer proyecto de construcción de un reactor de tecnología EPR, que inició su construcción en agosto de 2005 con una fecha estimada para la puesta en marcha al 2010. A marzo del 2020, esta unidad aún no había sido puesta en operación, estimándose que su primera carga de combustible podría realizarse hacia mediados de este mismo año⁹⁹. Este retraso, de más de 9 años, ha significado un incremento de sus costos a casi el triple, cuya última estimación alcanzaba los 9,4 billones de euros¹⁰⁰, en comparación con los 3,2 billones de euros inicialmente proyectados.

Número de unidades

El factor de escala, asociado al número de unidades por central, presenta beneficios en todas las fases del ciclo de vida de la central, puesto que se optimiza el uso de recursos humanos y de materiales, tanto en el propio emplazamiento como en los suministradores. El estudio IDOM¹⁰¹ considera, para la fase de construcción y de desmantelamiento, el factor de escala definido en la siguiente tabla:

98 European Community under the 'EESD' Programme, *Externalities of Energy: Extension of accounting framework and Policy Applications*, 2015.

99 World Nuclear News <https://world-nuclear-news.org/Articles/TVO-contracts-Framatome-for-Olkiluoto-3-long-term>

100 World Nuclear Association, *Nuclear Power in Finland*, 2019.

101 IDOM-CCHEN, *Modelo y estimación de Costos para la implantación de una central nuclear en Chile*, 2017.

1 unidad	2 unidades	3 unidades	4 unidades
1,16	1,00	0,9	0,83

Tabla 5: Factor de escala por número de unidades para LWR y HWR. Fuente: IDOM (2017).

Por su parte, en su fase de operación, la reducción al pasar de 1 unidad a 2 unidades se estima mayor (Tabla 6):

1 unidad	2 unidades	3 unidades	4 unidades
1,30	1,00	0,9	0,83

Tabla 6: Factor de escala por N° de unidades para los costos de operación. Fuente: IDOM (2017).

Para los reactores SMR por su parte considera lo siguiente:

1 unidad	2 unidades	3 unidades	4 unidades	5 unidades	6 unidades	8 unidades	12 unidades
1,244	1,135	1,071	1,025	0,990	0,961	0,916	0,852

Tabla 7: Factor de escala por número de unidades para LWR y HWR. Fuente: IDOM (2017).

Las proyecciones de la economía de este tipo de reactores dependerán del número de unidades producidas, como también de las curvas de aprendizaje para el proceso de fabricación y ensamblaje de las mismas que finalmente se logren alcanzar¹⁰².

Proceso de licenciamiento y permisos regulatorios

El proceso de otorgamiento de permisos y licencias para el emplazamiento, construcción y operación de una central nuclear constituye un proceso complejo y que puede tardar años, lo que se complejiza aún más si se trata de una tecnología nueva o si el organismo regulador no cuenta con experiencia previa en ello. Esto es particularmente relevante para tecnologías emergentes como Gen IV. Las tecnologías SMR, por su parte, se basan en tecnologías probadas del tipo LWR.

Históricamente, el otorgamiento de permisos y licencias ha sido un punto considerable de atrasos para la puesta en marcha de las centrales. En el caso de la central de Olkiluoto, el permiso de operación fue ingresado en abril de 2016 y el regulador otorgó la licencia en marzo de 2019, tras la presentación de una aplicación de 130.000 páginas con información técnica y operativa que incluía desde principios de seguridad y manejo de combustible gastado hasta la experiencia del operador y condiciones financieras¹⁰³.

Costos del sistema

Otro de los aspectos relevantes y que tradicionalmente no se considera con profundidad en los modelos de planificación energética, son los denominados Costos del Sistema. Estos son costos externos a la construcción y operación de la planta, pero deben ser pagados por el consumidor final, generalmente como parte del costo de transmisión y distribución. Estos costos consideran la interacción entre los diferentes tipos de tecnologías de generación y la infraestructura del sistema y representan el impacto que produce la introducción de cada una de las tecnologías dentro del sistema en su conjunto.

¹⁰² International Energy Agency / OECD Nuclear Energy Agency, *Projected Costs of Generating Electricity*, 2015.

¹⁰³ World Nuclear Association, *Nuclear Power in Finland*, 2019.

Las tecnologías renovables variables, como la eólica y solar fotovoltaica, pueden generar costos adicionales, como costos de transmisión y distribución, cuando estos se encuentran alejados de los centro de consumo; costos para mantener la estabilidad de sistema (*balancing cost*), con el fin de estar preparados ante cambios inesperados con respecto a la radiación solar o la velocidad del viento; y costos de mantención de una reserva en el sistema para las horas cuando el viento y radiación solar no están disponibles.

Esta variabilidad también implica cambios en la composición de las demás tecnologías de la red eléctrica, para asegurar un suministro seguro y permanente de energía. Para el caso de la tecnología nuclear, existen costos adicionales al requerir, por ejemplo, una conexión robusta a la red eléctrica y un acceso permanente a fuentes de enfriamiento. Estos costos, son considerablemente menores que aquellos de otras tecnologías.

Los costos del sistema para las energías renovables intermitentes se mueven en el rango de los 8-50 USD/MWh, dependiendo del país, contexto y tecnología. Para un sistema con 10% de energía renovable variable, los costos rondarán los 10 USD/MWh, mientras que para sistemas con 75% llegaría hasta los 50 USD/MWh. Por su parte, los costos del sistema de la tecnología nuclear son del orden de 1-3 USD/ MWh, aproximadamente¹⁰⁴. El gráfico 22 muestra una comparación de los costos del sistema en relación a los LCOE para distintos tipos de tecnologías en cuatro países:

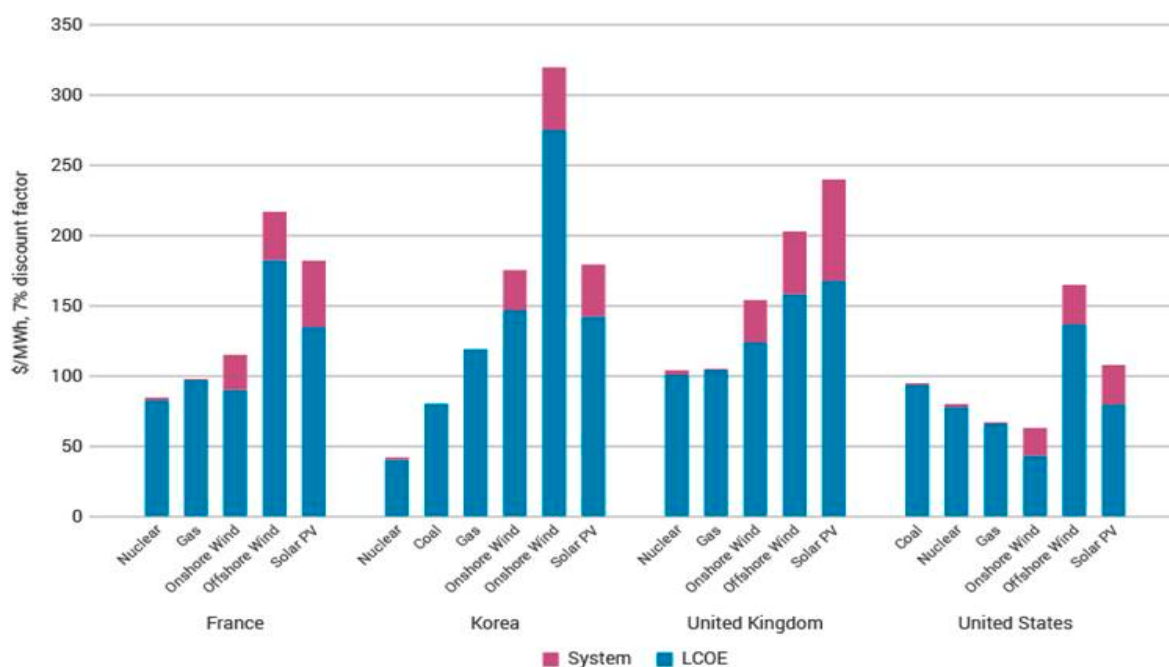


Gráfico 22: Comparativa de LCOE's para distintas tecnologías en 4 países (2012 y 2014)¹⁰⁵.
Fuente: OIEA (2016).¹⁰⁶

En el contexto actual, dado el proceso de descarbonización que se está llevando a cabo a nivel mundial, se requerirá de un despliegue masivo de tecnologías bajas en carbono, lideradas por las energías renovables variables, lo que traerá consigo la necesidad de reestructuración del sector energético.

104 OECD Nuclear Energy Agency, *The Costs of Decarbonisation: System Costs With High Shares of Nuclear and Renewables*, 2019.

105 Los costos LCOE se han tomado de Projected Costs of Generating Electricity, IEA 2015. Los costos del sistema han sido tomados de OECD Nuclear Energy Agency (2012). "Nuclear Energy and Renewables".

106 IAEA Planning and Economics Studies Section (PESS), Reunión Técnica: "TM on Socio-Economic Aspects of Nuclear Cogeneration, Austria, 21-23 Noviembre 2016.

Este nuevo contexto ha relevado la importancia de la consideración de los costos del sistema, lo cual exige, al mismo tiempo, una mejora o adecuación de los modelos de planificación energética y los diseños de los mercados, de modo que estos aspectos puedan ser cuantificados y considerados para una correcta toma de decisiones y planteo de políticas energéticas¹⁰⁷.

Según el estudio de la World Nuclear Association¹⁰⁸, en los casos en que los costos externos y del sistema son incluidos en las consideraciones, la competitividad de la tecnología nuclear se incrementa. Por ello, para que las características de la energía nuclear puedan ser consideradas adecuadamente, se requiere de políticas que aborden los problemas de diseño de los mercados de modo de otorgar reconocimiento monetario a aspectos relevantes que posee la energía nuclear, tales como confiabilidad, seguridad y generación con cero emisiones.

3.7. Consideraciones para la determinación de la viabilidad económica en Chile

3.7.1. Costos estimados para Chile

En 2017, se realizó el estudio **“Modelo y estimación de Costos para la implantación de una central nuclear en Chile”** (IDOM - CCHEN), para determinar los costos que tendría un proyecto de energía nuclear de potencia operando en el país. El estudio fue realizado teniendo en cuenta Estructuras de Referencia (o Code of Accounts - COA)¹⁰⁹, típicamente utilizadas en la valoración de costos de proyectos de nueva construcción en el sector nuclear, así como datos disponibles del sector, documentación de diferentes proveedores de tecnología y explotadores de centrales nucleares, y contacto directo con algunos de estos.

Asimismo, se realizó un análisis de sensibilidad identificando factores con impacto sobre el costo del ciclo de vida de una central nuclear y la rentabilidad del proyecto, de modo de cuantificar este impacto. También, se analizó el impacto de ciertos riesgos para la rentabilidad del proyecto. Partiendo de un análisis de riesgos típicos en proyectos nucleares a nivel internacional y considerando también grandes proyectos, de otras tecnologías, realizados en Chile, se definen una serie de riesgos y se le asigna una variable crítica a cada uno.

Para la evaluación se consideraron cuatro (4) escenarios de referencia para tecnologías nucleares tipo LWR, HWR y SMR, según lo que se muestran a continuación en la siguiente tabla:

107 OECD Nuclear Energy Agency, *The Costs of Decarbonisation: System Costs With High Shares of Nuclear and Renewables*, 2019.

108 World Nuclear Association, *Nuclear Power Economics and Project Structuring*, 2017

109 Generation IV International Forum, *Cost Estimating Guidelines for Generation IV Nuclear Energy Systems*, 2013. Documento que surge de una reformulación de la estructura propuesta por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), localizada en el documento Bid Invitation Specifications for Nuclear Power Plants.

Característica	Escenarios de referencia			
	LWR	HWR	SMR	LWR
Período de construcción (años)	6	6	4	6
Tipo de Tecnología	-	-	PWR	-
Estado de desarrollo	NOAK	NOAK	NOAK	NOAK
Unidades por emplazamiento	2	2	4	2
Potencia Media por reactor (MWe)	1.200	1.200	100	600
Tecnología de desmantelamiento	DECON	DECON	DECON	DECON
Ciclo de combustible	Abierto	Abierto	Abierto	Abierto
Factor de planta (%)	90	90	95	90
Terremoto de parada segura	0,3g	0,3g	0,3g	0,3g
Tasa de descuento	6%	6%	6%	6%
Participación				
Público	100%	100%	100%	100%
Privado	0%	0%	0%	0%
Estructura de Capital				
Fondos Ajenos	60%	60%	60%	60%
Fondos Propios (Equity)	40%	40%	40%	40%

Tabla 8: Escenarios de referencia utilizados en estudio “Modelo y estimación de Costos para la implantación de una central nuclear en Chile”, IDOM, 2017.

El estudio realizado arroja que el reactor tipo LWR de 1.200 MW aparece como la opción con menor LCOE entre los casos analizados, pese a que el escenario con cuatro (4) SMR de 100 MW sería el que requeriría una inversión inicial menor (tabla 9).

Caso		LWR 2 x 1200 MW	HWR 2 x 1200 MW	SMR 4 x 100 MW	LWR 2 x 600 MW
Potencia total (MW)		2.400	2.400	400	1.200
LCOE (USD/MWh)*		79,7	84,0	91,7	103,3
Inversión inicial	(USD/kWe)	5.136	5.660	5.837	6.875
	M\$USD	12.584	13.584	2.335	8.250

Tabla 9: Costo estimado de implementación de una central nuclear en Chile. *Tasa de descuento del 6%. Fuente: IDOM (2017).

Adicionalmente, el estudio concluye que los valores de LCOE obtenidos para Chile son coherentes con los datos encontrados en la industria, según se presenta en el gráfico 23. Para una tasa del 7%, si bien se encuentran dentro del rango alto respecto datos a nivel internacional, parcialmente debido al sobre costo que suponen los altos requerimientos sísmicos en el país. Dichos requisitos le significarían al proyecto chileno entre 6 a 8 USD/MWh adicionales respecto a países con menores riesgos sísmicos.

Además, el estudio incluye, dentro del costo de implantación de la central nuclear, la construcción de la infraestructura de conexión a la red eléctrica, que normalmente no es responsabilidad directa del propietario de la central. Sin estos costos, el LCOE bajaría entre 1,5 y 2 USD/MWh más.

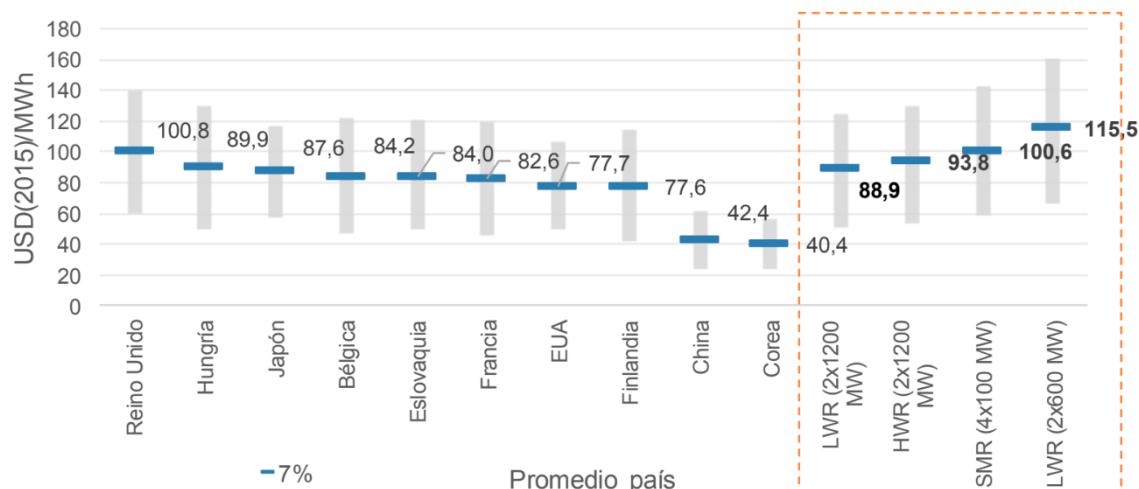


Gráfico 23: comparativa de LCOE a tasa 7% para los distintos escenarios analizados. Fuente: IDOM (2017).

De acuerdo con el análisis de sensibilidad sobre el LCOE (gráfico 24), el factor de planta constituye el parámetro que más influye sobre el valor calculado. Así, para aumentar la rentabilidad de la planta es importante que se asegure por un lado la fiabilidad y la disponibilidad de la planta, y por el otro, la demanda de electricidad por parte del mercado. En caso contrario, la rentabilidad de una central baja sustancialmente, al ser el grueso de sus costos, costos fijos.

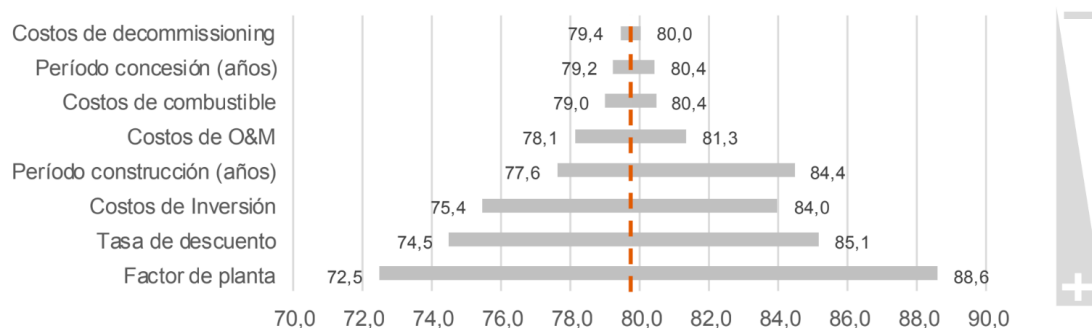


Gráfico 24: sensibilidad del LCOE a un 10% de variación. Fuente: IDOM (2017).

En cuanto a los costos a lo largo de todo el ciclo de vida de una central nuclear, queda patente que el que mayor impacto tiene sobre el LCOE es el costo de inversión (gráfico 25). Esto responde al hecho de que la energía nuclear es muy intensiva en capital.

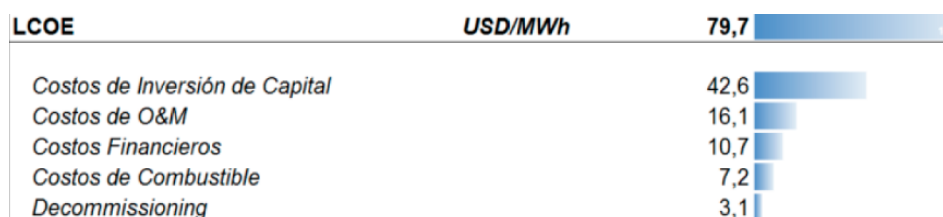


Gráfico 25: peso de cada concepto principal de costo en el LCOE de un reactor LWR en Chile. Fuente: IDOM (2017).

La potencia del reactor y el número de unidades por planta permiten interactuar con la economía de escala. Así, a mayor potencia y mayor número de unidades por planta, se obtiene menor LCOE y mayor rentabilidad del proyecto, pero también resulta en una mayor inversión absoluta.

Cabe mencionar que la información recogida para la realización de este estudio es extensa para el caso de LWR de potencias entre 1.000 y 1.400 MW puesto que son los modelos que más se han implantado. Sin embargo, para el caso de las centrales HWR, la información de construcción disponible es escasa y desactualizada, al existir poca experiencia en los últimos años a nivel internacional con este tipo de reactores.

En cuanto a los SMR, al no haberse construido ni operado ninguno aún, los costos reales podrían ser muy diferentes en el futuro, según evolucione el concepto. Así, los valores obtenidos en este estudio podrían variar, en caso de contar con datos más precisos y actualizados, de diseños concretos, estudios detallados de la participación local y su impacto en los costos del proyecto, entre otros.

3.7.2. Ejercicio de Modelación 2018

De forma adicional al ejercicio de estimación de los costos realizado en 2017, se buscó determinar la competitividad que la energía nuclear podría tener ante otras tecnologías existentes en la matriz eléctrica nacional. Para ello, el año 2018 se realizó un ejercicio de modelación¹¹⁰ para evaluar la posibilidad de operación que tendrían distintos tipos de tecnología nuclear en la matriz eléctrica, considerando reactores tipo LWR, HWR y SMR, bajo los escenarios de la “Planificación Energética de Largo Plazo 2018-2022 (PELP)” y parámetros asociados a la tecnología nuclear recopilados del informe de costos desarrollado por la consultora IDOM Nuclear Services durante el año 2017¹¹¹.

De forma paralela a los escenarios que utiliza la PELP, se define un escenario adicional (escenario F), según se muestra en la tabla 10, adecuado principalmente para evaluar el desarrollo de la tecnología nuclear, pero con los mismos valores base y tendencias de la última publicación de la PELP. Se consideró, además, un aumento de costos del 12% por adaptación a condiciones sísmicas locales, es decir, costos asociados de pasar de condiciones de diseño de 0,3g a 0,6g.

Factores	Escenario A	Escenario B	Escenario C	Escenario D	Escenario E	Escenario F
Disposición social para proyectos y salida de centrales a carbón	+ Costo y con carbón CCS	Libre	+ Costo y con carbón CCS	+ Costo	+ Costo	+ Costo
Demanda energética	Bajo	Alta	Media	Baja	Alta	Alta
Cambio tecnológico en almacenamiento en baterías	Alto	Bajo	Medio	Medio	Alto	Bajo
Costos de externalidades ambientales	Actual	+Alto	Actual	Actual	+Alto	+Alto
Costos de inversión de tecnologías renovables	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Alto
Precio de combustibles fósiles	Medio	Alto	Bajo	Bajo	Alto	Alto

Tabla 10: Escenario utilizados para modelación 2018. Fuente: Ministerio de Energía / CCHEN (2018)¹¹².

110 Modelación realizada por División de Prospectiva y Análisis de Impacto Regulatorio del Ministerio de Energía, y la Oficina Desarrollo Estratégico y Energía Nuclear de Potencia de la Comisión Chilena de Energía Nuclear.

111 IDOM - CCHEN, *Modelo y estimación de Costos para la implantación de una central nuclear en Chile*, 2017.

112 Ministerio de Energía - CCHEN, *Informe Resultado modelaciones*, 2018.

Los resultados de las simulaciones de los cinco (5) escenarios originales (A al E), con la incorporación de la tecnología nuclear, no presentan cambios en ninguno de los resultados respecto a lo obtenido en el proceso de la PELP vigente.

Con respecto al escenario F adicional, se obtiene una reducción de inversiones en generación renovable, principalmente a partir del año 2035¹¹³, influenciada en parte por la entrada de los sistemas de almacenamiento, producto de la tendencia a la baja del costo de inversión que considera este escenario adicional, las cuales traspasan energía entre el día y la noche, complementando así la generación solar, entre otras.

Finalmente, dentro de los seis (6) escenarios simulados (A al F), y considerando los supuestos implementados, en ninguno de ellos se observa a la tecnología nuclear de forma competitiva para formar parte de los planes de obras de generación proyectados.

A continuación, se presenta la proyección del LCOE de las distintas tecnologías que se consideran como posibles en la expansión de la matriz energética para las simulaciones. En el gráfico 26, el área en verde representa el rango en que se encuentra el costo nivelado de la tecnología nuclear LWR, dependiendo de la configuración de uno o cuatro módulos de 600 MW y 1.600 MW, respectivamente, (entre 1x600 MW a 4x1.600 MW), se logra apreciar que el LCOE está, principalmente, entre 80 y 130 USD/MWh.

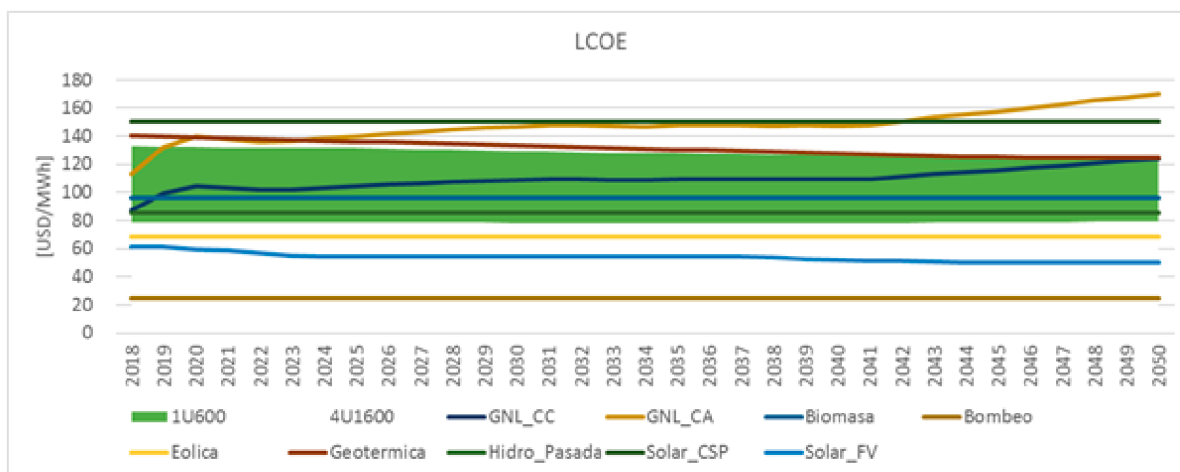


Gráfico 26: comparación de LCOE de la tecnología nuclear LWR y otras, para el escenario F.
Fuente: Ministerio de Energía / CCHEN (2018).

En la gráfico 27, se presenta el rango del LCOE de la tecnología nuclear SMR, el cual está ubicado, principalmente, entre 85 y 120 USD/MWh, dependiendo de la configuración de sus módulos (entre 1x100 MW a 12x100 MW). Esta diferencia en los precios de los módulos, se debe, en gran medida, a la existencia de economías de escalas dentro del precio de la tecnología nuclear.

113 Ministerio de Energía - CCHEN, *Modelación Viabilidad Económica de una Central Nuclear en el Mercado Eléctrico Nacional - Etapa 1*, 2018.

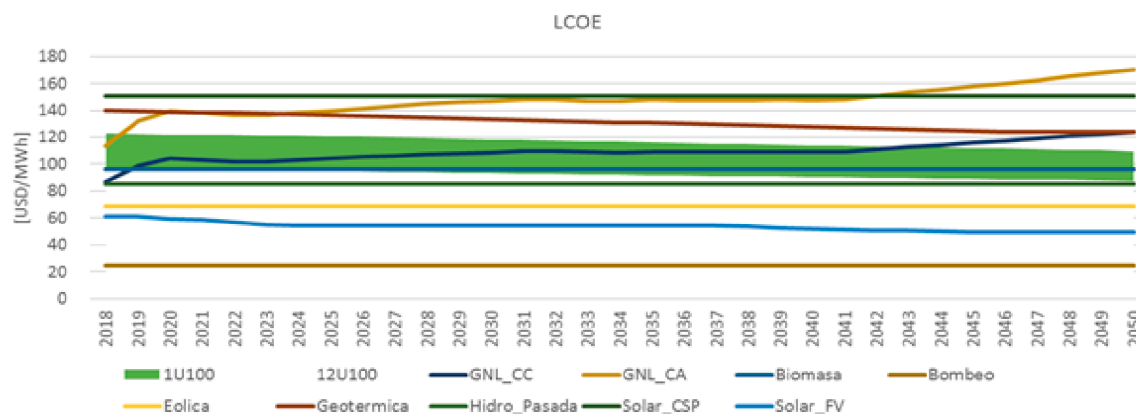


Gráfico 27: comparación de LCOE de la tecnología nuclear SMR y otras, para el escenario F.
Fuente: Ministerio de Energía / CCHEN (2018).

Los resultados de esta modelación arrojaron que, bajo los supuestos considerados, ninguna de las tecnologías nucleares resulta competitiva con respecto a la tecnología solar, eólica e hidráulica, que aparecían recomendadas dentro de los planes de obras de cada escenario.

Los resultados presentados dan cuenta que, desde el punto de vista económico, no resultaría óptima la instalación de plantas nucleares en el horizonte de 30 años analizado. Ambas tecnologías, tanto la LWR como la SMR, tienen un LCOE que está por sobre las tecnologías renovables, en cualquiera de sus configuraciones y, por ende, debe competir con otras tecnologías consideradas como centrales de base: geotérmica, biomasa, GNL CC, GNL CA, Solar CSP, etc.

Dado el análisis de sensibilidad obtenido respecto a la tecnología nuclear, una planta de este tipo, al disminuir su factor de planta tipo a uno de 50%, evidencia un incremento del LCOE en aproximadamente 55 USD/MWh su valor base, por lo que, ante un requerimiento de aporte de energía en condiciones de alta demanda neta, o en condiciones específicas del sistema eléctrico, esta tecnología pierde competitividad en relación a una planta de ciclo combinado, y por tanto se instala capacidad en base a GNL en lugar de nuclear. Esto explica que el plan de obras resultante no contemple ninguna planta nuclear en todo el horizonte de estudio.

A pesar de lo anterior, el proceso concluyó que la tecnología SMR es la que tiene mejores posibilidades para instalarse en Chile, debido a que tiene bloques de potencia de menor tamaño, acordes al mercado nacional, y que no provocaría mayores medidas de seguridad de suministro a las ya existentes.

3.7.3. Ejercicio de Modelación 2019

Durante el año 2019, se realizó un nuevo ejercicio de modelación, esta vez considerando solo tecnologías del tipo SMR, seleccionando un modelo en específico. Dadas las características de diseño de los SMR, este tipo de reactores podrían tener ventajas competitivas respecto a los reactores nucleares tradicionales, debido a su menor requerimiento de inversión inicial y mayor capacidad de manejo del proyecto, ya que las características de modularidad de estos diseños permiten traspasar una importante parte del riesgo financiero del proyecto al fabricante de los componentes. De esa forma, el proyecto podría ser más atractivo para potenciales inversionista y disminuir así barreras y/o condiciones de financiamiento.

Asimismo, dada su característica de modularidad se espera una reducción considerable de los tiempos de construcción, un mejor control de calidad y menores riesgos en el montaje, al tratarse de procesos conocidos y estandarizados, además de lograr economía debido a la producción en serie de este tipo de reactores.

Para la modelación realizada en 2018 se utilizaron los costos de SMR propuestos en el estudio de IDOM¹¹⁴, los que fueron obtenidos aplicando un factor de escala sobre los costos de las tecnologías convencionales. Para este nuevo ejercicio 2019, se utilizó un modelo de reactor específico como referencia (NuScale) y se trabajó en la búsqueda individual de cada uno de los valores, según lo que más se ajustara a dicho modelo.

Los parámetros y supuestos utilizados en la presente modelación corresponden a los utilizados en el “Informe de Actualización de Antecedentes 2019 (IAA-2019)” que realiza el Ministerio de Energía, como parte de la actualización de los resultados obtenidos en la Planificación Energética de Largo plazo (PELP) 2018-2022.

Si bien, en la primera etapa se utilizaron las tendencias correspondientes al proceso 2018-2022, en esta se utilizaron los parámetros aplicados en el proceso de actualización de la IAA-2019, ya que esta corresponde a la mejor información disponible, considera cambios en las tendencias económicas, infraestructura existente, demanda energética, y además, se incluyen los escenarios de retiro de centrales a carbón y un escenario extra (F), que corresponde a un escenario “Alto” para “Cambio tecnológico en almacenamiento en baterías”.

Todos los escenarios considerados en este ejercicio fueron simulados en la plataforma Ameba de SPEC Energy Consulting, y se consideró optimización conjunta entre generación y transmisión, además de la misma tasa descuento del 6%, utilizada en la modelación anterior y con el impuesto incorporado dentro del costo variable cuando el escenario lo incluye.

Para efectos de la modelación, se define un tren de inversiones que representa dos (2) centrales de 300 MW cada una, que se construyen en bloques de 60 MW por año. Esto significa que el primer bloque de 60 MW de la primera central se construye en 2023, y la segunda central introduce su primer bloque de potencia en 2025, donde ambas crecen anualmente en 60 MW adicionales hasta que completan los 300 MW cada una. A modo de simplificación en el modelo, algunos bloques se unifican de 60 a 120 MW.

Si bien en este ejercicio, a diferencia de la modelación anterior, se fuerza la entrada de una primera unidad al año 2023, los resultados arrojan que la tecnología nuclear, una vez instalada, resulta competitiva en todos los escenarios, operando como generación de base y con un alto factor de planta en todas las hidrologías. Esta representaría entre un 3% y 4% de la generación del sistema eléctrico nacional.

En el gráfico 28 se puede apreciar la participación de las unidades nucleares como tecnología base dentro de la generación futura de este escenario, debido principalmente a que poseen un bajo costo variable, lo que las hace competitivas con respecto a las tecnologías que usan gas natural.

Los resultados arrojan que las unidades SMR permanecen como generación base por todos los años, y para todos los escenarios. Este resultado fortalece la conclusión de que la principal barrera de entrada para este tipo de centrales son los costos de inversión, ya que desde el lado operacional son costo-eficientes para el sistema eléctrico, lo que las mantiene con un factor de planta mínimo de 85% para el escenario C, con una tendencia térmica; un 72% de factor de planta para el escenario E, con una tendencia renovable; y un 83% para el escenario F, con parámetros favorables para las nucleares (tabla 11).

114 IDOM - CCHEN, *Modelo y estimación de Costos para la implantación de una central nuclear en Chile*, 2017.

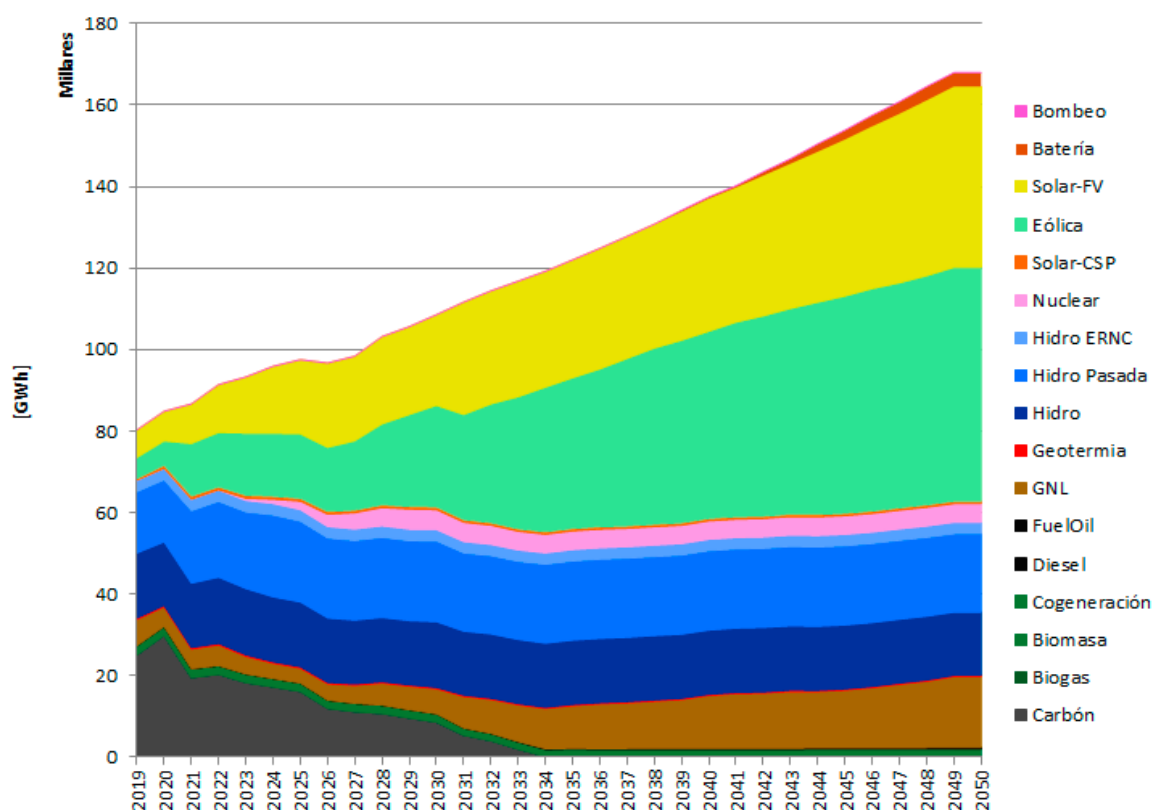


Gráfico 28: generación del escenario C con SMR, e hidrología media.

Fuente: Ministerio de Energía / CCHEN (2019).

Unidad Nuclear	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Nuclear SMR B1	99%	93%	87%	85%	87%	87%
Nuclear SMR B2	97%	91%	86%	85%	85%	85%
Nuclear SMR B3	99%	94%	87%	85%	87%	88%
Nuclear SMR B4	- ⁸	92%	87%	85%	88%	88%
Nuclear SMR B5	-	93%	87%	85%	86%	87%
Nuclear SMR B6	-	91%	87%	85%	86%	86%
Nuclear SMR B7	-	92%	86%	85%	86%	86%

Tabla 11: factor de planta de las unidades nucleares del escenario C, para la hidrología media.

Fuente: Ministerio de Energía / CCHEN (2019).

Sin embargo, es necesario mencionar que estos análisis se deben completar con una visión más detallada de la flexibilidad que requerirá el sistema a largo plazo, ya que no se modelaron las necesidades de rampa que la demanda neta impondrá con la gran participación de la tecnología solar futura, y las variaciones de la demanda eléctrica.

Es importante también destacar que los estudios y modelaciones realizados a la fecha no han considerado los costos del sistema, vale decir, el impacto de las distintas combinaciones de tecnologías en el sistema eléctrico en su conjunto. Esto constituye un área de análisis relevante, particularmente considerando la alta penetración que se espera que tengan las energías renovables variables a futuro y su requerimiento de almacenamiento.

Las centrales que finalmente se vayan incorporando al sistema dependerán de la evolución de los costos de inversión, y eventuales reconocimientos de otros atributos en función de las necesidades propias del sistema. En este contexto, la tecnología nuclear podría volverse competitiva, siempre y cuando pueda proveer estos otros atributos requeridos por el sistema eléctrico del futuro, tales como servicios complementarios y condiciones de flexibilidad que sean demandadas. En caso afirmativo, podrían evaluarse condiciones técnicas y económicas en que dichas remuneraciones sean reconocidas por los conceptos de seguridad y sostenibilidad del sistema, flexibilidad y otros, lo que pudiese darle una posición más competitiva a esta tecnología.

Por ello, las políticas que se puedan implementar a futuro pueden modificar la proyección de la competitividad de las diferentes tecnologías, particularmente de aquellas relacionadas a los requerimientos y exigencias que impondrá la lucha contra el cambio climático. Un ejemplo es lo que ocurre en algunos estados en Estados Unidos, donde se proporcionan pagos a las centrales nucleares a través de “créditos por cero emisiones” (ZEC)¹¹⁵, con los cuales se reconoce el valor de la energía nuclear debido a sus bajas emisiones, y sin el cual su operación no sería viable en dicho mercado.

3.8. Aspectos institucionales y regulatorios

3.8.1. Importancia de la institucionalidad y aspectos específicos a tener en consideración

Para lograr avanzar en el desarrollo de un PNP se requiere contar con una infraestructura nacional adecuada que incluya un marco legal y regulatorio que, entre otras materias, garantice que el uso de esta forma de energía no conlleve riesgos inaceptables para la población.

Si bien la responsabilidad principal de la seguridad de toda instalación nuclear reside en el operador de la misma -la cual no puede ser delegada en ninguna forma- es el gobierno de cada país quien debe procurar el establecimiento del adecuado marco legal y regulatorio para permitir la correcta implementación, operación, cierre y desmantelamiento de las instalaciones nucleares¹¹⁶. En este marco, el país deberá establecer estrategias, políticas e infraestructura necesaria de forma previa a la implementación del programa nuclear, todo lo cual dependerá del alcance y tipo de programa que se pretenda implementar.

Es importante mencionar que la infraestructura e institucionalidad relacionada con la seguridad nuclear¹¹⁷ (incluyendo seguridad tecnológica, seguridad física y salvaguardias) no es la única a considerar. También se debe revisar, por ejemplo, el marco normativo eléctrico y medioambiental, para verificar si existen las condiciones para que una central nuclear de potencia pueda ser evaluada y, posteriormente, operar en el mercado eléctrico, en igualdad de condiciones que las demás tecnologías de generación.

Para ello, se deben considerar todas aquellas entidades que tengan un rol en la regulación y operación del mercado eléctrico, y en todo lo relacionado con materia nuclear y asociado a la certificación y licenciamiento de centrales nucleares de potencia. Estas miradas deben ser recogidas y aterrizadas a la realidad y a aspectos de funcionamiento técnicos y económicos del mercado eléctrico chileno, dado que gran parte de la experiencia nuclear a nivel mundial se ha desarrollado en mercados actualmente regulados, o que lo fueron en sus etapas iniciales, lo que representa una clara diferencia con la realidad chilena y su mercado actual.

115 World Nuclear Association, *Economics of Nuclear Power*, 2019.

116 OIEA, *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*, 2014.

117 La ley de Seguridad Nuclear chilena define “Seguridad Nuclear” como “el conjunto de normas, condiciones y prácticas que tienen por objeto la protección de las personas, los bienes y el medio ambiente, contra riesgos radiológicos derivados del uso de la energía nuclear, de los materiales radiactivos y de otras fuentes de radiaciones ionizantes”.

3.8.2. Situación nacional

Con respecto al marco regulatorio que se aplica al sector eléctrico chileno, este ha sido diseñado y modificado a través del tiempo para ser abierto, competitivo, de carácter no discriminatorio a ninguna tecnología y centrado en la coordinación de un sistema en el que prima la seguridad del servicio, con una operación económica de sus instalaciones en la que se garantiza el acceso abierto a todas las instalaciones de transmisión. Por ello, en principio, no existen fundamentos de peso que permitan concluir que resulte necesario realizar una distinción particular para las centrales nucleares.

Según el estudio realizado por la CCHEN¹¹⁸, actualmente no existirían impedimentos en el marco regulatorio que restrinjan el desarrollo de un PNP en Chile. Sin embargo, si bien la regulación vigente, en principio no lo impide, esta presenta vacíos regulatorios, así como también aspectos que aún deben ser definidos, desarrollados o adaptados, lo que en la práctica hace que no resulte posible su implementación. Esto aplica al ámbito regulatorio eléctrico y al nuclear.

Con respecto al marco legal y regulatorio nuclear y radiológico, la Ley 18.302 “Ley de Seguridad Nuclear”, establece que *“la regulación, la supervisión, el control y la fiscalización de las actividades indicadas en el artículo anterior¹¹⁹ corresponderán a la Comisión Chilena de Energía Nuclear y al Ministerio de Energía en su caso”*.

Asimismo, el artículo N° 67 de la citada Ley establece que para las instalaciones radiactivas existen dos autoridades reguladoras: la CCHEN y el Ministerio de Salud (Minsal), donde a la CCHEN le corresponde fiscalizar las instalaciones de primera categoría¹²⁰ y las que estén dentro de una instalación nuclear, mientras que al Minsal las de segunda y tercera categoría¹²¹.

En términos de la normativa vigente que rige el actuar de la CCHEN y de sus regulados, esta se compone de las siguientes leyes y reglamentos:

1. Ley N° 18.302 de Seguridad Nuclear, 1984
2. Ley N° 16.319 “Crea la Comisión Chilena de Energía Nuclear”, 1965
3. Reglamentos asociados la Ley N°16.319:
 - Decreto Supremo N° 323/ 1974, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, “Licencias de la Comisión Chilena de Energía Nuclear”.
 - Decreto Supremo N°115/1976, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, “Normas básicas de protección radiológica”.
 - Decreto Supremo N° 450/ 1975, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, “Términos Nucleares”
4. Reglamentos asociados a Ley de Seguridad Nuclear:
 - Decreto Supremo N° 133/1984, del Ministerio de Salud, “Autorizaciones para instalaciones radiactivas o equipos generadores de radiaciones ionizantes, personal que se desempeña en ellas u opere tales equipos y otras actividades afines”
 - Decreto Supremo N° 3/1985, del Ministerio de Salud, “Protección radiológica de instalaciones radiactivas”
 - Decreto Supremo N° 87/1985, del Ministerio de Minería, “Protección física de las instalaciones y de los materiales nucleares”.
 - Decreto Supremo N° 12/1985, del Ministerio de Minería, “Transporte seguro de materiales Radiactivos”.
5. Normas técnicas asociadas a los reglamentos indicados.

118 CCHEN, *Identificación de barreras institucionales, regulatorias y de mercado asociadas al desarrollo de la nucleoelectricidad en el mercado eléctrico chileno*, 2018.

119 Ley 18.302/1984, *Ley de Seguridad Nuclear*, Art N°1.

120 Tales como aceleradores de partículas, plantas de irradiación, laboratorios de alta radiotoxicidad, radioterapia y roentgenterapia profunda, gammagrafía y radiografía industrial. Fuente: www.cchen.cl

121 Instalaciones de 2a Categoría: laboratorios de baja radiotoxicidad, rayos-X para diagnóstico médico o dental, radioterapia y roentgenterapia superficial. Tercera Categoría: Incluye los equipos de fuente sellada de uso industrial, fuentes patrones, estimuladores cardíacos radioisotópicos, marcadores o simuladores de uso médico, equipos de rayos-X para control de equipaje, correspondencia, etc., fluoroscopia industrial y difractómetros. Fuente: www.cchen.cl

Además, el país se ha adherido a los siguientes acuerdos multilaterales del régimen de seguridad global:

- Acuerdo sobre los privilegios e inmunidades del OIEA Aceptación (1987)
- Convención de Viena sobre responsabilidad civil por daños nucleares, Firmado (1988) y ratificado (1989)
- Convención sobre la protección física de los materiales nucleares, Adhesión (1994)
- Enmienda a la Convención sobre la protección física de los materiales nucleares, Aceptación (2009)
- Convención sobre la notificación temprana de accidentes nucleares, Firmado (1986) y ratificado (2005)
- Convención sobre asistencia en caso de accidente nuclear o emergencia radiológica, Firmado (1986) y ratificado (2004)
- Protocolo conjunto relativo a la aplicación del Convenio de Viena y el Convenio de París, Firmado (1988) y ratificado (1989)
- Convención conjunta sobre la seguridad en la gestión del combustible gastado y sobre la seguridad en la gestión de desechos radiactivos, Adhesión (2011)
- Convención sobre Seguridad Nuclear, Firmado (1994) y ratificado (1996)
- Código de conducta sobre la seguridad y la protección de las fuentes radiactivas, suscripción de apoyo (2004)

La CCHEN también ha firmado los siguientes acuerdos bilaterales:

- Acuerdo administrativo entre la Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear y la Comisión Chilena de Energía Nuclear para Importación y Exportación de Fuentes Radiactivas (2011).
- Declaración de intenciones entre el Departamento de Energía de los Estados Unidos y la Comisión Chilena de Energía Nuclear relacionada con la Gestión de Emergencias Nucleares y de Radiación y la Capacidad de Respuesta (2012).

Por otra parte, se ha sometido a evaluaciones de toda su infraestructura nuclear recibiendo evaluaciones en 2005 (RaSSIA¹²²); (ORPAS¹²³) en 2017; y el IRRS en 2018.

A pesar de la existencia de esta normativa, se detectan brechas que deberán ser cubiertas en caso de avanzar hacia la implementación de un PNP. Dentro de los principales puntos identificados en el estudio se encuentra que el marco legal actual no establece un organismo regulador efectivamente independiente¹²⁴, lo que constituye una de las barreras institucionales más relevantes para desarrollo de un PNP.

Los lineamientos y buenas prácticas internacionales requieren un organismo regulador independiente en la toma de decisiones relacionadas con seguridad y licenciamiento, y que exista una real separación funcional de las entidades que tienen responsabilidades o intereses que pudiesen influir indebidamente en su toma de decisiones.

Se requerirán por ello cambios en la orgánica de la actual CCHEN, de manera de considerar elementos tales como la independencia de las funciones de regulación e investigación y fomento de programas y tecnología nuclear, y contar asimismo con un organismo acorde a los desafíos de un estado moderno. Se debe considerar también el cumplimiento de la función como TSO (Technical Support Organization), que deberá cumplir CCHEN, que resulta de mucha relevancia para la sostenibilidad de un PNP.

Asimismo, hoy el marco regulatorio no establece explícitamente políticas gubernamentales ni estrategias en materia de seguridad relacionadas con los desechos radiactivos y la gestión del combustible gastado, el que incluye la clausura de las instalaciones.

122 Evaluación de Infraestructura de Seguridad y Protección Radiológica

123 Servicio de Evaluación de Protección contra Radiación Ocupacional

124 OIEA, *Integrated Regulatory Review Service (IRRS) Mission to Chile*, 2018.

Sin embargo, la Ley de Seguridad Nuclear y el Decreto Supremo N° 133/1984 emitido por Minsal, que reglamenta la autorización de instalaciones radiactivas, establece que el desmantelamiento y el cierre de las instalaciones nucleares y radiactivas de las categorías 1 y 2 requieren una autorización de desmantelamiento por parte del organismo regulador.

En este mismo ámbito, toda una nueva línea regulatoria deberá ser desarrollada para los procesos de licenciamiento y aprobación de permisos y concesiones para un PNP, ya que el actual cuerpo legal está diseñado para desarrollar aplicaciones de la tecnología nuclear en otras ramas del conocimiento, como son medicina, minería o agricultura.

Aspectos como la gestión del combustible, y los criterios asociados a su uso, desarrollados para el caso de reactores de investigación existentes en el país, deberían ser ampliados para los reactores de centrales nucleares de potencia. Lo mismo aplica para el proceso de licenciamiento, así como todos aquellos asociados al ciclo de combustible, independiente de cuales elementos del ciclo de vida sean incorporados en un eventual desarrollo del programa nuclear.

Adicionalmente, el marco regulatorio actual no establece explícitamente políticas gubernamentales ni estrategias en materia relacionadas con los desechos radiactivos, la gestión del combustible gastado, o el desmantelamiento de las instalaciones de la central. Este tampoco proporciona garantías financieras para la clausura ni para la gestión de fuentes radiactivas en desuso o generadoras de radiación.

Por su parte, la nueva normativa ambiental, ante la presencia de un proyecto nuclear, podría requerir la inclusión de incisos asociados a los riesgos de potencial contaminación y de aquellos asociados a radiación ionizante por potencial riesgo radiactivo, así como la normativa técnica asociada.

Resulta esperable que, al momento de iniciarse un PNP, al igual que lo ocurrido con cualquier nueva tecnología que ingresa al mercado, el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) desarrolle guías y procedimientos similares los existentes para otras tecnologías. En esta línea, se requerirá una coordinación entre distintas entidades, lo que presenta una diferencia fundamental con las centrales tradicionales.

Aquí es probable que la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) sea solo la etapa preliminar del proceso, o que la RCA definitiva sea facultada a la autoridad nuclear o sea un proceso multietapa. Aquí el organismo regulador nuclear podría eventualmente denegar una autorización, siendo esta última la que entrega el licenciamiento para la construcción, operación y desmantelamiento de infraestructura nuclear. Todo el sustento al proceso deberá ser elaborado e incorporado como parte de una modernización de la legislación nuclear, reglamentos y toda aquella norma y procedimiento que emane del órgano regulador nuclear cuando corresponda.

Otro punto pendiente se relaciona con los Seguros de Responsabilidad Civil, que constituye parte de los cambios necesarios en la Ley de Seguridad Nuclear, donde se presenta la necesidad de definir nuevos montos, distintos, o asociados a tecnología nuclear de potencia, que difieran de los montos de cobertura vigentes que presenta la Ley. Se podrían explorar algunas alternativas como acogerse a disposiciones descritas en los acuerdos y convenios internacionales.

Con ello definido, el inversionista podrá evaluar de mejor forma los costos asociados para contar con los seguros de responsabilidad civil necesarios. A la vez, se debe considerar el otorgamiento de beneficios a los primeros proyectos nucleares respecto a la cobertura que involucra los seguros, en virtud de mitigar los riesgos a los que se verán enfrentados.

Con respecto a la participación del Estado en el mercado de generación eléctrica, a inicios de 2016, se promulgó la Ley 20.897¹²⁵, que le permite al Estado, a través de Empresa Nacional del Petróleo ENAP, ingresar a la industria eléctrica, sustentada en la búsqueda de viabilizar las inversiones en capacidad de generación de base (como lo sería una central nuclear de potencia) así como aquellas obras de transmisión estratégicas y necesarias para el desarrollo del sector productivo y la economía del país. Si bien con ello el Estado puede ser parte del mercado eléctrico, el ambiente de alta competencia del sector hace que solo los proyectos de energía que sean económicamente competitivos se materialicen.

En el minuto que sean necesarias, se deberán realizar las modificaciones a los reglamentos emanados de la Ley de Seguridad Nuclear, así como su correspondencia en el mercado eléctrico, en términos de la operación segura y costo efectiva de las centrales nucleares.

La Ley eléctrica es clara en indicar que podrán establecerse exigencias distintas en función de la capacidad, tipo de tecnología, disponibilidad, impacto sistémico entre otros criterios técnicos de manera de mantener la integridad del sistema y su operación, segura, suficiente y económicamente adaptado. En este punto, es necesario enfatizar la relevancia de una correcta armonización y coherencia regulatoria. En efecto, cuando existen múltiples organizaciones relacionadas a un mismo proceso, se producen problemas de coordinación, de responsabilidades y definiciones sobre cuál es el orden correcto para desarrollar una política determinada.

En esta misma línea, se requerirá revisar también la normativa internacional, en específico aquellos tratados internacionales sobre seguridad nuclear que Chile ha firmado o ratificado o bien, que deberá adherir, dado que estos pueden incluir la realización de estudios de impacto ambiental en países vecinos, con el fin de establecer si las leyes y reglamentos los contienen, y si existe o no coherencia regulatoria.

Se deberá velar también porque futuras materias legales y reglamentarias no introduzcan distorsiones o complejicen un eventual PNP. El marco regulatorio, en materia nuclear y protección radiológica, debiese contar con una base y contenidos mínimos que garanticen que los cuerpos regulatorios futuros puedan ser extendidos en la medida que nuevas tecnologías o programas aterricen a la realidad chilena. Por tanto, debe evitarse la creación de barreras a la disrupción de nuevas tecnologías en el mediano o largo plazo, como lo podrían ser los reactores SMR, los que se estima serán comercializables a mediados de la próxima década.

Es importante aclarar que, prácticamente, la totalidad de los cambios requeridos en el marco legal y normativo escapan a los alcances del mercado eléctrico y a todo lo que se refiere la Ley General de Servicios Eléctricos y los cuerpos legales asociados. Salvo la excepción de la elaboración de procedimientos y normas en materia de control y operación de los reactores nucleares y declaración de precios y disponibilidad de combustibles, en principio no serían requeridos nuevos cambios en el marco legal eléctrico propiamente tal.

125 “Modifica La Ley N° 20.365, Que establece franquicia tributaria respecto de sistemas solares térmicos; La ley general de Servicios Eléctricos y La ley que crea ENAP”.

3.9. Recursos Humanos

La implementación de un PNP requiere una amplia gama de profesionales y técnicos de distintas disciplinas, algunos de ellos altamente especializados, con conocimientos y experiencia que generalmente no se encuentran disponibles en un país que inicia por primera vez un PNP.

Estos conocimientos y capacidades deberán estar instalados no solo en el operador de la central, sino que también en todos aquellos organismos que tengan algún rol en el proceso de evaluación, autorización, operación y cierre de una central, sea de forma directa, indirecta o esporádica. Por ello, es fundamental identificar y definir previamente los roles, responsabilidades y funciones que deberán cumplir las distintas organizaciones involucradas lo que permitirá la adecuada planificación del recurso humano requerido y la posterior elaboración de las estrategias para su adquisición.

3.9.1. Principales actores involucrados en un Programa Nuclear de Potencia

La estructura organizacional de soporte a un PNP varía de país en país, sin embargo, se pueden identificar grupos de actores que tienen participación en este:

1. Grupo Gestor (NEPIO)

Como se mencionó en capítulos anteriores, el OIEA¹²⁶ recomienda que el gobierno cree un grupo formal para el estudio de la factibilidad y conveniencia de desarrollar un PNP en el país, denominado NEPIO (Nuclear Energy Programme Implementing Organization). Este grupo debe conducir estudios y generar recomendaciones de políticas y estrategias a los tomadores de decisión, en relación a cada uno de los aspectos básicos que incluye un PNP.

El equipo debe contar con un entendimiento básico de todas las áreas involucradas en un PNP y tener capacidades para desarrollar términos de referencia para estudios o actuar como contraparte para su elaboración. Este grupo debe tener también capacidad de coordinación de los distintos actores involucrados en los estudios y desarrollo de infraestructura nacional, así como con organismos internacionales.

Este grupo puede consistir en una organización formada por representantes de distintos organismos públicos, representantes de distintos partidos políticos, o también, residir principalmente en una organización estatal, pero ubicada a alto nivel y con la suficiente independencia para accionar.

2. Organismos públicos

Existen diversos organismos públicos que deberán cumplir roles a lo largo de las distintas fases del programa, que puede consistir en apoyo a la realización de los estudios, elaboración y aplicación de regulación, planes de emergencia, protección de las personas y el medioambiente, relaciones internacionales, entre otros. Para el caso de Chile, podría requerirse, por ejemplo, el involucramiento de entidades tales como el Ministerio de Energía, Comisión Nacional de Energía, Servicio de Evaluación Ambiental, Coordinador Eléctrica Nacional, Ministerio de Salud, ONEMI, entre otros posibles.

Dependiendo del rol específico de cada entidad y la interacción requerida entre ellos y con la central nuclear, serán las capacidades y cantidad de personas con las que se necesitará contar.

3. Organismo Regulador Nuclear (ORN)

El Organismo Regulador Nuclear debe participar en el desarrollo de regulación, procedimientos y requisitos para el otorgamiento de los permisos, así como su posterior aplicación. Por ello, este organismo debe estar plenamente constituido con bastante anterioridad al comienzo de la construcción de la central, para estar en condiciones de evaluar y autorizar o no la instalación.

¹²⁶ OIEA (2009) "Responsibilities and Capabilities of a Nuclear Energy Programme Implementing Organization".

Por esta razón, la capacitación de los recursos humanos que estarán involucrados en esta institución resulta prioritaria y debe realizarse como una de las primeras tareas de preparación de infraestructura. En la actualidad el país no cuenta con un organismo regulador independiente, por lo que esto constituirá una de las acciones prioritarias a realizar si es que el país decide implementar un PNP.

4. Operador/propietario de la central

Se puede conformar bajo distintos modelos de propiedad: estatal, alianza público-privada o un explotador compuesto solo por privados. Bajo estos escenarios, las decisiones, en cuanto a formación de recursos humanos, pueden variar, pero lo que no varía es la complejidad y cantidad de RR.HH. que se requerirá. El personal que estará a cargo de operar la planta requerirá de especialización y entrenamiento complejo y de larga duración, el que normalmente es realizado en conjunto con la entidad proveedora de la tecnología.

5. Organismo de Soporte Técnico (OST)

Corresponde a un organismo con conocimiento técnico específico cuyo rol es brindar asesoría a las organizaciones que lo requieren, particularmente el Organismo Regulador y el Operador. En algunos casos, el Organismo Regulador puede no contar con todas las habilidades o capacidades para desempeñar las distintas actividades que se pueden requerir, por lo tanto, las OST resultan necesarias para entregarle respaldo en áreas técnicas específicas.

El operador, por su parte, también puede decidir externalizar ciertas actividades o hacer acuerdos con universidades, u otros centros técnicos, de modo de no requerir contar con capacidad instalada dentro de su organización.

Para la adecuada planificación del RR.HH. que se requerirá, resulta relevante tener clara la estrategia país que se desee implementar. Los esfuerzos a invertir en RR.HH. para un país que planea involucrarse en el desarrollo y adquisición de la tecnología nuclear serán considerablemente mayores a los de un país que solo pretende operar una central llave en mano. Para este último caso, el país no requerirá formar todas las competencias que exigen el desarrollo, diseño, construcción y puesta en marcha de una central nuclear.

Dentro de las capacidades iniciales con las que el país deberá contar están aquellas que le permitan ejercer el rol de “comprador inteligente”, para evaluar las opciones tecnológicas y de implementación, y no depender exclusivamente de asesores externos para ello. El país debe ser capaz de establecer requerimientos propios, evaluar opciones y decidir por aquella que mejor se ajuste a las necesidades y prioridades del país. Asimismo, se deberá contar con un Organismo Regulador que tenga las capacidades para evaluar, autorizar y regular todas las etapas del proyecto nuclear, razón por la cual, este organismo deberá estar plenamente constituido en las etapas iniciales del proceso.

A modo de referencia, el siguiente gráfico presenta estimaciones del requerimiento de RR.HH. para el organismo Operador de la central, el Organismo Regulador y la NEPIO o grupo gestor del proceso, para cada una de las fases de implementación de un PNP.

En la primera etapa, cuando la opción nuclear aún se encuentra en evaluación, se requerirá una participación importante de la NEPIO y del Organismo Regulador. Durante la Fase 2, cuando ya existe decisión de implementación, el Organismo Regulador cobra fuerza, mientras que la NEPIO empieza a disminuir su participación hacia finales del periodo. El Operador por su parte comienza a constituirse durante la Fase 2, para tomar plena relevancia en la Fase 3 que implica la construcción.

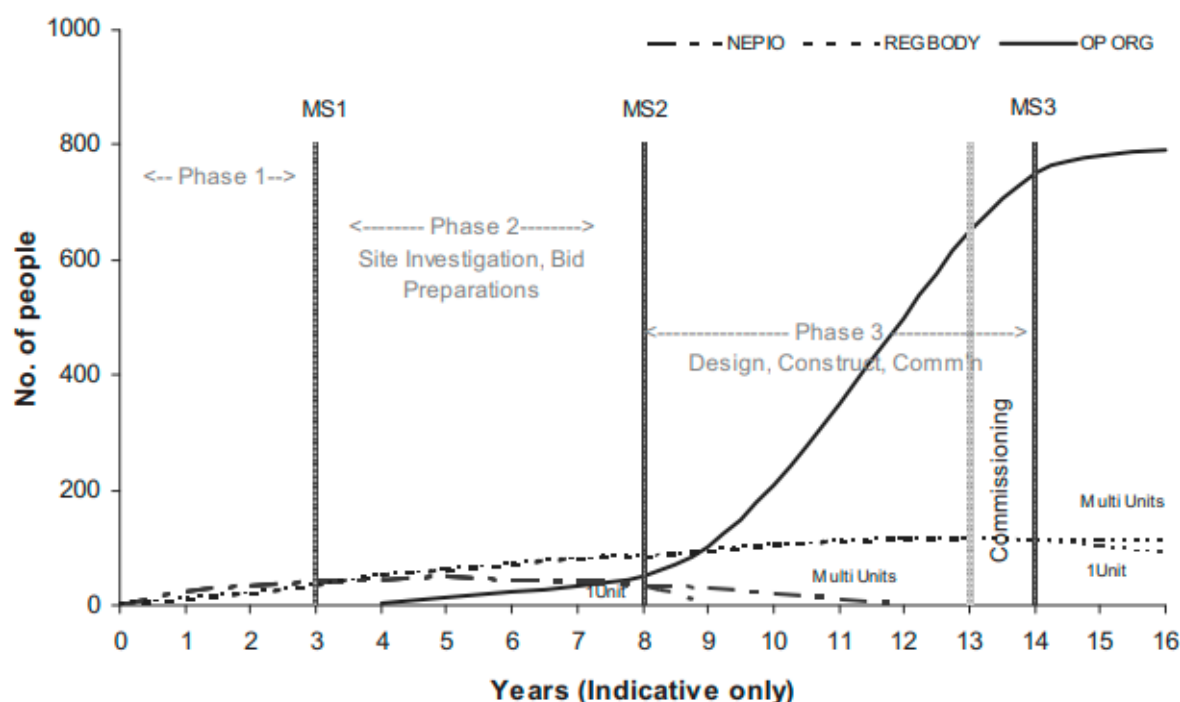


Gráfico 29: requerimiento de RR.HH. para cada fase del proyecto según organización. Fuente: OIEA (2011)¹²⁷.

Como se aprecia en el gráfico 29, entre la toma de decisión de implementación de un programa nuclear (MS1) y el inicio de operación de la central (MS3), transcurren al menos 10 años, por lo cual, existe tiempo suficiente para la preparación del RR.HH. que requerirá la operación de la futura central.

Asimismo, una de las estrategias que se puede utilizar es que el proveedor de la tecnología opere inicialmente la planta mientras se entrena y certifica a los futuros operadores nacionales.

127 OIEA, *Workforce Planning for New Nuclear Power Programmes*, 2011.

4. CONCLUSIONES

Posición nacional

1. Dado el extenso período de tiempo que exige el análisis e implementación de un programa nuclear, se requiere que existan lineamientos y un apoyo a nivel de Estado para llevar adelante el proceso, de modo que este pueda tener continuidad y pueda contar con los recursos necesarios. De lo contrario, tras cada cambio de administración se producirán una detención del proceso o cambio de énfasis y prioridades, lo que finalmente conlleva a que la información quede desactualizada y exista rotación constante del recurso humano, lo que no permite avanzar en información ni construcción de capacidades.
2. Se requiere por ello de una continuidad de políticas públicas que constituyan un marco habilitante para el desarrollo de estudios y la preparación de la infraestructura nacional, de forma fluida y permanente.
3. Asimismo, dada las múltiples disciplinas que requiere abordar todas las aristas de un PNP, se requerirá la coordinación a nivel de Estado para asegurarse que todos los organismos que requieran estar involucradas en el proceso, efectivamente, lo estén.

Aceptación pública

1. Para implementar un PNP en forma exitosa, se requiere, necesariamente, contar con el suficiente apoyo ciudadano que lo habilite, para lo cual, se aconseja la implementación de procesos participativos de decisión en los distintos sectores de la sociedad civil.
2. Para llevar adelante estos procesos participativos, se debe contar con una población debidamente informada sobre las características de la energía nuclear, y cómo esta se compara con las otras alternativas de generación existentes. Solo así se podrá validar una participación informada y legítima de los distintos sectores de la sociedad civil en este tipo de discusiones.
3. En el caso de la energía nuclear de potencia, existe desinformación y una predisposición negativa a ella en el país, por lo que se requiere la implementación de acciones que promuevan la educación, difusión y discusión acerca de las características, requerimientos e implicancias de la introducción de un PNP, con información técnica clara y comprensible para la ciudadanía.
4. De existir el consenso suficiente que permita avanzar hacia el proceso de implementación de un programa nuclear, se deberá garantizar, para cada fase del mismo, el trabajo continuo en el ámbito de las comunicaciones y la participación ciudadana, dirigido a la comunidad y públicos de interés (líderes de opinión, academia, empresas, mundo político, gobierno y autoridades regionales, medios de comunicación, ONG, comunidades locales, autoridades y comunidades de países vecinos, entre otros).

Tecnologías

1. A pesar de lo ocurrido en Fukushima Daiichi en 2011, la industria nuclear no se ha detenido, existiendo a la fecha proyectos de construcción de centrales en diversos países del mundo. Asimismo, se está impulsando con fuerza la introducción de los reactores modulares pequeños (SMR).
2. Los nuevos diseños de reactores cuentan con sistemas de seguridad pasivos, que no requieren de la acción de equipos electrónicos ni de la intervención de un operador para llevar al reactor a una parada segura, en caso de alguna emergencia, lo que permite alejarse de los conceptos antiguos reactores nucleares
3. Los reactores de Generación IV se caracterizan por hacer un uso más eficiente del combustible nuclear, lo que, sumado al uso de nuevos refrigerantes, con mayor capacidad calorífica, permitiría incrementar la eficiencia del reactor, y a la vez lograr una reducción en la generación de desechos. Por otro lado, ciertas tecnologías de IV generación, permitirían simplificar el ciclo de combustible nuclear reduciendo la necesidad de minería de uranio, de instalaciones de almacenamiento de combustible gastado, de instalaciones de enriquecimiento y plantas de reprocesamiento.

4. Los reactores SMR se presentan como una alternativa para satisfacer redes eléctricas pequeñas o aisladas, al tiempo que presentan características de seguridad mejoradas y un menor requerimiento de capital inicial. Asimismo, se presentan como alternativa para generación de otras aplicaciones, como desalinización o calor para uso residencial o industrial, por lo que podrían resultar interesantes para otras industrias también. Sin embargo, este tipo de reactores aún no se encuentra en operación, por lo cual habrá que esperar para poder comprobar su desempeño real, así como los costos finales de los mismos.
5. Por todo lo anterior, es relevante que la discusión sobre la opción nuclear de potencia no continúe anclada en tecnologías del pasado, sino que se mueva hacia el análisis de los reactores que estarán disponibles en los próximos 10 años.

Seguridad nuclear

1. La industria nuclear es una industria madura, que cuenta con organismos e instituciones técnicas de apoyo y cooperación respecto a las experiencias de operación.
2. Después de cada uno de los accidentes y eventos ocurridos, la industria nuclear ha aprendido, y respondido, aplicando medidas en todos los aspectos para impedir que el mismo tipo de evento vuelva a suceder, mejorando así la seguridad nuclear en su conjunto.
3. La sismicidad no constituye un factor que inhabilite la implementación de centrales nucleares. Ningún evento sísmico registrado ha comprometido o afectado la seguridad de las centrales nucleares, en ninguna de las barreras físicas establecidas en la defensa en profundidad, ni en ninguna de las funciones fundamentales de seguridad. Los reactores nucleares han demostrado robustez en su diseño para resistir grandes eventos sísmicos.
4. El diseño, construcción y operación segura de centrales nucleares resulta plenamente posible en el país, teniendo en cuenta los criterios tecnológicos adecuados a la sismicidad del territorio. Además, Chile es un país con experiencia respecto al diseño sísmico, y cuenta con normativa específica y robusta para ello.
5. En el caso que el país decida implementar un PNP deberá trabajar en el fortalecimiento de ciertas áreas relevantes como son apoyo gubernamental, fortalecimiento de la Cultura de Seguridad, comunicación y aceptación pública, establecimiento de un órgano regulador nuclear independiente y creación de recurso humano calificado, entre otros.

Consideraciones ambientales para un proyecto nuclear de potencia

1. Ninguna tecnología de generación de energía presenta cero impacto ambiental, por ello, es necesario evaluar cuáles son los costos y beneficios, desde el punto de vista ambiental, económico y social, para que el sector se desarrolle de forma sustentable. En el caso de la industria nuclear, los aspectos ambientales deben ser considerados en cada etapa del proyecto utilizando enfoques integrales como la Evaluación Ambiental Estratégica.
2. La energía nuclear juega un rol clave en la lucha contra el cambio climático al aportar en la disminución global de emisiones de gases efecto invernadero, evitando también la generación de otros contaminantes atmosféricos que afectan la calidad de vida de las personas. Por esta razón, su evaluación en una matriz energética “baja en carbono” resulta relevante.
3. La gestión de residuos radiactivos de alta actividad, incluyendo el combustible usado, aún cuenta con desafíos importantes. Si bien existen protocolos establecidos por la industria para su manejo seguro, es necesario avanzar hacia alternativas de carácter más permanente como el desarrollo de repositorios profundos de geología estable.
4. La liberación de radiación es un aspecto de alta importancia, que cuenta con una gestión madura en la industria nuclear. El uso de la energía nuclear de forma segura, cuenta con un sólido soporte a través de redes de colaboración internacionales las cuales, a través del desarrollo de estándares e instancias de cooperación, mantienen una industria basada en la Cultura de la Seguridad.
5. En términos de uso de suelo, la energía nuclear presenta ventajas con respecto a otros tipos de tecnologías, al requerir menor uso de suelo por unidad de energía. Esto resulta interesante también en el marco del desarrollo de los reactores modulares pequeños, que son más flexibles en su localización y generan menor impacto territorial.

Consideraciones para el emplazamiento de centrales nucleares

1. Una primera revisión arrojó que el desarrollo de la energía nuclear en Chile no contraviene los planes y políticas nacionales ni regionales, y resulta compatible con las directrices orientadoras de las regiones en materia energética. En la actualidad, ninguna de ellas impediría el emplazamiento de una central nuclear en el país, sino más bien se alinea con el principio de propiciar estrategias de energía limpias dando especial relevancia a energías, estables, seguras y limpias.
2. Sin embargo, al avanzar hacia fases posteriores del proceso, y una vez que el sitio es seleccionado, la planificación territorial toma más relevancia por la aplicación de zonificación de los planes reguladores comunales, donde sí podrían aparecer restricciones específicas según la localización del sitio específico seleccionado.
3. Tras la realización de un ejercicio de zonas de exclusión para emplazamiento de centrales nucleares a nivel nacional se observa que la zona del norte del país cuenta con mayores áreas disponibles a considerar para un potencial proyecto de energía nuclear de potencia, lo que no descarta que se puedan realizar estudios futuros en otras zonas al sur del país donde existen áreas más acotadas pero disponibles.
4. El ejercicio fue realizado considerando restricciones que a futuro pudiesen flexibilizarse con la introducción de nuevas tecnologías nucleares más seguras, modulares y flexibles.
5. A la fecha no se ha avanzado hacia la identificación de sitios específicos, ya que para ello se requiere estudios de sitio detallados, como, por ejemplo, estudios de suelo y comportamiento de fallas. Esto exige expertise y presupuesto considerable, que deberá ser abordado por el eventual futuro operador. Asimismo, un análisis de este tipo debe ser complementado con la revisión de otros factores que podrían facilitar o dificultar el emplazamiento de centrales nucleares.

Aspectos económicos y financieros

1. La tecnología nuclear es intensiva en capital y resulta riesgosa desde el punto de vista financiero durante su etapa de construcción. Sin embargo, una vez instalada, tiene bajos costos de operación, los que se mantienen estables y predecibles en el tiempo. El costo de combustible constituye una baja proporción del costo total de generación, por lo que grandes incrementos en su precio, tiene muy baja incidencia en el costo total de generación.
2. El riesgo, durante la construcción, se percibe como la principal preocupación desde el punto financiero, para este tipo de proyectos, lo que influye de manera significativa en las condiciones de financiamiento que un proyecto nuclear puede obtener. Para ganar la confianza de los inversionistas se requerirá mayor experiencia de proyectos ejecutados dentro del plazo y presupuesto.
3. Con respecto a los costos del sistema de la energía nuclear, estos resultan considerablemente más bajos que los asociados a otras tecnologías, en particular los de las energías renovables variables.
4. Los resultados de algunos ejercicios de modelación, realizados a nivel nacional, arrojan que la principal barrera de entrada para este tipo de centrales son los costos de inversión, ya que desde el lado operacional resultarían costo-eficientes para el sistema eléctrico.
5. Los estudios y modelaciones realizadas a la fecha no han considerado los costos del sistema, vale decir, el impacto de la central en el sistema eléctrico en su conjunto. Esto constituye un área de análisis relevante, particularmente considerando la alta penetración que se espera que tengan las energías renovables variables a futuro y su requerimiento de almacenamiento y flexibilidad de la red.
6. Las centrales que finalmente se vayan incorporando al sistema dependerán de la evolución de los costos de inversión, y eventuales reconocimientos de otros atributos en función de las necesidades propias del sistema.
7. En este contexto, la tecnología nuclear podría volverse competitiva, siempre y cuando pueda proveer estos otros atributos requeridos por el sistema eléctrico del futuro, tales como servicios complementarios y condiciones de flexibilidad que sean demandadas. En caso afirmativo, podrían evaluarse condiciones técnicas y económicas en que dichas remuneraciones sean reconocidas por los conceptos de seguridad y sostenibilidad del sistema, flexibilidad y otros, lo

que pudiese darle una posición más competitiva a esta tecnología.

8. Adicionalmente, si se consideraran y cuantificaran otros costos (ambiental, social, salud), la competitividad de la energía nuclear podría incrementarse significativamente. Por ello, para que las ventajas competitivas de la energía nuclear puedan ser correctamente consideradas, se requiere de políticas que aborden los problemas de diseño de los mercados, para otorgar reconocimiento monetario a aspectos relevantes que posee la energía nuclear, los que tienen relación con confiabilidad, seguridad y generación con cero emisiones entre otros.

Aspectos institucionales y regulatorios

1. Actualmente no existen impedimentos en el marco regulatorio, nuclear o eléctrico, para el desarrollo de un PNP en Chile. Sin embargo, si bien la regulación vigente, en principio, no lo impide, esta presenta vacíos regulatorios y aspectos que aún deben ser desarrollados, adaptados o donde falta definición, lo que en la práctica hace que actualmente no sea posible su implementación.
2. Prácticamente la totalidad de los cambios requeridos en el marco legal y normativo escapan a los alcances del mercado eléctrico y a todo lo que se refiere la Ley General de Servicios Eléctricos y los cuerpos legales asociados. Con excepción de la elaboración de procedimientos y normas en materia de control y operación de los reactores nucleares y declaración de precios y disponibilidad de combustibles, en principio no serían requeridos nuevos cambios en el marco legal eléctrico propiamente tal.
3. Con respecto al marco legal y regulatorio nuclear, sí se detectan brechas que deben ser cubiertas antes de avanzar hacia la materialización de un PNP, siendo la principal, el establecimiento de un organismo regulador efectivamente independiente, lo que implicará cambios en la orgánica de la actual la CCHEN.
4. Resulta importante garantizar una correcta armonización y coherencia regulatoria entre las múltiples organizaciones relacionadas con el proceso, de modo de evitar problemas de coordinación, responsabilidades y definiciones de roles. Asimismo, se deberá velar porque futuras materias legales y reglamentarias no introduzcan distorsiones o complejicen un eventual PNP.
5. Si bien la ley permite al Estado, a través de Empresa Nacional del Petróleo (ENAP), ingresar a la industria eléctrica, el ambiente de alta competencia del sector hace que solo los proyectos de energía que sean sustentables económicamente se materialicen, lo que no se ve claro para la tecnología nuclear con las condiciones actuales de mercado.

Recursos Humanos

1. La cantidad y tipo de RR.HH. que el país deberá formar dependerá de las características del programa nuclear que se desee implementar y del grado de participación que el país pretenda tener en este. Para su adecuada planificación resulta indispensable la previa identificación de roles, responsabilidades e interacciones entre las distintas instituciones nacionales e internacionales.
2. La falta, al día de hoy, de recurso humano calificado en temas de energía nuclear de potencia no constituye un impedimento para el desarrollo de un programa nuclear. Existe tiempo suficiente para la preparación de las capacidades requeridas entre la toma de decisión de implementación y el inicio de la operación de la central.
3. Los esfuerzos iniciales deberán estar puestos en la preparación de las capacidades que debe tener el Organismo Regulador y en la preparación de un equipo con capacidad de actuar como “comprador inteligente” y contraparte ante estudios externos.

5. RECOMENDACIONES

Presentado el análisis del estado actual de la energía nuclear de potencia a nivel internacional, es posible recomendar ciertas acciones prioritarias que apuntan a seguir avanzando hacia una evaluación más detallada de la opción nuclear para el país.

1. Se recomienda mantener el análisis permanente de la opción nuclear, ya que esta se enmarca en un contexto energético cambiante y con tecnologías en permanente evolución. El punto de partida es la incorporación de un escenario nuclear, como parte de los escenarios de planificación energética de largo plazo.
2. Realizar estudios que permitan identificar todos aquellos criterios y desafíos, en términos de mercado, técnicos, comerciales y de coordinación para su operación y efectiva remuneración, al momento de integrar una central nuclear a la matriz eléctrica nacional. Se requiere identificar la eventual forma de otorgar reconocimiento monetario a aspectos relevantes que posee la energía nuclear, tales como confiabilidad, seguridad y generación con cero emisiones.
3. Asimismo, para contar con un análisis completo de costo/beneficio de un programa nuclear, se deben desarrollar metodologías que permitan estimar y cuantificar los costos y beneficios sistémicos de las tecnologías, y las externalidades que vayan más allá que solo las emisiones de CO₂.
4. Promover la difusión de información robusta y objetiva sobre los usos pacíficos de la energía nuclear, con el objetivo de romper mitos y educar en base a evidencia científica. Incluir la energía nuclear de potencia dentro de los programas de educación energética a nivel nacional.
5. Hacer un seguimiento cercano y permanente de la evolución y despliegue comercial de las nuevas tecnologías, particularmente de los reactores SMR, para evaluar sus características técnicas y económicas una vez integrados a las redes eléctricas.

Finalmente, es necesario enfatizar que las acciones propuestas solo se podrán llevar a cabo si existe un apoyo e involucramiento permanente y establecido por parte del Estado, alineado con la Política Energética, ya que requerirá de un trabajo multidisciplinario e interorganizacional, así como del desarrollo y mantención permanente de capacidades instaladas en diversas instituciones de Estado.

6. REFERENCIAS

- American Academy of Arts & Sciences. Goldberg, S. M. and Rosner, R. (2011). **Nuclear Reactors: Generation to Generation**.
<http://www.amacad.org/sites/default/files/academy/pdfs/nuclearReactors.pdf>
- Centro Sismológico Nacional Universidad de Chile. **Avances en la Zonificación Sísmica de Chile** (2016).
<https://www.csn.uchile.cl/avances-en-la-zonificacion-sismica-de-chile/>
- Comisión Chilena de Energía Nuclear. (2018). **Identificación de barreras institucionales, regulatorias y de mercado asociadas al desarrollo de la núcleo electricidad en el mercado eléctrico chileno**.
- Comisión Chilena de Energía Nuclear. (2018). **Consideraciones para el emplazamiento de una Central Nuclear de Potencia (CNP) en Chile**.
- Comisión Chilena de Energía Nuclear. (2019). **Curso de Elementos de Protección Radiológica Operacional**.
- Comisión Chilena de Energía Nuclear. (2019). **Informe Recopilatorio de estudios 2016-2018**.
- Comisión Chilena de Energía Nuclear. (2019). **Revisión de las nuevas tecnologías nucleares de potencia - Ventajas comparativas y Desafíos tecnológicos**.
- Comité de Energía Nuclear de Potencia. (2015). "Generación nucleoelectrica en Chile: Hacia una decisión racional".
- Électricité de France. (2019). **Radioactive waste**.
<https://www.edf.fr/en/edf/radioactive-waste>
- Generation IV International Forum. (2020). **Generation IV International Forum (GIF)**.
<https://www.gen-4.org/gif/>
- Generation IV International Forum. (2013). **Generation IV Systems**.
https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_59461/generation-iv-systems
- Generation IV International Forum. (2013). **Cost Estimating Guidelines for Generation IV Nuclear Energy Systems**.
https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/emwg_guidelines.pdf
- Blanck, G. A., Aydogan, F., Koerner, C. L. (2019). **Economic viability of light water small modular nuclear reactors: General methodology and vendor data**.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118308372>
- Grupo Consultivo Nuclear. (2010). **Nucleoelectricidad en Chile: Posibilidades, Brechas y Desafíos**.
- Grupo de Trabajo en Núcleo-electricidad. (2007). **La opción nucleoelectrica en Chile**.
- IDOM - CCHEN. (2017). **Estudio sobre el Estado del Arte de la Industria Nuclear en términos de Seguridad**.
- IDOM - CCHEN. (2017). **Estimación de costos y análisis de rentabilidad del proyecto de implantación de una central nuclear en Chile**.
- IDOM - CCHEN. (2017). **Modelo y estimación de Costos para la implantación de una central nuclear en Chile**.
- IDOM - CCHEN. (2018). **Estudio para la identificación y evaluación de posibles efectos e impactos ambientales producidos por la generación de energía nuclear de potencia en Chile**.
- Ingersoll, D.T., Colbert, C., Houghton, Z., Snuggerud, R., Gaston, J.W., & Empey, M. (2015). **Can nuclear power and renewable energies be friends?**
https://inis.OIEA.org/search/search.aspx?orig_q=RN:49010199
- International Energy Agency. (2019). **Nuclear Power in a Clean Energy System**.
- International Energy Agency. (2019). **Nuclear Power in a Clean Energy System**.
- Japan Atomic Industrial Forum. (2019). **NPPs in Japan**.
<https://www.jaif.or.jp/en/npps-in-japan/>
- Kharecha, P.A., and Hansen, J. E. (2013). **Prevented mortality and greenhouse gas emissions from historical and projected nuclear power**.
- Leyton F., Ruiz, S. (2018). **Notas CCHEN**.
- Markou, G & Genco, F. (2019). **Seismic assessment of small modular reactors: NuScale case study for the 8.8 Mw earthquake in Chile**.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549318309221>
- Ministerio de Energía. (2014). **Agenda de Energía**.

- Ministerio de Energía. (2015). **Energía 2050 Política Energética de Chile.**
- Ministerio de Energía. (2015). **Generación Nucleoeléctrica en Chile: Hacia una decisión racional.**
- Ministerio de Energía / CCHEN. (2018). **Modelación Viabilidad Económica de una Central Nuclear en el Mercado Eléctrico Nacional - Etapa 1.**
- Ministerio de Energía. (2019). **Informe de Actualización de Antecedentes 2019 (IAA-2019).**
- Ministerio de Medio Ambiente. **Evaluación Ambiental Estratégica.**
<https://mma.gob.cl/evaluacion-ambiental-estrategica/>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2018). **Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático.**
- Mori - Extend. (2016). **Estudio de opción y estrategias de comunicación CCHEN.**
- Nuclear Energy Institute. (2018). **Palo Verde 2018 Visitor Guide.**
<https://www.nei.org/CorporateSite/media/filefolder/conferences/digital-workshop/Palo-Verde.pdf>
- Organismo Internacional de Energía Atómica. (2009). **Responsibilities and Capabilities of a Nuclear Energy Programme Implementing Organization.**
- Organismo Internacional de Energía Atómica. (2011). **Workforce Planning for New Nuclear Power Programmes.**
- Organismo Internacional de Energía Atómica. (2012). **Managing Siting Activities for Nuclear Power Plants.**
- Organismo Internacional de Energía Atómica. (2012). **Efficient Water Management in Water Cooled Reactors.**
- Organismo Internacional de Energía Atómica. (2013). **NuScale Power Modular and Scalable Reactor.** <https://aris.OIEA.org/PDF/NuScale.pdf>
- Organismo Internacional de Energía Atómica. (2015). **Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power.**
- Organismo Internacional de Energía Atómica. (2015). **El accidente de Fukushima Daiichi - Informe del Director General.**
- Organismo Internacional de Energía Atómica. (2015). **Site Survey and Site Selection for Nuclear". Installations.**
- Organismo Internacional de Energía Atómica. (2016). **Nuclear Power and Sustainable Development.**
- Organismo Internacional de Energía Atómica, IRRS. (2018). **Integrated Regulatory Review Service (IRSS) Mission to Chile.**
- Organismo Internacional de Energía Atómica. (2018). **Prospective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities.**
- Organismo Internacional de Energía Atómica. (2018). **Strategic Environmental Assessment for Nuclear Power Programmes: Guidelines.**
- Organismo Internacional de Energía Atómica. (2018). **IAEA Safety Glossary.**
- Organismo Internacional de Energía Atómica. (2019). **Developing the First Ever Facility for the Safe Disposal of Spent Fuel.**
<https://www.OIEA.org/newscenter/news/developing-the-first-ever-facility-for-the-safe-disposal-of-spent-fuel>
- Organismo Internacional de Energía Atómica. (2020). **Power Reactor Information System.**
<https://pris.OIEA.org/PRIS/home.aspx>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) - Nuclear Energy Agency. (2012). **Nuclear Energy and Renewables.**
<https://www.oecd-neo.org/ndd/pubs/2012/7056-system-effects.pdf>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) - Nuclear Energy Agency. (2015). **Projected Costs of Generating Electricity.**
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) - Nuclear Energy Agency. (2015). **Nuclear Energy: Combating Climate Change.**
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) - Nuclear Energy Agency (2018). **Measuring Employment Generated by the Nuclear Power Sector.**
<https://www.oecd-neo.org/ndd/pubs/2018/7204-employment-nps.pdf>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) - Nuclear Energy Agency. (2019). **The Costs of Decarbonisation: System Costs With High Shares of Nuclear and Renewables.**
- Ronnier Birr. (2018). **Diseño del sistema de aislación sísmica para un reactor nuclear integrado.**
- Tironi y Asociados. (2009). **Asesoría técnica en la elaboración de un programa de comunicaciones**

para avanzar a una toma de decisión informada y participativa sobre el desarrollo de infraestructura nuclear.

- World Nuclear News. (2007). **Dates revised again for Olkiluoto 3.** [En línea].
<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Dates-revised-again-for-Olkiluoto-3>
- World Nuclear Association. (2017). **The Nuclear Fuel Cycle.**
<https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/introduction/nuclear-fuel-cycle-overview.aspx>
- World Nuclear Association. (2017). **Nuclear Power Economics and Project Structuring.**
<https://www.world-nuclear.org/our-association/publications/online-reports/nuclear-power-economics-and-project-structuring.aspx>
- World Nuclear Association. (2017). **Nuclear Power in Mexico.**
<https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/mexico.aspx>
- World Nuclear Association. (2018). **Radioactive Waste Management.**
<https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx>
- World Nuclear Association. (2018). **Storage and Disposal of Radioactive Waste.**
<https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-waste/storage-and-disposal-of-radioactive-waste.aspx>
- World Nuclear Association. (2018). **Nuclear Power Plants and Earthquakes.**
<https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/nuclear-power-plants-and-earthquakes.aspx>
- World Nuclear Association. (2019). **Economics of Nuclear Power.**
<https://www.world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx>
- World Nuclear Association. (2019). **Nuclear Power in Finland.**
<https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/finland.aspx>
- World Nuclear Association. (2019). **Desalination.**
<https://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/industry/nuclear-desalination.aspx>
- Universidad de Chicago. (2014). **The Economic Future of Nuclear Power.**
- U.S. Nuclear Regulatory Commission. (2017). **Frequently Asked Questions (FAQ) About Radiation Protection.**
<https://www.nrc.gov/about-nrc/radiation/related-info/faq.html#2>
- U.S. Department of Energy. (2019). **Waste Isolation Pilot Plant (WIPP).**
<https://wipp.energy.gov/about-us.asp>

7. ANEXOS

I. Ejemplo Mapas de Exclusión generados

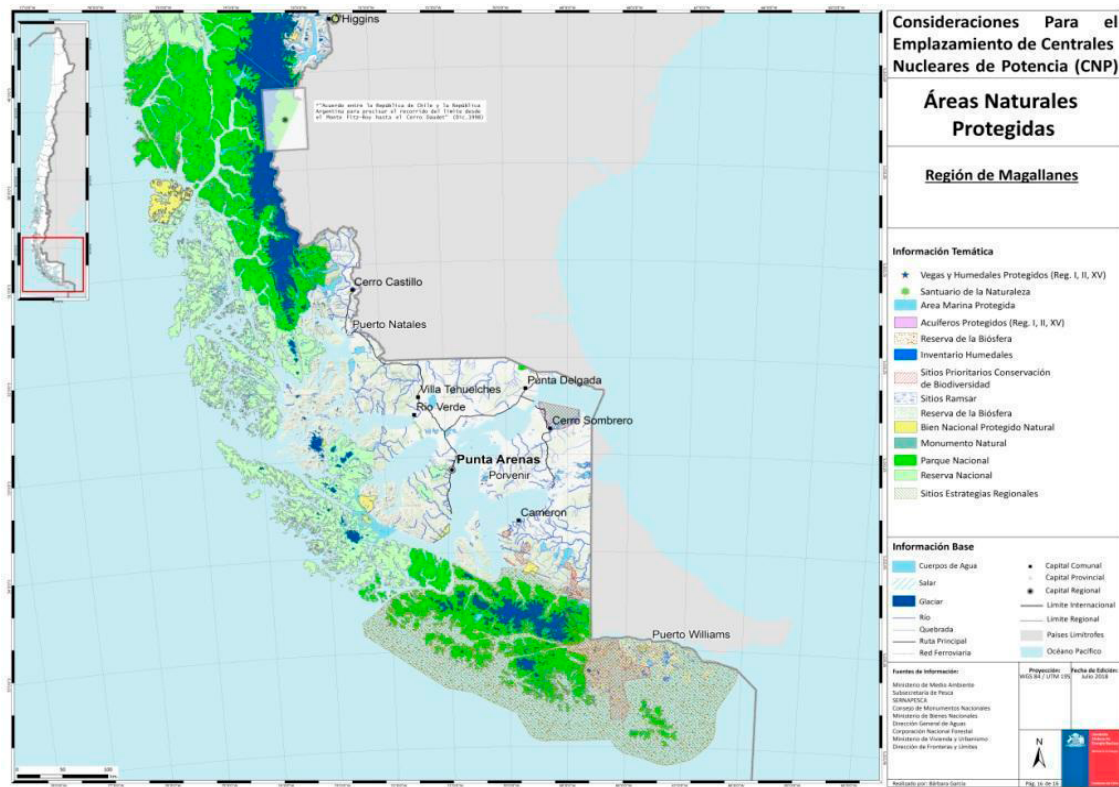


Figura 10: ejemplo mapa de áreas naturales protegidas Región de Magallanes.
Fuente: CCHEN (2018)

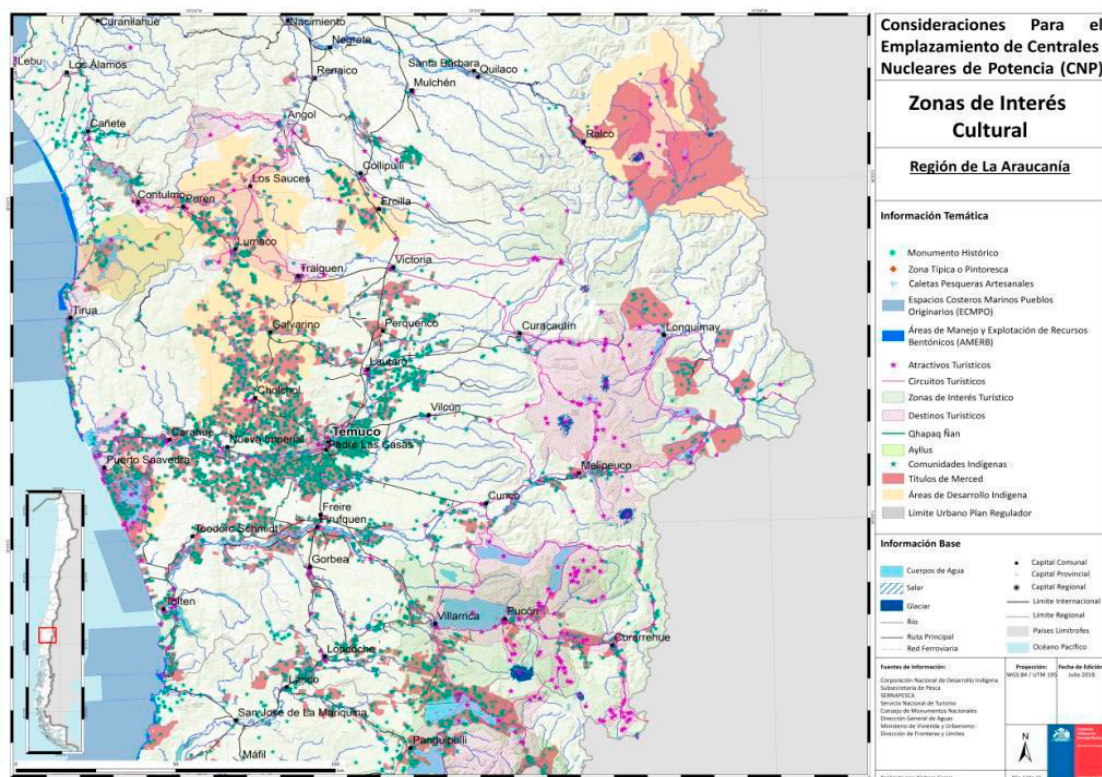


Figura 11: ejemplo mapa de zonas de interés cultural Región de la Araucanía. Fuente: CCHEN (2018)

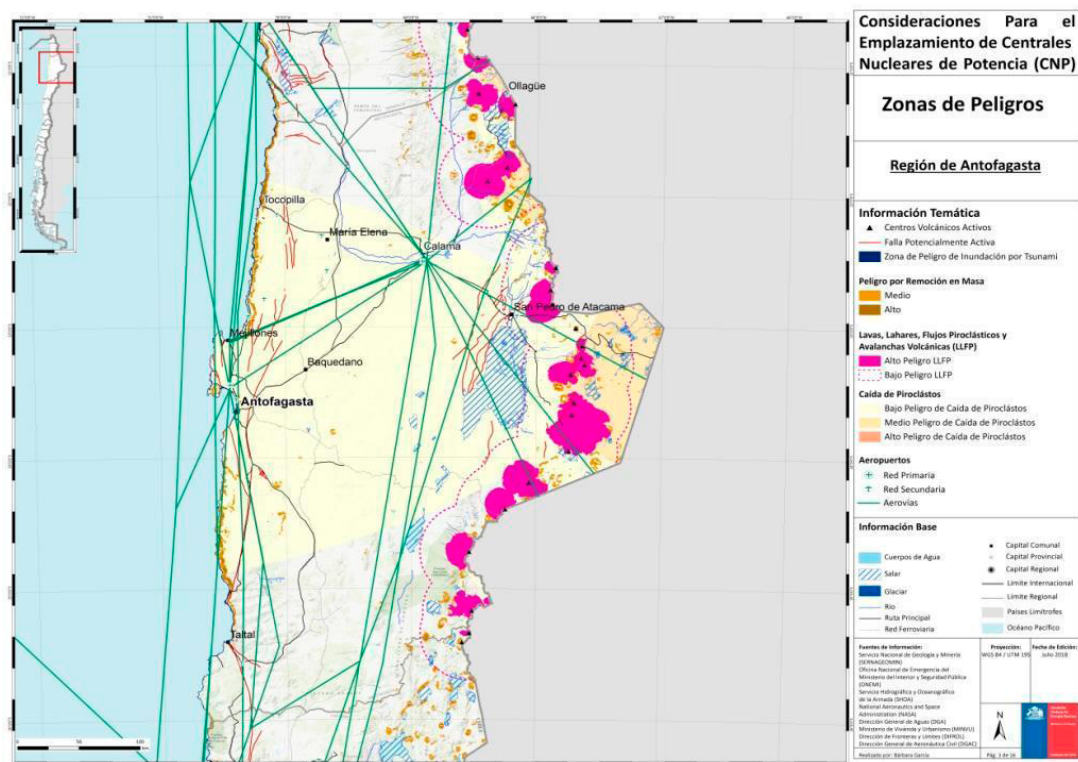


Figura 12: ejemplo mapa de zonas de peligro Región de Antofagasta. Fuente: CCHEN (2018)