



Núcleo-electricidad en Chile

POSIBILIDADES, BRECHAS Y DESAFÍOS



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE ENERGÍA



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE ENERGÍA

www.minenergia.cl

Núcleo-electricidad en Chile

POSIBILIDADES, BRECHAS Y DESAFÍOS

Marcelo Tokman R.
Ministro de Energía

2010

En la elaboración de este documento han colaborado los profesionales del Ministerio de Energía Juan José Rivas, Claudio Huepe y Francisco Peralta. Asimismo, se ha contado con la valiosa contribución del Grupo Consultivo Nuclear y la Comisión Chilena de Energía Nuclear.



INDICE

INTRODUCCIÓN

Objetivos y alcance del documento

Origen del Trabajo

Plan de Trabajo

Programa de Cooperación Técnica

Estructura del Documento

1.	ANTECEDENTES	15
1.1	Contexto Energético Mundial	15
1.2	Cambio Climático	18
1.3	Renacimiento de la Energía Nuclear	21
2.	ANÁLISIS DE LA CONVENIENCIA DE LA INCORPORACIÓN DE LA ENP EN CHILE	28
2.1	Contexto Energético Nacional	28
2.2	Marco General de la Política Energética Nacional	30
2.3	Prospectiva Energética	32
2.3.1	Escenario de Referencia	35
2.3.2	Escenario Nuclear	39
	2.3.2.1 Consideraciones preliminares	39
	2.3.2.2 Resultados	40
	2.3.2.2.1 Análisis económico	40
	2.3.2.2.2 Suministro de combustible nuclear	44
	2.3.2.2.3 Impacto sobre las emisiones de GEI	46

2.4	Otras Consideraciones	48
2.4.1	Protección del Medioambiente	48
2.4.1.1	Impactos ambientales de la generación núcleo-eléctrica	49
2.4.1.2	Impactos ambientales de las demás fuentes de energía	51
2.4.2	Gestión de Residuos Radiactivos	54
2.4.3	Seguridad de la Generación Núcleo-Eléctrica	55
2.4.3.1	Seguridad ante peligros naturales	56
2.4.3.2	Seguridad frente a peligros antrópicos	57
2.4.3.2.1	Protección radiológica	59
2.4.3.2.2	Protección física	61
3.	INFRAESTRUCTURA NECESARIA PARA EL DESARROLLO DE UN PNP	63
3.1	Evaluación de las Capacidades Nacionales	64
3.1.1	Metodología de Autoevaluación	66
3.1.1.1	Etapas de evaluación	66
3.1.1.2	Ejemplo	67
3.1.1.3	Descripción del proceso y su evaluación	70
3.1.2	Principales Dimensiones Consideradas y Algunos Resultados	71
3.1.2.1	Recursos humanos	71
3.1.2.2	Marco legal y regulatorio	72
3.1.2.3	Salvaguardias	74
3.1.2.4	Emplazamiento	75
3.2	Opinión Ciudadana Respecto a la Eventual Implementación de un PNP	76
3.2.1	Importancia de Contar con Apoyo Ciudadano	76
3.2.2	Energía Nuclear y Opinión Pública en Chile	77
4.	LINEAMIENTOS PRELIMINARES PARA UN PNP	84
4.1	Decisiones Estratégicas	84
4.1.1	Decisiones con Respecto a la Tecnología	85
4.1.2	Decisiones con Respecto al Ciclo de Combustible	86
4.2	Rol Público y Privado	88
4.2.1	Institucionalidad Nuclear	88
4.2.1.1	Órgano regulador nuclear	89
4.2.1.2	Gestión final de residuos nucleares	89
4.2.1.3	Otras responsabilidades	90
4.2.1.3.1	Centro de investigación y desarrollo	91
4.2.1.3.2	Recursos humanos	91
4.2.2	Esquema de Propiedad	92
5.	CONCLUSIONES	95

INTRODUCCIÓN

Objetivos

El objetivo del presente documento es dar cuenta del trabajo realizado durante los dos últimos años para la evaluación de la opción de generación núcleo-eléctrica y contribuir al debate público sobre una eventual incorporación de la energía nuclear a la matriz energética nacional. Es de esperar que los antecedentes presentados en este documento, así como aquellos entregados por otros estudios sobre la materia¹, le permitan al país discutir en forma seria la opción nuclear como un componente de la política energética y así, en el corto plazo, sea posible tomar una decisión informada respecto a los próximos pasos a seguir.

Origen del Trabajo

En marzo de 2007, S.E. la Presidenta de la República, Dra. Michelle Bachelet Jeria, oficializó la creación del Grupo de Trabajo en Núcleo-Electricidad (*Comisión Zanelli*). A este grupo, formado por diez profesionales independientes de distintas áreas, 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 energía nuclear para la producción de electricidad en nuestro país, dentro de los tratados internacionales que rigen la materia”².

Tras la conclusión de dicha Comisión, de que con la información disponible no era posible descartar la energía nuclear como una opción energética para el futuro, la Presidenta le encargó al Ministro-Presidente de Energía continuar la labor de la *Comisión Zanelli* y avanzar en todos los aspectos necesarios para que el país pudiera tomar una decisión sobre si optar o no por avanzar al desarrollo de infraestructura nacional para la producción de energía nuclear.

Con dicho mandato, desde el año 2008 el Ministro-Presidente de Energía ha encabezado el Grupo Consultivo Nuclear (GCN)³, el cual ha liderado el desarrollo de una serie de actividades

1 Ver, por ejemplo, Colegio de Ingenieros de Chile A.G. (2009), CCHEN-ENDESA (1975) y CNE (1979).

2 Decreto Supremo N° 49 de 13 de Marzo de 2007, del Ministerio de Minería.

3 El Grupo Consultivo Nuclear fue conformado por algunos ex miembros del Grupo de Trabajo en Núcleo-Electricidad y por representantes de organismos públicos clave para el estudio de la alternativa nuclear. Los primeros son: Jorge Zanelli (físico teórico), Alejandro Jofré (ingeniero matemático) y Pío Infante (geógrafo especialista en temas ambientales) y los segundos son Gabriel Rodríguez (Ministerio de Relaciones Exteriores), Claudia Ferreiro (Comisión Nacional del Medio Ambiente), Claudio Ortiz (Ministerio de Defensa) y Fernando López (Director Ejecutivo de la CCHEN).

que buscan determinar la conveniencia para el país de adoptar un Programa Nuclear de Potencia (PNP)⁴. El GCN contó con el apoyo permanente de un equipo de trabajo⁵.

Plan de Trabajo

La estrategia de análisis y evaluación de la alternativa de generación núcleo-eléctrica que ha adoptado el país se enmarca, en términos generales, dentro de las mejores prácticas que recomienda el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA)⁶, para que un país pueda decidir responsablemente si la opción núcleo-eléctrica es o no adecuada y viable para la realidad local. En este marco, se ha realizado un conjunto de actividades, entre las cuales se cuentan: visitas científicas, recepción de expertos internacionales y estudios técnicos orientados a clarificar algunos de los principales aspectos de la generación núcleo-eléctrica en el contexto de su eventual incorporación en Chile.

Un documento del año 2007 fue elaborado por el OIEA⁷ para ayudar a los países miembros que están en proceso de evaluar la opción nuclear a:

- Reconocer e identificar los compromisos y obligaciones asociados a la introducción de la energía nuclear de potencia.
- Establecer y preparar adecuadamente la infraestructura nacional necesaria para la construcción de una planta nuclear de potencia.
- Establecer todas las competencias y capacidades necesarias para regular y operar una planta nuclear de potencia de manera segura y eficiente durante toda su vida útil, así como para regular y administrar los residuos radiactivos.

4 Desarrollar un PNP implica incorporar la generación núcleo-eléctrica como fuente de energía a la matriz eléctrica nacional e implementar una infraestructura adecuada que garantice que ésta pueda operar de manera segura.

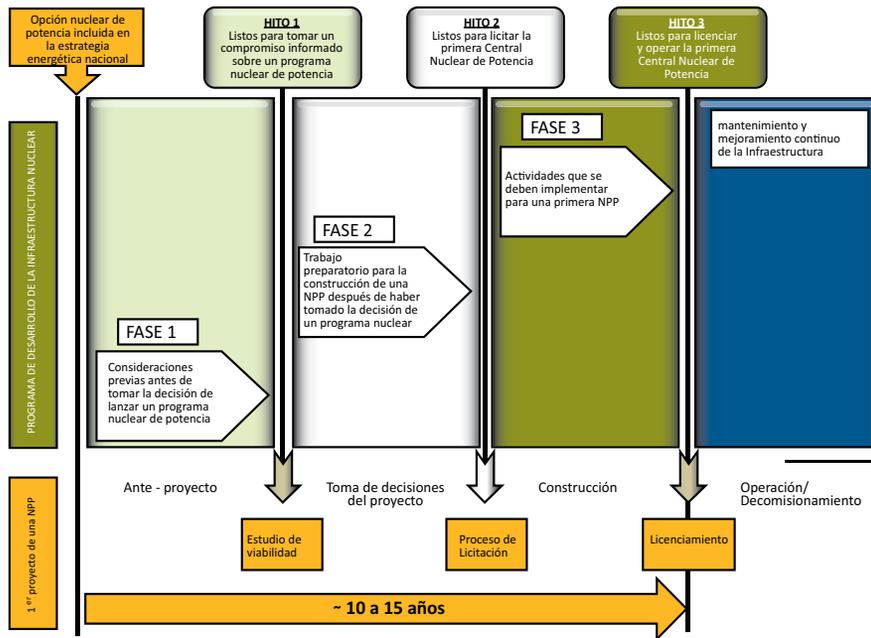
5 El equipo de trabajo conjunto CNE-CCHEN fue coordinado por Juan José Rivas, asesor del Ministro de Energía, y conformado por miembros del gabinete del Ministro y funcionarios del Departamento de Estudios de la CNE y de la CCHEN.

6 El OIEA es el principal foro intergubernamental para la cooperación científica y técnica en materia de utilización de la energía nuclear con fines pacíficos. Establecido en 1957 como organismo autónomo de la ONU, sus funciones son alentar el intercambio de información científica y técnica sobre la energía nuclear, inspeccionar la aplicación de salvaguardias nucleares y medidas de verificación de los programas nucleares para usos civiles, promover la transmisión de conocimientos teóricos y prácticos para que los países puedan ejecutar de forma segura y eficaz sus programas de energía atómica, formular normas básicas de seguridad para la protección contra radiaciones, y publicar reglamentos y códigos de prácticas sobre determinados tipos de operaciones, incluido el transporte de material radiactivo.

7 OIEA (2007).

El modelo planteado en dicho documento considera tres fases conducentes a sendos hitos, como se ve a continuación.

Figura 1: Hitos en el desarrollo de un Programa Nuclear de Potencia



Fuente: OIEA (2007).

La primera fase incluye todas las consideraciones previas a la decisión de desarrollar un PNP y concluye con el hito de “país preparado para tomar un compromiso informado sobre un programa nuclear de potencia”. En ese momento, se considera que el país está en condiciones de decidir si es apropiado o no introducir la energía nuclear a la matriz energética.

En el caso que el país decida desarrollar un PNP, se pasa a la segunda fase, la cual concluye con el hito de “país preparado para recibir ofertas para la primera planta nuclear”. Durante esta segunda fase el país debe llevar a cabo todas las acciones necesarias para estar en condiciones de iniciar la construcción de una planta nuclear. Los principales requisitos en esta fase son: instaurar un órgano regulador competente que pueda evaluar, supervisar y controlar eficazmente un PNP; y desarrollar toda la infraestructura necesaria para poder recibir ofertas y establecer contratos comerciales con los propietarios/operadores.

La tercera fase consiste en desarrollar todas las actividades para la instalación de la primera planta nuclear. Esta fase concluye con el hito de “país preparado para licenciar y operar la primera planta nuclear”. Durante esta fase se producen los mayores requerimientos de capital ya que el objetivo es que las necesidades de infraestructura estén avanzadas. Al término de esta fase se espera que la organización capaz de encargar una planta nuclear haya evolucionado hacia una organización capaz de asumir la responsabilidad de licenciar y operar una planta nuclear.

Es importante destacar que durante todo el desarrollo de un PNP hay tres organizaciones involucradas: el gobierno, el órgano regulador y el propietario/operador de la planta nuclear. Cada una de éstas cumple un rol clave, aún cuando sus responsabilidades van cambiando a medida que avanza el proceso.

En la actualidad, Chile se encuentra en la primera fase del proceso, realizando todos los estudios de factibilidad de la opción nuclear. Si bien debieran realizarse algunos estudios adicionales, como se verá en este documento, el país ya cuenta con los antecedentes requeridos para generar una discusión informada, conducente a tomar una decisión sobre la conveniencia de considerar la energía nuclear como una opción más de generación eléctrica y comenzar el trabajo que permita cerrar las brechas de infraestructura⁸ existentes respecto a lo necesario para la incorporación de la generación núcleo-eléctrica a la matriz energética nacional.

Respecto a la decisión que sigue al hito final planteado por el OIEA para la primera fase del proceso (“país preparado para tomar un compromiso informado sobre un programa nuclear de potencia”), se introduce una variante que se adecua más a la realidad nacional, y que consiste en dividir en dos etapas la decisión correspondiente. La decisión esencial que se requiere para una segunda fase es la de avanzar en el “cierre de brechas”; posteriormente se podrá tomar la decisión de llamar a la licitación para la construcción del primer reactor.

Programa de Cooperación Técnica

Además de los antecedentes reunidos por medio de estudios y análisis, a principios del 2009 se dio inicio a un programa de cooperación técnica entre el gobierno y el OIEA. Este programa, que se enmarca dentro de una larga historia de cooperación entre el país y el citado organismo, es de carácter trienal y tiene por objetivo apoyar la planificación energética de largo plazo del país.

⁸ Por *infraestructura nacional* se entiende todos los aspectos que se requiere para sustentar un PNP. Entre éstos se incluye infraestructura física, infraestructura legal y regulatoria, masa crítica de recursos humanos, de información ambiental y geológica, etc.

Los resultados esperados de este programa son:

- Apoyar el desarrollo de una política energética (eléctrica) de largo plazo, que incorpore en el análisis una *evaluación sistemática* de todas las alternativas potenciales de suministro.
- Construir *capacidades nacionales* en el sector energético usando los modelos del OIEA.
- Apoyar la realización de *estudios de factibilidad* para la eventual introducción de la energía nuclear de potencia.

El programa de cooperación técnica será un insumo esencial en el proceso de evaluación de la opción de generación núcleo-eléctrica. Por otra parte, dado que abarca mucho más que el análisis de la energía nuclear de potencia, éste va a proseguir normalmente más allá del 2010, independientemente de la decisión que se adopte con respecto a mantener abierta la opción de incluir la energía nuclear a la matriz nacional.

Estructura del Documento

El presente documento está compuesto por cinco secciones: (i) antecedentes, (ii) análisis de la conveniencia de la incorporación de la Energía Nuclear de Potencia (ENP) en Chile, (iii) infraestructura necesaria para el desarrollo de un PNP, (iv) lineamientos preliminares para un PNP, y (v) conclusiones.

En la primera sección realiza un análisis de la situación energética mundial actual, en particular, los factores que han motivado el renacimiento de la energía nuclear a nivel global.

En la segunda sección se analiza la conveniencia de incorporar la energía nuclear de potencia en la matriz, dentro del marco general de la política energética nacional y las características específicas de nuestro país. Esta sección está basada en los resultados de los diversos estudios encargados y de las proyecciones realizadas por la Comisión Nacional de Energía (CNE) y el Ministerio de Energía respecto a la demanda y oferta eléctrica de largo plazo. La metodología utilizada sugiere evaluar distintos escenarios energéticos para determinar, desde la perspectiva económica, en cuáles de ellos y en qué momento del tiempo haría sentido instalar una central nuclear.

Una vez determinada la conveniencia de la energía nuclear de potencia desde el punto de vista económico, se analiza el impacto que tendría su inclusión en el mercado eléctrico nacional, tal como está estructurado actualmente. En particular, se analizan las principales barreras que enfrentaría y sus efectos en términos de despacho y precios; así como también su impacto potencial en la matriz, en términos de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y de seguridad de suministro.

Finalmente, en esta sección se analizan otros aspectos fundamentales a considerar antes de tomar una decisión. Si bien es posible que desde una perspectiva técnica-económica y ambiental, la generación núcleo-eléctrica apareciera como una opción conveniente para el país, hay una serie de aspectos asociados al uso de la tecnología nuclear que deben ser analizados y discutidos.

La tercera sección evalúa el estado de desarrollo de la infraestructura nacional para un PNP, con el objetivo de poder entregar un diagnóstico del estado de las capacidades nacionales al próximo gobierno y determinar las brechas respecto a las condiciones apropiadas.

En la cuarta sección se revisan los lineamientos que se identifican de manera preliminar para el desarrollo de un PNP en Chile; es decir, se establecen algunas características generales de un PNP adecuado para el país.

Por último, se presentan conclusiones relevantes para la continuación del trabajo.

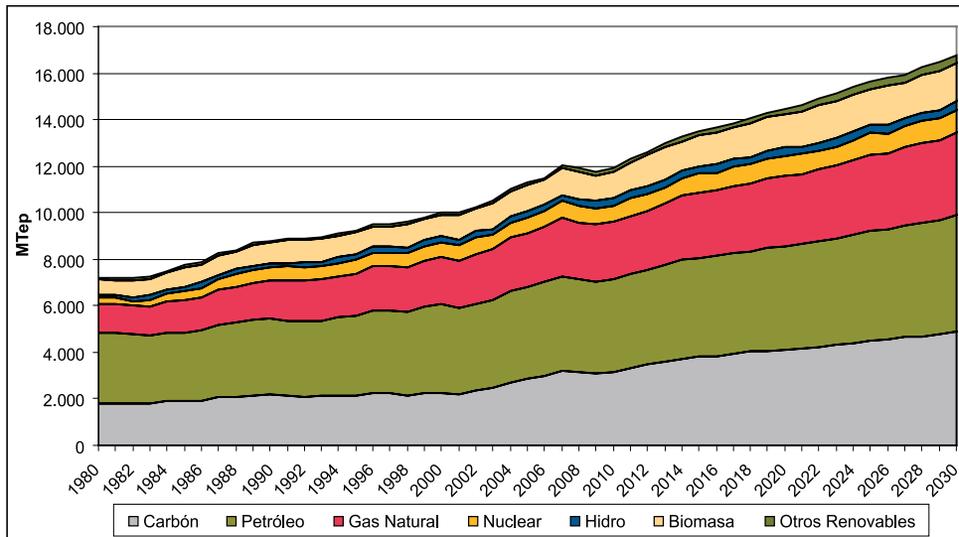
1. ANTECEDENTES

En esta sección se revisa la situación energética mundial y se analizan los factores que han motivado el renacimiento de la opción nuclear a nivel global, especialmente la creciente preocupación por el encarecimiento de los combustibles fósiles, por la seguridad del suministro eléctrico y los desafíos asociados al cambio climático.

1.1 Contexto Energético Mundial

Si bien la reciente crisis financiera internacional provocó una caída en la demanda energética mundial (la primera significativa desde el año 1981), se observa una tendencia al alza de la demanda energética mundial en el largo plazo. El efecto de la crisis ha sido estimado como *transitorio*, por lo que en el período 2010-2030 el consumo mundial de energía primaria crecería a una tasa promedio anual de 1,5% (ver gráfico 1) y el consumo mundial de electricidad lo haría a una tasa promedio anual de 2,5%. Esta demanda es impulsada principalmente por países que no pertenecen a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico⁹ (OCDE), en particular por China e India¹⁰.

Gráfico 1: Proyección Demanda Primaria de Energía



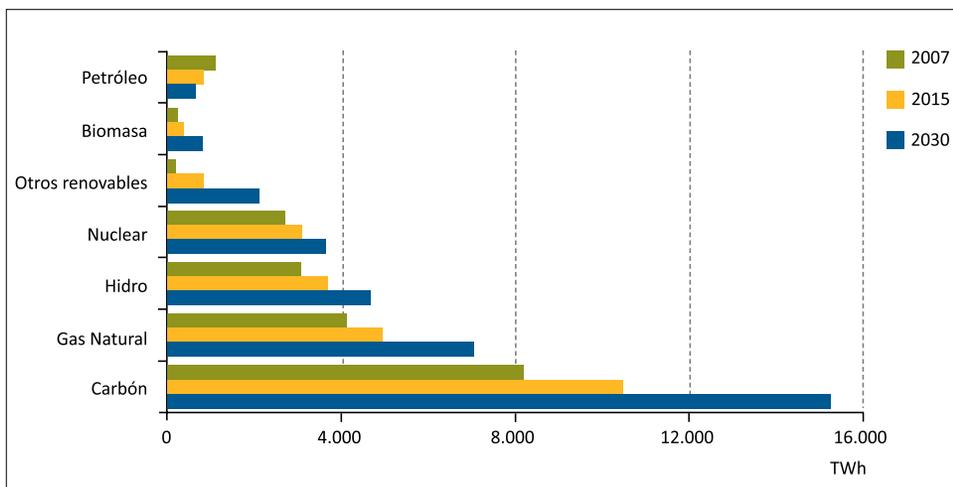
Fuente: AIE (2009a).

⁹ La OCDE es una organización intergubernamental que reúne a 30 países comprometidos con la democracia y la economía de mercado. Los representantes de los países miembros intercambian información y buscan armonizar políticas con el objetivo de maximizar su crecimiento económico y asistir a su desarrollo y al de los países no miembros.

¹⁰ Se espera que en las próximas dos décadas cerca del 80% del crecimiento del mercado de la electricidad tendrá lugar fuera de la OCDE.

De no haber cambios significativos en las tendencias de consumo mundial, será necesario instalar más de 3.000 GW al 2030, lo que implicaría casi duplicar la capacidad instalada actual¹¹. En ese contexto, el aumento de la demanda futura por electricidad tendrá que ser cubierto principalmente con carbón y gas (ver gráfico 2) por lo cual al año 2030 el carbón llegaría a representar el 44% de la generación eléctrica mundial.

Gráfico 2: Participación de Tecnologías en la Generación Mundial de Electricidad



Fuente: AIE (2009a).

¹¹ La capacidad instalada en el mundo al 2007 era de 4.509 GW. Para el 2030 se proyectan 7.821 GW, lo que implica un aumento de 1,73 veces.

Se estima que la creciente demanda por combustibles fósiles provocará una disminución progresiva de las reservas y una presión importante sobre sus precios. La creciente volatilidad y encarecimiento de los precios de los combustibles fósiles debieran magnificarse a futuro como consecuencia del crecimiento esperado en la demanda energética. La escasez proyectada significaría el fin de la era de precios bajos de los combustibles fósiles como se observa en el gráfico 3.

Gráfico 3: Evolución Proyectada de Precios de Combustibles Fósiles 2009-2030



Fuentes: CNE (2009), AIE (2009a), Informe Purvin & Gertz (2009).

Como resultado de la tendencia proyectada, se ha registrado una preocupación generalizada de muchos países por minimizar el impacto de las variaciones de precio de los combustibles fósiles en la economía. Asimismo, ha surgido una preocupación por diversificar la matriz energética y reducir la dependencia externa, para minimizar el riesgo de suministro que se desprende de la creciente participación de países de alto riesgo geopolítico en la producción de gas y petróleo.

Frente a estas preocupaciones, la energía nuclear surge como una alternativa interesante, de costo estable y predecible, para protegerse de las variaciones de los precios de los combustibles fósiles y de las posibles interrupciones de suministro.

De acuerdo a las estimaciones de la OCDE y el OIEA (2008), las reservas de uranio son relativamente abundantes¹²; y si bien se espera que su precio aumente como respuesta al incremento en la demanda, este incremento tendría un impacto mínimo en el costo de la generación núcleo-eléctrica, ya que el precio del uranio representa menos de un 5% del costo global de generación¹³. Por lo tanto, aún en el caso que el precio del uranio subiera en el mismo porcentaje que el de los combustibles fósiles, dicho incremento tendría un impacto exiguo en el precio de la energía, significativamente menor al impacto de un alza en el precio de los combustibles fósiles.

Por último, desde el punto de vista de la seguridad de suministro, las reservas de uranio se encuentran en países con menor riesgo geopolítico que los combustibles fósiles (Canadá y Australia concentran el 44% de la producción actual de uranio¹⁴), lo cual reduce significativamente la posibilidad de que se interrumpa el suministro.

1.2 Cambio Climático

Un segundo aspecto relacionado con la generación de energía que está concentrando el interés mundial es el fenómeno del cambio climático. En particular, preocupa el aumento global de la temperatura promedio del aire y de los océanos, el derretimiento general de la nieve y los hielos, y el aumento global del nivel del mar, así como la evidencia recogida en todos los continentes y en la mayoría de los océanos que muestra cambios importantes en los sistemas naturales¹⁵.

En la comunidad científica internacional existe un amplio consenso respecto de la responsabilidad que tiene el nivel de concentración de Gases Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera en relación con este fenómeno. Los GEI existen naturalmente en la atmósfera, pero sus niveles han crecido dramáticamente durante las últimas décadas a causa de actividades humanas, entre las que destaca la generación de electricidad, el transporte y la deforestación. A menos que se tomen drásticas medidas de mitigación, la tendencia proyectada en el consumo de combustibles fósiles, con sus consecuentes mayores emisiones (según se ve en la

12 A los niveles de consumo del 2006 los recursos identificados de uranio alcanzarían para 80 años de suministro. Esta proyección no considera los recursos no descubiertos, los cuales en el 2007 se estimaron en 10.500.000 toneladas.

13 Ver www.world-nuclear.org (en inglés)

14 OCDE - AEN - OIEA (2008).

15 El Informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático de Naciones Unidas (IPCC (2008)) entrega abundante evidencia científica de los cambios que se están produciendo en el clima mundial.

Tabla 1), implicarían aumentos en la concentración de GEI en la atmósfera que resultarían en incrementos de la temperatura global por sobre los 6 grados centígrados¹⁶, lo que tendría consecuencias catastróficas. Algunas estimaciones¹⁷ sitúan el costo de no actuar para reducir las emisiones entre 5% y 20% del PIB mundial anual, y por encima del 10% para los países de menores ingresos.

Tabla 1: Emisiones de CO₂ por Fuente
(Toneladas por GWh producido)

Fuente de Energía	CO ₂
Carbón	1058
Diesel	742
Gas Natural	608
Geotérmica	567
Nuclear	8,6
Eólica	7,4
Hidráulica	6,6
Fotovoltaica	5,9
Solar Térmica	3,6

Nota: Los datos corresponden a todo el ciclo de vida de la generación eléctrica.

Fuentes: US Department of Energy, Council for Renewable Energy, Worldwatch Institute, CRIEPI.

A nivel internacional, el principal objetivo es estabilizar la concentración de GEI a niveles que no impliquen un riesgo mayor en términos de impactos climáticos. En la actualidad, el objetivo de estabilizar la concentración de GEI expresados en dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq) en la atmósfera en torno a las 450 partículas por millón (ppm) es el que ha cobrado mayor fuerza y concitando mayor apoyo, pues limitaría el incremento de la temperatura global promedio a 2 grados Celsius. Para alcanzarlo, las emisiones de CO₂ eq necesitan llegar a su máximo nivel durante el período 2000-2015 y luego declinar progresivamente hasta el 2030¹⁸.

¹⁶ Ver AIE (2009b).

¹⁷ Stern (2006)

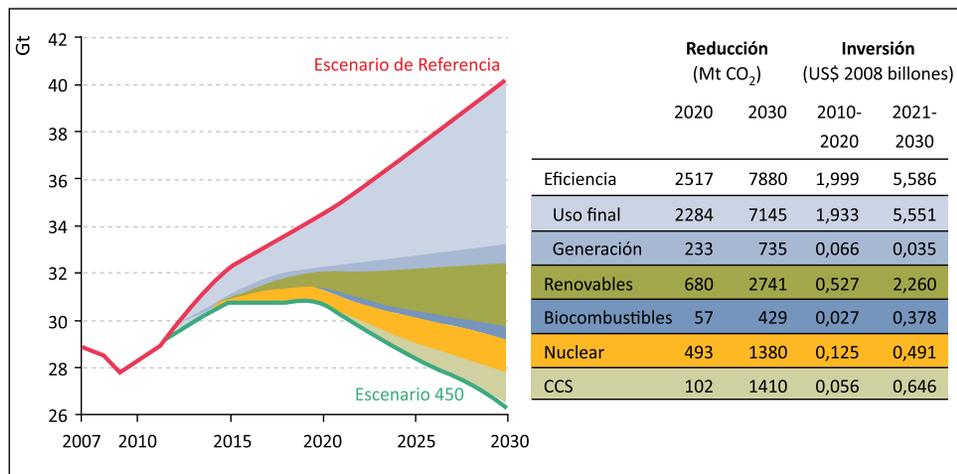
¹⁸ Nobel Lecture by R. K. Pachauri, Chairman of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Oslo, 10 December 2007.



De acuerdo con las estimaciones de la Agencia Internacional de Energía (AIE)¹⁹, el escenario 450 ppm al 2030 está asociado con un nivel de emisiones de 26.355 millones de toneladas de CO₂ eq, lo que requiere una reducción de 35% en relación con lo que proyecta la AIE en el escenario de referencia (es decir, sin tomar ninguna medida específica).

La AIE estima que, para lograr la reducción necesaria de emisiones en los plazos requeridos, no existe una solución única sino que es necesario avanzar simultáneamente en múltiples frentes. Es imperativo hacer un uso más eficiente de la energía y masificar las energías renovables (tanto las convencionales como las no convencionales), pero -ante la magnitud del desafío- también es indispensable introducir tecnologías de captura y secuestro de carbono en las centrales térmicas convencionales y expandir el uso de la energía nuclear (ver gráfico 4). En el caso específico de esta última, la AIE estima que debiese ser capaz de aportar con el 10% de los compromisos de reducción de emisiones a nivel mundial, lo cual requiere un impulso sin precedentes en la inversión destinada a proyectos de esta tecnología.

Gráfico 4: Estrategia de Reducción de Emisiones propuesta por la AIE



Fuente: AIE (2009a).

¹⁹ La Agencia Internacional de Energía es una organización intergubernamental que actúa como asesor en material de política energética a sus 28 países miembros en sus esfuerzos de garantizar a sus ciudadanos la disponibilidad de energía confiable, abordable y limpia. Fundada en 1973-74 durante la crisis del petróleo, actualmente se encarga de asesorar a los países en el diseño de políticas energéticas balanceadas que consideren la seguridad de suministro, el desarrollo económico y el cuidado del medioambiente.

En el contexto de la lucha contra el cambio climático, diversos informes concluyen que si bien es cierto que la energía nuclear no es la solución al problema, no hay solución en los plazos requeridos sin energía nuclear. La energía nuclear surge así como parte de la solución global, como una *necesidad* para enfrentar el cambio climático.

Esta constatación explica el cambio de opinión que han experimentado diversos ambientalistas²⁰, quienes actualmente consideran que la energía nuclear debe jugar un papel fundamental en la matriz energética mundial si se quiere enfrentar eficazmente el calentamiento global. El científico James Lovelock ha sido incluso más enfático al declarar que “no hay tiempo para experimentar con tecnologías visionarias” y que “la energía nuclear es la única solución viable para reducir drásticamente el nivel de emisiones de GEI”²¹.

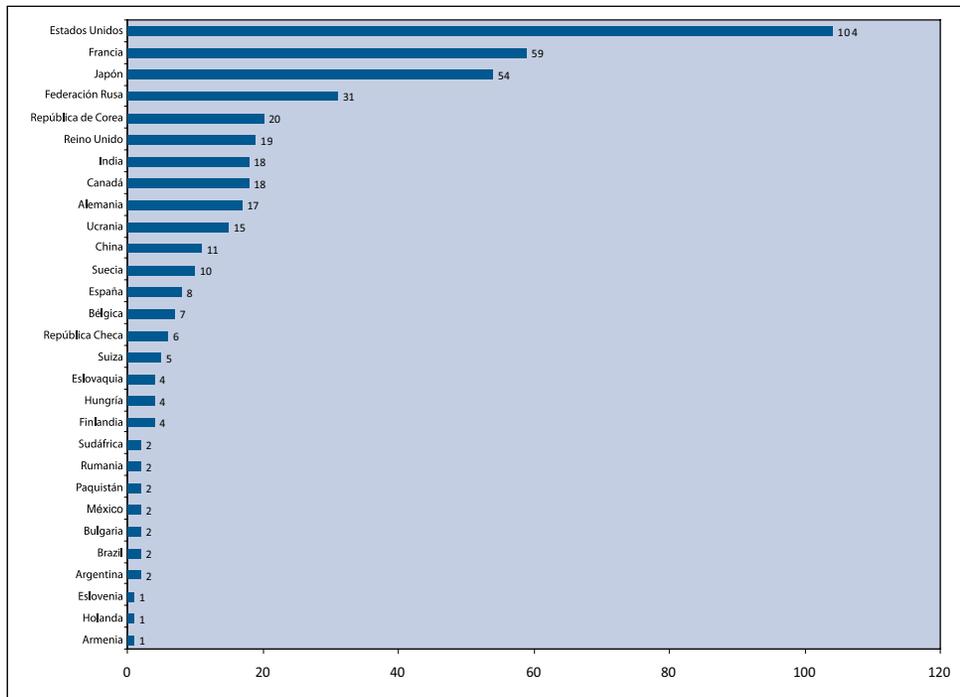
1.3 Renacimiento de la Energía Nuclear

En la actualidad, de acuerdo con la información provista por el OIEA, hay 437 centrales nucleares en operación con una capacidad instalada total de 372 GW (ver gráfico 5). La energía nuclear representa un 14% de la generación eléctrica mundial y un 21,5% de la electricidad de los países de la OCDE. La mayoría de las centrales en operación se encuentran en Estados Unidos, Francia y Japón. El país con el mayor número de centrales nucleares en operación es Estados Unidos con 104 reactores (100 GW instalados que representan el 20% de la generación). Si bien Francia es el segundo país con mayor número de reactores (59), es el país donde esta fuente de energía es la que más aporta a su matriz eléctrica, alcanzando un 78% de la generación.

²⁰Entre los que destacan Patrick Moore (ex-miembro de Greenpeace), Stewart Brand, Stephen Tindale y grupos ambientalistas como, por ejemplo, Environmentalists for Nuclear.

²¹Ver Lovelock (2007).

Gráfico 5: Reactores en Operación



Nota 1: Los 437 reactores en operación tienen una capacidad instalada total de 372 GW.

Nota 2: Los reactores que se encuentran cerrados por término de vida útil (5) no se consideran.

Fuente: OIEA (2008).

Como se señaló previamente, durante los últimos años se ha producido un renovado interés por la energía nuclear, principalmente asociado a tres preocupaciones que están afectando a la mayoría de los países alrededor del mundo: (i) el incremento en los costos de los combustibles fósiles, sobre todo tomando en cuenta el reciente *peak* en el precio del petróleo el 2008, (ii) la seguridad de suministro, que en el caso de Europa ha vuelto a ser un tema relevante después de las restricciones en los envíos de gas desde Rusia, y (iii) el cambio climático. Estas preocupaciones, junto a los avances experimentados por la industria nuclear, especialmente en lo que se refiere a seguridad, ha resultado en un renacimiento de la opción nuclear en el mundo.

Una clara muestra de esta nueva actitud favorable hacia la energía nuclear es el cambio que ha estado experimentando la opinión pública en distintos países. En varios de ellos, tras años de una oposición mayoritaria al desarrollo de esta tecnología, se observa un creciente apoyo hacia esta opción energética, como en los casos de Finlandia, Suecia, Italia, Suiza, Bélgica y

el Reino Unido. Incluso, en algunos de estos países se han revertido decisiones previas que implicaban el término de sus programas nucleares²².

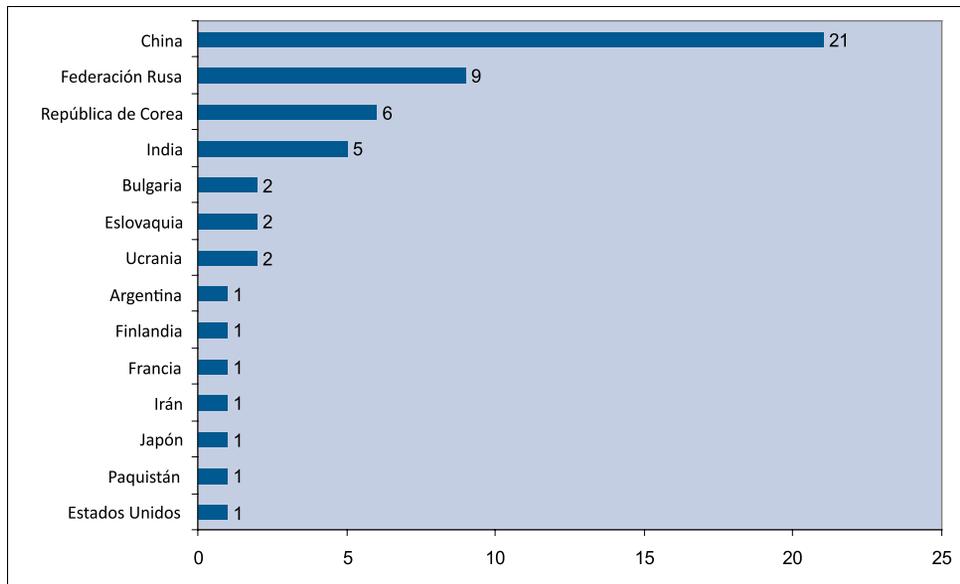
Pero la mejor evidencia del renacimiento de esta opción de generación es el gran número de centrales a las cuales se les está extendiendo la vida útil, así como el significativo número de centrales actualmente en etapa de construcción, además de aquellas que están planificadas y de las que han sido recientemente anunciadas.

En la mayoría de los países con centrales en operación se observa un proceso de extensión de la vida útil de los reactores desde 40 a 50 años, e incluso en algunos casos se estaría extendiendo la operación en 20 años. Como resultado de esta decisión y de las inversiones asociadas, la capacidad nuclear instalada de estos países estaría aumentando en casi un 25% respecto de lo proyectado. Respecto a los proyectos nucleares actuales, muchos de ellos están siendo desarrollados en países que, si bien ya cuentan con energía nuclear, han experimentando un fuerte aumento en su demanda energética (notablemente China e India). Sin embargo, también se observan proyectos en países que previamente no contaban con energía nuclear; incluso, hay avances en países que habían detenido o descartado los programas de núcleo-electricidad, como los casos recién señalados.

Si bien el hecho que se estén construyendo centrales en la mayoría de los continentes indica que el renacimiento nuclear es un fenómeno generalizado, éste es especialmente marcado en Asia. En la actualidad hay 56 centrales nucleares en construcción por un total de 51,9 GW, la mayoría de las cuales se encuentra en China y Rusia (ver gráfico 6). Con estas nuevas centrales, China pasará a ser uno de los países con mayor capacidad instalada nuclear del mundo.

²² En Finlandia el año 1986, tras el accidente de Chernobyl, el porcentaje de personas que mostraban una actitud positiva hacia la energía nuclear estaba cerca del 20%. A partir de entonces, la actitud positiva fue aumentando progresivamente, y desde el año 1996 se ha mantenido por sobre el porcentaje de personas con una actitud negativa hacia la energía nuclear, alcanzando en la actualidad niveles de aprobación cercanos al 50%. En Suiza, tras aprobarse en 1990 por 54,6% una moratoria de diez años a la construcción de nuevas plantas nucleares, el 2003 un 58% de la ciudadanía rechazó una iniciativa para extender la moratoria, así como también una segunda iniciativa que demandaba el cierre gradual de las centrales existentes.

Gráfico 6: Reactores en Construcción



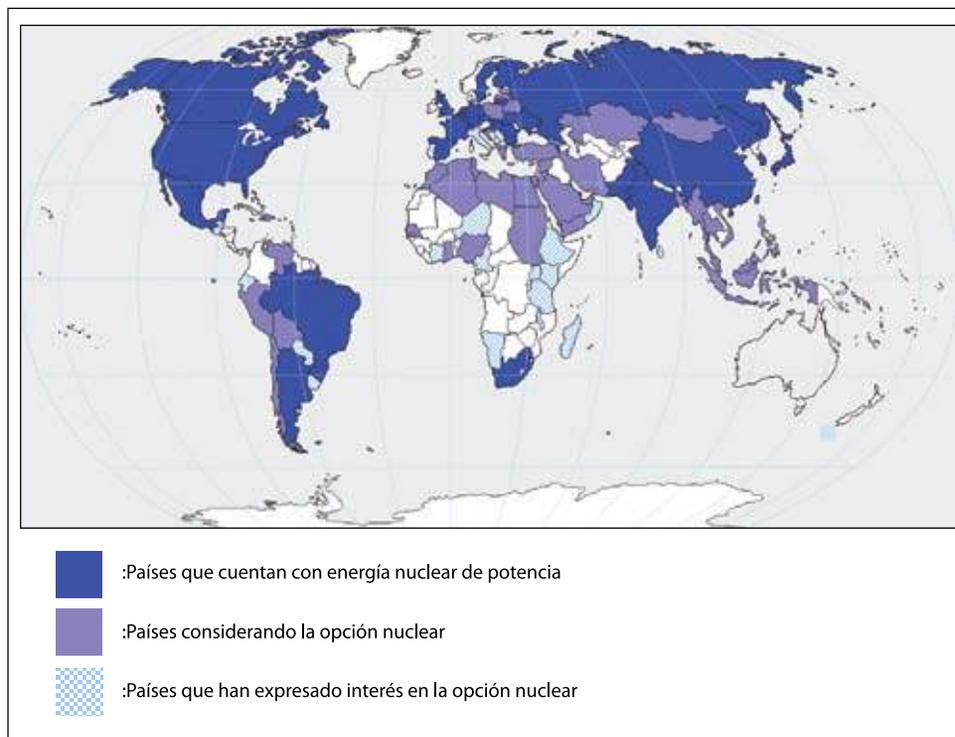
Nota 1: Los 56 reactores en construcción tienen una capacidad instalada total de 51,9 GW.

Nota 2: El número total de reactores incluye dos reactores en construcción en Taiwán, China.

Fuente: OIEA (2008).

Además de las centrales en operación y en construcción, hay un número significativo de proyectos nucleares de potencia en evaluación con distintos niveles de avance: de acuerdo a los antecedentes que maneja el OIEA, hay más de 60 proyectos en estudio. Una parte importante de éstos se encuentra en países que en la actualidad no cuentan con energía nuclear. De concretarse todos estos proyectos, al año 2025 los países con capacidad nuclear aumentarían de 30 a más de 50. Por último, existe un número considerable de países que se encuentran evaluando la conveniencia de la energía nuclear, o que han expresado interés por incluir la núcleo-electricidad en sus matrices eléctricas.

Figura 2: Países considerando la energía nuclear de potencia



Fuente: www.iaea.org.

Al igual que en el resto del mundo, en América hay países que ya cuentan con centrales nucleares en operación, que están extendiendo su vida útil o bien, construyendo nuevas centrales; países que están evaluando nuevos proyectos y países que están considerando introducir la energía nuclear en sus matrices.

Estados Unidos –el país con la mayor cantidad de reactores nucleares del mundo– se encuentra en proceso de renovar y expandir su capacidad nuclear existente. Dado que las licencias de operación de toda una generación de plantas nucleares están cercanas a expirar, el principal esfuerzo se ha concentrado en extenderles la vida útil, permitiéndoles operar otros 20 años una vez que se cumplan los 40 años establecidos originalmente.

De no renovarse las licencias nucleares de las plantas actualmente en operación, dentro de los próximos 20 años prácticamente todas ellas tendrían que dejar de operar. Estas centrales, que generan cerca del 20% de la electricidad consumida por el país, han demostrado producir energía a un costo competitivo, de manera segura y respetando el medioambiente. De hecho,

cada una de ellas evita la emisión anual de 1,2 millones de toneladas métricas de CO₂ eq²³. Por lo tanto, la iniciativa de renovar las licencias de operación no sólo considera aspectos económicos, sino que también ambientales. Además, el gobierno ha hecho pública su intención de apoyar la construcción de nueva capacidad nuclear con el doble objetivo de satisfacer las necesidades energéticas del país, así como de reducir las emisiones de GEI²⁴.

En el caso de Canadá, existen 18 reactores con una capacidad total instalada de 12,6 GW, los cuales generan cerca del 15% de la electricidad que consume el país. Canadá pretende expandir su capacidad nuclear en hasta 9 GW dentro de los próximos diez años con la construcción de nueve reactores. Para satisfacer la demanda eléctrica proyectada, los gobiernos provinciales en conjunto con las empresas del sector, decidieron extender la vida útil de varios de los reactores actualmente en operación. Esto requiere reemplazar algunas de las piezas clave²⁵, actualizándolas para que cumplan con los estándares vigentes.

En México hay dos reactores con una capacidad instalada total de 1,4 GW, los cuales generan alrededor del 5% de la electricidad. Si bien no hay ningún plan concreto para construir nuevas centrales, hay un proyecto para expandir la potencia de los reactores y extenderles la vida útil.

En Sudamérica, sólo Argentina y Brasil cuentan con energía nuclear de potencia. Si bien en ninguno de los dos países la energía nuclear representa un porcentaje importante de la generación eléctrica²⁶, ambos tienen planes para renovar o expandir su capacidad de generación nuclear. En la actualidad, el plan estratégico del sector nuclear argentino tiene contemplado terminar a la brevedad la construcción de la central Atucha II, extender el ciclo de vida de las centrales Atucha I y Embalse, e iniciar los estudios de factibilidad para una cuarta central²⁷. Por su parte, además de proseguir con la construcción de Angra III, el plan nacional de energía de Brasil prevé construir otras cuatro centrales nucleares al 2030.

Por último, además de los planes de expansión de la capacidad nuclear de Argentina y Brasil, en la región al menos Uruguay y Venezuela se encuentran analizando seriamente la opción de introducir la generación núcleo-eléctrica a sus matrices.

²³ ANL (2002).

²⁴ En febrero del 2010 el Presidente Barack Obama anunció que se destinarán US\$ 8,3 billones en préstamos garantizados para ayudar la construcción de dos nuevas centrales en el Estado de Georgia. Estos US\$ 8,3 billones forman parte de US\$ 18,5 billones incluidos en el presupuesto de este año para este propósito. Se espera que en el presupuesto del próximo año este monto alcance los US\$ 36 billones. Este tipo de apoyo gubernamental es clave para asegurar la construcción de nuevas plantas dada la alta inversión inicial requerida.

²⁵ Usualmente las piezas que se renuevan son los generadores de vapor, los canales del combustible y los sistemas auxiliares.

²⁶ Representan el 6,2% de la generación eléctrica total en la Argentina y el 2,8% en el Brasil.

²⁷ CNEA (2006).

Conclusiones

En esta sección ha quedado en evidencia que existe un renovado interés por la energía nuclear alrededor del mundo, el cual se ha traducido en la extensión de la vida útil de los reactores actualmente en operación, en la construcción de nuevos reactores y en el análisis serio de la opción nuclear por parte de un conjunto de países.

Este *renacimiento nuclear* se ha visto impulsado por la necesidad de los distintos países de resguardarse ante el encarecimiento de los combustibles fósiles, asegurar el suministro energético y hacer frente al cambio climático. Respecto a esto último, si bien la energía nuclear por sí sola no puede resolver el desafío de limitar el nivel de emisiones de GEI, no es posible limitar el calentamiento global a 2 grados centígrados sin un crecimiento significativo de la participación de la energía nuclear en la matriz eléctrica mundial.

Lo anterior no significa que la expansión de la energía nuclear sea conveniente para todos y cada uno de los países. Evidentemente, la conveniencia y la factibilidad de introducir la energía nuclear en un país en particular requiere un análisis que considere las características específicas de ese país. En la próxima sección respondemos la siguiente pregunta: ¿es la energía nuclear una alternativa conveniente para Chile?

2. ANÁLISIS DE LA CONVENIENCIA DE LA INCORPORACIÓN DE LA ENP EN CHILE

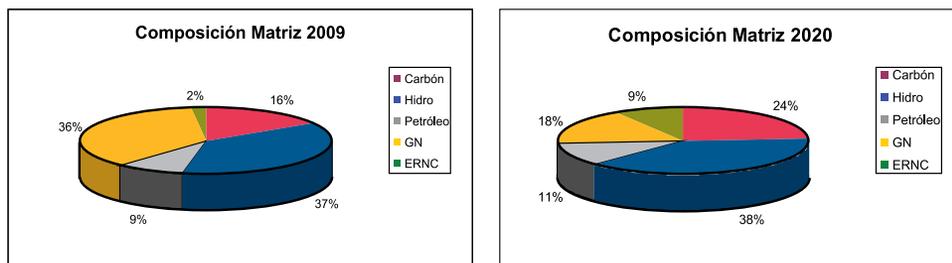
En esta sección se analiza la conveniencia de introducir la generación núcleo-eléctrica en la matriz nacional. Este análisis, que considera las características particulares de Chile, incluye aspectos económicos, técnicos y ambientales, así como de seguridad. En particular, se proyectan las necesidades energéticas del país en el período 2020 - 2035 y se modela permitiendo el ingreso de la energía nuclear a la matriz durante dicho período, para analizar cuál sería el efecto de dicho ingreso en términos de costos, seguridad de suministro y emisiones de GEI.

2.1 Contexto Energético Nacional

Durante el año 2007 el país vivió una crisis energética que puso en serio riesgo el suministro eléctrico. La crisis fue sorteada exitosamente y en la actualidad se están construyendo una serie de instalaciones energéticas que, junto con las que están proyectadas, garantizan que de no producirse un retraso significativo en la ejecución de las inversiones, no debiera haber riesgo de suministro eléctrico en los próximos años²⁸.

Las proyecciones al 2020 (ver gráfico 8) muestran que la matriz eléctrica nacional se vuelve más segura, no sólo por el aumento de capacidad instalada que se produce como resultado de las inversiones en curso más las esperadas para los próximos años, sino principalmente por el cambio en la composición de la matriz.

Gráfico 7: Composición de la Capacidad Instalada 2009 - 2020



Fuente: Elaboración propia a partir de Informe de Precio Nudo octubre 2009.

²⁸En el período 2007-2009 se aprobaron proyectos por un total de 11.899 MW en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), de los cuales alrededor de 3.000 se encuentran actualmente en construcción.

Esta mayor diversificación de la matriz al 2020 se debe al aumento significativo de la participación de las Energías Renovables No Convencionales (ERNC)²⁹, a la menor dependencia del gas natural y al incremento de la participación del carbón, particularmente en el SING.

En el caso del gas natural, la seguridad aumenta no sólo por la disminución de su participación en la matriz, sino también porque con la entrada en operación de los terminales de GNL de Quintero y Mejillones se diversifica los proveedores, reduciéndose así la dependencia del gas argentino. La mayor participación del carbón –que se acerca a lo que fue su participación histórica en Chile y a la presencia que tiene en el mundo desarrollado– es positiva desde el punto de vista de la seguridad de suministro por la abundancia de reservas mundiales y porque las importaciones provienen desde países estables y confiables. Contribuye también en este sentido el que el país reducirá considerablemente su dependencia externa mediante la explotación de las reservas de carbón en la región de Magallanes.

Si bien la matriz al 2020 se vuelve más diversificada, y por lo tanto más segura, comienzan a surgir dos tendencias preocupantes: (i) el alza progresiva en el precio de los combustibles fósiles, y (ii) el nivel de emisiones de GEI.

En primer lugar, el encarecimiento de los combustibles fósiles preocupa por la creciente participación del carbón en la matriz, especialmente en el Norte Grande donde no hay recursos hídricos, lo que resultará en un aumento del costo de la electricidad en Chile. En segundo lugar, se proyecta que durante la presente década las emisiones de GEI aumenten significativamente como resultado del mayor nivel de desarrollo que alcanzará el país. Este aumento en la huella de carbono de nuestra economía se agravará como resultado de la creciente participación proyectada del carbón en la matriz energética. Si bien la presencia proyectada del carbón al 2020 en Chile es inferior a lo que se proyecta para el mundo y se asemeja a la participación proyectada para los países OCDE, esta tendencia no es sostenible si se mantiene más allá del 2020³⁰.

Sin lugar a dudas el país no puede arriesgarse a tener un patrón de crecimiento que resulte en niveles de emisiones mayores que los esperados para los países de la OCDE. Si bien la matriz

²⁹ El aumento significativo de la participación de las ERNC se ha visto impulsado por las adecuaciones regulatorias, la eliminación de barreras, la riqueza de recursos naturales y la disminución en los costos de estas tecnologías.

³⁰ La participación proyectada del carbón en la capacidad instalada total al 2020 para el mundo es 33,5% y para los países OCDE es 23%.

eléctrica³¹ y la economía chilena al 2020 aún serán más limpias que las de los países OCDE, también es cierto que mientras las emisiones per cápita de Chile crecen, las de los países de la OCDE disminuyen, según se ve a continuación .

Tabla 2: Estimación comparada de emisiones
(Ton CO₂ eq /habitante)

Año	CHILE		OCDE Escenario Referencia		OCDE+ Escenario 450	
	Sector Generación	Todos los Sectores	Sector Generación	Todos los Sectores	Sector Generación	Todos los Sectores
2007	1,7	4,4	4,3	10,9	4,3	11,1
2020	2,0	5,8	3,9	9,8	3,1	8,6

Nota: OCDE+ incluye además a los países europeos no OCDE.
Fuente: CNE y AIE (2009a).

Dada la importancia del sector exportador como motor de crecimiento del país, la estructura de las exportaciones (altamente intensivas en energía) y la distancia de nuestro país con respecto a sus principales mercados, la mantención de las tendencias proyectadas más allá del 2020 exponen al país a enfrentar costos asociados a su huella de carbono de tal magnitud que afectarían su capacidad de crecimiento. Por ello es necesario incorporar esta dimensión en nuestra política energética desde ya para poder actuar con suficiente tiempo y reducir la vulnerabilidad a la que estaríamos expuestos en la próxima década.

2.2 Marco General de la Política Energética Nacional

Durante los últimos 30 años la política energética del país se ha basado en la operación de mercados abiertos y competitivos. En este esquema, el Estado cumple un rol regulador, sus actividades empresariales están limitadas y se presume que el mercado proporcionará un nivel adecuado de seguridad de suministro³².

Una de las lecciones de la realidad energética mundial –marcada por el progresivo agotamiento de los combustibles fósiles, la creciente preocupación por la seguridad de suministro y los problemas asociados al cambio climático– es que el mercado por sí solo no es capaz de

³¹ Para la matriz eléctrica nacional se proyectan emisiones de 365 Ton de CO₂/GWh para el 2020 mientras que la proyección de referencia de la AIE para los países OCDE asciende a 418 Ton de CO₂/GWh.

³² AIE (2009a).

enfrentar los nuevos desafíos y que se requiere, por tanto, un rol más proactivo por parte del Estado para conciliar los objetivos energéticos y de competitividad con los de seguridad y sustentabilidad.

En el caso de Chile, se necesita que el Estado asuma la evaluación de temas complejos que requieren decisiones que superan el rol y responsabilidad del sector privado, así como también que establezca una política energética de largo plazo coherente con la política global de desarrollo nacional. Esta política debe ser explícita, clara, fundamentada y ampliamente aceptada³³, de manera que pueda orientar las decisiones de inversión privada.

En este ámbito se han registrado avances significativos. El Estado ha tomado gradualmente un rol más proactivo en relación con el seguimiento del desarrollo energético, la evaluación sistemática de riesgos y la armonización de los objetivos básicos de la política energética (eficiencia, sustentabilidad ambiental, seguridad de suministro y equidad), teniendo presente que el crecimiento del sector energético es estratégico para el desarrollo del país. Dentro de este contexto, la creación e implementación del Ministerio de Energía se espera que sea clave en el objetivo de proporcionar una visión integral de la política energética nacional, fortalecer la mirada institucional y mejorar la capacidad rectora y coordinadora del Estado en materia energética.

Por otra parte, además de los desafíos locales en materia energética, hay una serie de desafíos externos, entre los que destaca la preocupación por el cambio climático. Esta preocupación ha impulsado a una serie de países a adoptar compromisos respecto a sus emisiones de GEI y a desarrollar políticas de mitigación a través de mecanismos directos e indirectos. A medida que estos mecanismos sean implementados masivamente, esto tendrá implicancias en el desarrollo económico de Chile.

En resumen, dada la creciente inserción económica y política de Chile en el mundo, resulta muy probable que se materialicen escenarios en los que no sólo pudiese ser exigible al país la implementación de acciones en materia de mitigación de emisiones, sino que también se establezcan exigencias específicas a las exportaciones nacionales, ya sea a través de restricciones a la “huella de carbono” u otros mecanismos similares. Esto último puede suceder a partir de una decisión unilateral de los países o como requerimiento de los propios consumidores.

33 CNE (2008).

Estos escenarios presentan un claro ejemplo de cómo el sector energía puede afectar transversalmente a la economía nacional. Teniendo estos desafíos presentes, el gobierno ha implementado una serie de medidas dirigidas a impulsar el desarrollo de las ERNC³⁴ y promover la eficiencia energética³⁵. Estas medidas no sólo se hacen cargo de la problemática ambiental global, sino que están en línea con los objetivos explícitos del gobierno de *incrementar la seguridad energética a través de la diversificación de fuentes, reducción de la dependencia externa, incremento en la sustentabilidad de la matriz y aumento en la equidad en el acceso a la energía*.

2.3 Prospectiva Energética

El Análisis Prospectivo es clave en la evaluación de políticas públicas de largo plazo. Esta tarea tiene como objetivo analizar la robustez de las decisiones que estamos tomando hoy y anticipar potenciales debilidades mediante el estudio de diversos escenarios.

Por medio de un análisis prospectivo se analiza la eventual entrada de la energía nuclear en el país, en conjunto con otras opciones tecnológicas, desde la perspectiva de un planificador centralizado. Este análisis incluye aspectos ambientales globales —el impacto de la energía nuclear en las emisiones globales de GEI— pero excluye las emisiones y otros impactos ambientales locales ya que corresponden a situaciones específicas del sitio de emplazamiento que no pueden ser evaluadas a priori.

A continuación se presentan dos escenarios (Referencia y Nuclear) que analizan el período 2010-2035 y que sólo se diferencian porque uno permite la incorporación de la núcleo-electricidad en la matriz eléctrica nacional. Se utilizan modelos validados internacionalmente (MAED y MESSAGE³⁶) que determinan el desarrollo eléctrico óptimo (mínimo costo) para satisfacer los requerimientos eléctricos proyectados. Los resultados fueron revisados por expertos internacionales y contrastados con los resultados arrojados por el modelo que habitualmente usa la CNE³⁷. Para mantener la coherencia del trabajo de prospectiva de largo plazo

34 A través de modificaciones legales y regulatorias, el establecimiento de incentivos tributarios, la eliminación, la eliminación de barreras que enfrentan este tipo de tecnologías y la adecuación de la institucionalidad con la creación de la División de Energía Renovable en el Ministerio de Energía y el Centro de Energías Renovables.

35 A través de un aumento explosivo del presupuesto destinado a financiar distintas medidas, modificaciones legales y regulatorias, incentivos tributarios y la adecuación de la institucionalidad con la creación de la División de Eficiencia Energética en el Ministerio de Energía y la Agencia de Eficiencia Energética.

36 Model for Analysis of Energy Demand (MAED) y Model for Energy Supply System Alternatives and their General Environmental impacts (MESSAGE) utilizados por el OIEA.

37 Modelo Operación de Sistemas Eléctricos (OSE 2000).

con el de mediano plazo, para el período 2010 – 2019 se utilizan los resultados del Plan de Obras del SIC y del SING de octubre 2009, mientras que para el período 2020 – 2035 se usan los resultados de los modelos de largo plazo.

Estos escenarios se basan en los principales supuestos imperantes en el escenario energético actual y en los antecedentes que posee la CNE y el Ministerio de Energía:

- Eficiencia energética en la demanda (20% de reducción en el crecimiento esperado en la demanda basal sin eficiencia al año 2020).
- Tendencias al alza de los precios de los combustibles fósiles.
- Costos de inversión en tecnologías convencionales sin cambios relativos.
- Fuertes bajas en la inversión de tecnologías renovables no convencionales (en el horizonte 2020-2030).
- La obligación de cumplir la Ley de Energías Renovables No Convencionales³⁸.
- La mantención de las reglas actuales del mercado, lo que implica que cada tecnología se incorporará en función de su competitividad.

Ambos escenarios consideran los costos de inversión y operación iniciales declarados en el último Informe de Precio de Nudo de Octubre de 2009³⁹. Para los casos de nuclear y solar se consideraron datos generados por estudios internacionales, según se observa a continuación.

³⁸ Ley N° 20.257.

³⁹ Ver CNE (2009).

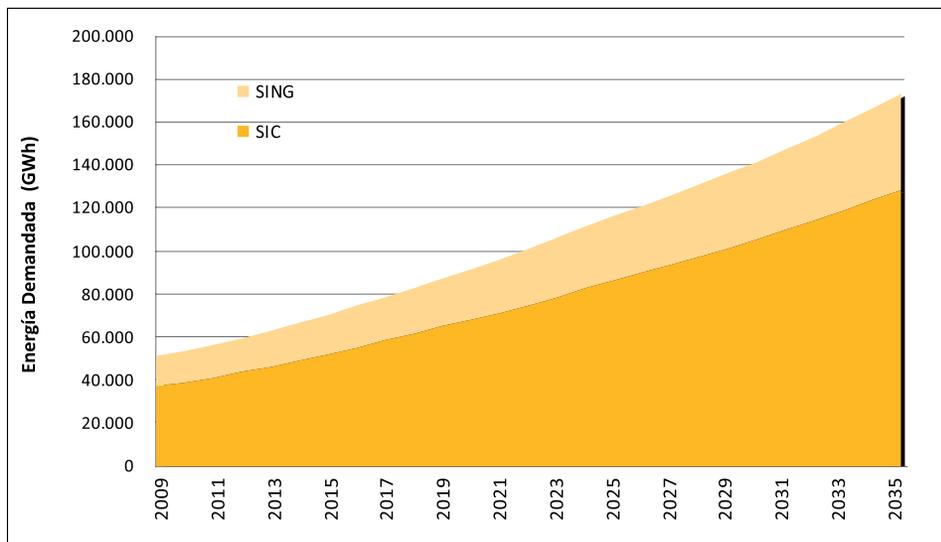
Tabla 3: Parámetros por Tecnología

Tecnología	Costo de Inversión (US\$/KW)	Costo Variable Total (US\$/MWh)	Tiempo de Construcción (Años)	Módulos (MW)	Vida Útil (Años)	Costo Medio 2009 (US\$/MWh)
Diesel	450	99,0	1	50	20	105,6
Carbón	2.300	37,9	3	200	30	71,8
GNL	700	75,3	2	200	25	85,1
Hídrica Convencional	2.000	5,0	4	45	50	44,9
Hídrica ERNC	2.200	5,0	2	20	50	42,4
Eólica	1.800	7,7	1	50	20	88,2
Geotérmica	3.550	2,0	2	16	40	51,1
Solar (Concentración)	4.500	4,5	1	1	20	177
Biomasa	1.800	15,3	2	30	30	40,2
Nuclear	3.500	20,0	6	1.100	40	68,1

Fuente: CNE (Informe de Precio Nudo, Octubre de 2009); MZConsulting (en elaboración), AIE (2008).

En ambos escenarios se considera un crecimiento anual de la demanda eléctrica durante la década del 2010 en torno al 5,4%⁴⁰ promedio entre ambos sistemas (SIC y SING) y del 4,3%⁴¹ después de dicho periodo (ver gráfico 9). Estas proyecciones incorporan un uso crecientemente eficiente de la energía.

Gráfico 8: Proyección de Demanda SIC y SING



Fuente: Elaboración propia a partir de Informe de Precio Nudo, Octubre de 2009 y proyecciones modelo MAED.

⁴⁰ CNE (2009).

⁴¹ PROGEO - U. de Chile (2009).

Por otra parte, ninguno de los dos escenarios considera los potenciales efectos de un mercado de emisiones de CO₂, los ingresos monetarios resultantes del uso del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) o eventuales restricciones a las emisiones de GEI del país.

En el Escenario Nuclear se incorporan módulos nucleares dentro del conjunto de proyectos disponibles en el modelo. Se considera que no sería factible la entrada en operación de una central nuclear de potencia antes del 2020⁴². Ello, debido a los tiempos requeridos para desarrollar la infraestructura institucional que permitiera la implementación segura de un PNP⁴³ y para licitar, adjudicar y construir una central de esta tecnología.

En el Escenario Nuclear se considera la operación de SIC y SING interconectados⁴⁴. Los costos utilizados son de reactores comerciales de tecnologías probadas e incluyen los costos asociados al combustible nuclear, la gestión del combustible gastado y el desmantelamiento de la planta. Cabe destacar que esto último representa un sesgo contra la energía nuclear en el modelo, ya que se trata de la única fuente de energía que lo considera dentro de los costos operacionales.

2.3.1 Escenario de Referencia

Si bien desde el punto de vista de los costos, algunas de las energías renovables (hidroelectricidad, geotermia y biomasa)⁴⁵ aparecen como las alternativas más competitivas, cuando se incorporan supuestos realistas respecto a las restricciones para su explotación se obtiene que también se requerirá mayor generación en base a combustibles fósiles; en especial en base a carbón, ya que ésta es la tecnología de generación térmica más económica. En efecto, las proyecciones muestran que el desarrollo eléctrico será en base a la entrada en operación de nuevos proyectos de energías renovables (en particular las ERNC) y también a la mayor generación de centrales a carbón.

⁴²SYSTEP (2009) identifica la necesidad de avanzar en diversos frentes antes de poder estar en condiciones de iniciar un proceso de licitación para la construcción de una central. Se requiere efectuar definiciones políticas y técnicas que permitan la adecuada evaluación e implementación de un proyecto de este tipo, contar con un proceso de información, educación y discusión pública de la materia, y un marco legal y regulatorio apropiado, entre otras.

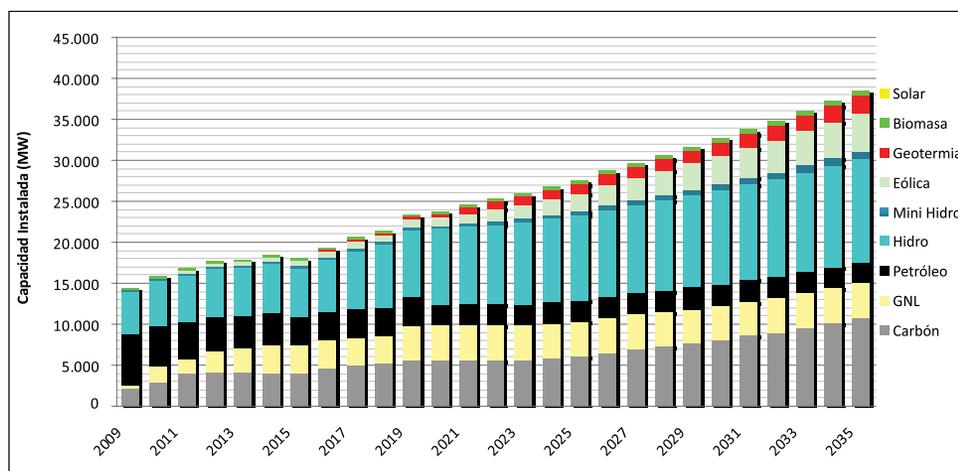
⁴³De acuerdo a los plazos sugeridos por el OEIA, se requieren aproximadamente entre 10 y 12 años para preparar la infraestructura nacional y para la construcción de una planta. Ver OEIA (2008).

⁴⁴En un análisis preliminar, la interconexión de ambos sistemas resulta ser una inversión rentable para el país por los ahorros que permite al generar una escala de mercado suficiente para un mejor aprovechamiento de las centrales nucleares consideradas. Sin perjuicio de lo anterior, en las próximas etapas sería necesario evaluar proyectos concretos de interconexión. En todo caso, el principal resultado de este análisis -que es la conveniencia económica de introducir la energía nuclear en la matriz eléctrica durante la próxima década- es independiente del supuesto de interconexión SIC -SING.

⁴⁵En el caso de la energía solar, su ingreso dependerá de las condiciones de cada proyecto.

Dado los mayores tiempos que toma la realización (diseño, tramitación de autorizaciones y construcción) de los proyectos hidroeléctricos, se observa al inicio del período de proyección un aumento significativo del carbón en la matriz eléctrica, tanto en capacidad instalada como en generación (ver gráficos 10 y 11). La expansión del carbón en términos de capacidad instalada es transitoria y se detiene con la entrada en operación de centrales hidroeléctricas. En la medida que se va agotando el potencial hidráulico utilizable en el SIC, crece nuevamente la importancia relativa del carbón (ver gráfico 10). En términos de capacidad instalada, el carbón sube de una participación inicial inferior al 15% a niveles en torno al 24% el 2020, para reducir levemente su participación por unos años y retomar un crecimiento que alcanzaría alrededor de un 25% el 2030 y 28% el 2035. Por el lado de la generación, la participación de este combustible sube desde algo menos que el 30% el 2009 a casi un 45% el 2012, para tender al 38% el 2020. Los primeros 5 años de la década del 2020 se registran leves caídas en su participación y a partir de entonces comienza un alza sostenida alcanzando el 2030 una participación de 39% y 43% al 2035. Dada el alza proyectada en los precios del carbón, esta creciente participación del carbón en la matriz tenderá a encarecer la electricidad.

Gráfico 9: Proyección de Capacidad Instalada en Escenario de Referencia (SIC + SING)

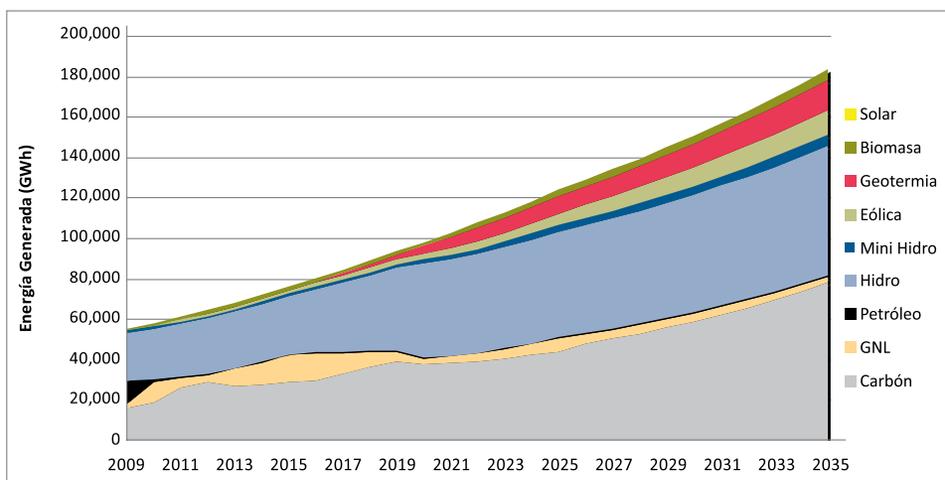


Fuente: Elaboración propia a partir de Informe de Precio Nudo, Octubre 2009, y proyecciones modelo MESSAGE.

Durante todo el período se observa una creciente participación de las ERNC alcanzando niveles por encima de los exigidos por la ley. De hecho, llegan a representar alrededor de un 10% del SIC y SING al 2020⁴⁶ y un 20% al 2030, tanto en capacidad instalada como en generación. Considerando también la hidroelectricidad convencional, la participación de la energía renovable en la capacidad instalada crece hasta alcanzar un 47% el 2020 y un 55% al 2030.

Si se considera la generación en términos absolutos, la electricidad producida por centrales a carbón crece casi continuamente durante todo el período⁴⁷ (ver gráfico 11). Esto se debe al crecimiento del consumo eléctrico y a la operación más continua de estas centrales térmicas. La generación a carbón crece de 37.703 GWh al comienzo del periodo a 78.232 GWh al 2035.

Gráfico 10: Energía Generada SIC + SING en Escenario de Referencia



Fuente: Elaboración propia a partir de Informe de Precio Nudo, Octubre 2009, y proyecciones modelo MESSAGE.

Evidentemente, el aumento en la generación en base a carbón tendrá un impacto negativo en términos de los esfuerzos de mitigación de emisiones de gases responsables del cambio climático. De acuerdo con las estimaciones, las emisiones de GEI del sector eléctrico pasarán de los 25 MM de toneladas de CO₂ estimados para el 2009, a más de 37 MM de toneladas al 2020 y a aproximadamente 57 MM de toneladas al 2030 (ver gráfico 12).

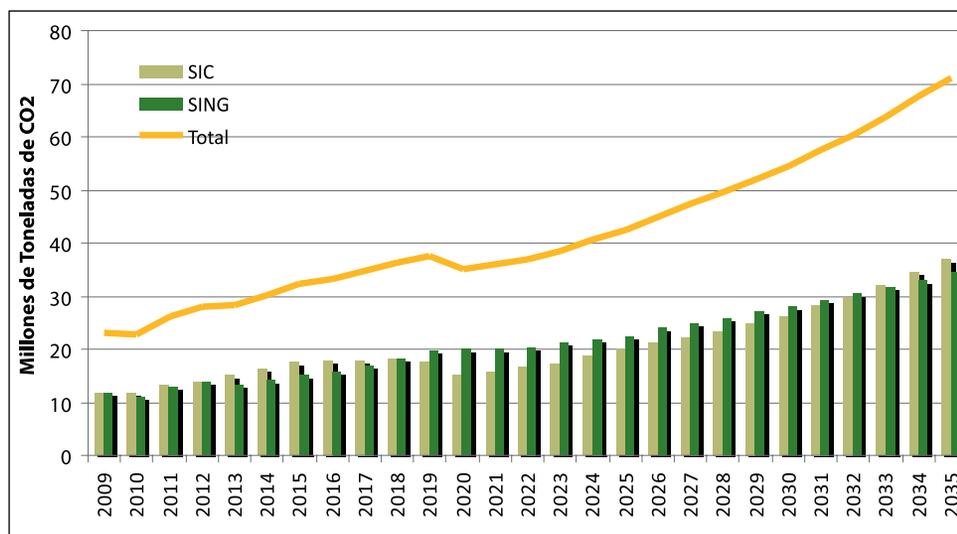
46 Las proyecciones no incorporan las complejidades para la red de una provisión con fuentes intermitentes, por lo que en la práctica pueden experimentar ajustes aún en un escenario optimizado.

47 Sólo se proyectan caídas absolutas en la generación en base a carbón el 2013 y el 2020.

Resulta interesante observar que en el SING, pese a su menor tamaño, las emisiones de CO₂ son similares a las del SIC. Esto se debe a que en el SING no hay alternativas competitivas suficientes para abastecer su demanda base con fuentes libres de emisiones.

Aún cuando la participación de las energías renovables previstas en Chile para la década del 2020 (por sobre el 50% de la capacidad instalada⁴⁸) supera ampliamente las proyectadas para los países más desarrollados, como consecuencia del aumento de la generación térmica basada en carbón, las emisiones de GEI del sector eléctrico crecerán significativamente. Si bien las emisiones por habitante proyectadas para Chile al 2030, del sector eléctrico y las de toda la economía, son inferiores durante todo el período a las que se estiman para los países OCDE en el escenario de referencia de la AIE⁴⁹, las emisiones nacionales superan los niveles proyectados por la AIE para los países OCDE en el escenario 450 ppm⁵⁰. Sin lugar a dudas, estas proyecciones anticipan un escenario complejo que, dadas las eventuales restricciones asociadas a la huella de carbono, finalmente pueden terminar impactando negativamente nuestra capacidad de crecimiento y desarrollo.

Gráfico 11: Emisiones de CO₂ SIC + SING Escenario de Referencia



Fuente: Elaboración propia a partir de Informe de Precio Nudo, Octubre 2009, y proyecciones modelo MESSAGE.

48 Para el período 2020-2029, las energías renovables representan más del 50% de la capacidad instalada en todos los años, salvo el 2020 (47,6%) y el 2021 (49,2%).

49 Las emisiones per capita proyectadas al 2030 para el sector eléctrico (2,9 Ton CO₂/hab) y para el país (7,6 Ton CO₂/hab) son inferiores a las proyectadas para la OCDE en el escenario de referencia (3,87 y 9,61, respectivamente).

50 En el escenario 450 ppm de la AIE, las emisiones proyectadas para los países OCDE+ ascienden a 1,36 en el sector eléctrico y a 5,91 en toda la economía.

2.3.2 Escenario Nuclear

2.3.2.1 Consideraciones preliminares

La eventual incorporación de la generación núcleo-eléctrica a la matriz nacional implica una serie de desafíos que se analizan en extenso más adelante en este documento. Este capítulo se limita a evaluar la conveniencia económica y ambiental de largo plazo respecto de introducir la opción nuclear en la matriz eléctrica.

De acuerdo a las perspectivas de desarrollo de Chile, se espera que los sistemas SIC y SING (que hoy operan aislados) al año 2030 posean en conjunto una capacidad instalada agregada superior a los 30.000 MW y cercana a los 39.000 MW el 2035. Esto indica que el tamaño del sistema no sería una restricción a la incorporación de una unidad nuclear, ya que ésta no significaría un riesgo para la estabilidad del mismo. Esto considera la recomendación del OIEA con respecto a que la participación de un reactor nuclear no debe superar el 10% de la capacidad de generación eléctrica instalada⁵¹. En el presente análisis se usó módulos de 1.100 MW que operan en base a uranio, por ser los más comúnmente utilizados en la actualidad⁵².

Si bien los costos de inversión de la energía nuclear son superiores a la mayor parte de las energías convencionales, los costos de operación son relativamente bajos y estables⁵³ en comparación con los de tecnologías de combustibles fósiles.

El costo de inversión promedio en el mundo se ubica torno a los 3.500 US\$/kW instalado, con un rango que llega hasta los 4.500 US\$/kW, aunque hay casos de reactores cuyo costo de inversión se ha elevado por sobre esa cifra⁵⁴ así como también valores bastante inferiores⁵⁵. Se estima

51 Sin interconexión entre ambos sistemas, el SING no tendría tamaño suficiente para incorporar de manera segura las centrales nucleares que están siendo consideradas en el modelo por lo que su introducción ocurriría solo en el SIC.

52 En términos de tamaño, los reactores nucleares se ubican en los siguientes rangos: 800 a 900 MW, 1.000 a 1.100 MW, y finalmente alrededor de los 1.600 MW. En el primer rango se encuentran los reactores PHWR, en el segundo rango conviven PHWR, PWR y BWR, y en el tercer rango principalmente reactores BWR y PWR. No obstante, la tendencia es a la producción de módulos cada vez mayores. No se incluyen en este análisis reactores de torio, dado que corresponden a tecnologías con un desarrollo comercial escaso a nulo en el mundo, de los cuales se dispone poca información y con problemáticas diferentes a las tratadas en este documento.

53 Esta particularidad es común a todas las tecnologías -reactores de uranio enriquecido y agua liviana (PWR o BWR) o reactores de uranio natural y agua pesada (PHWR)

54 El costo de inversión del reactor EPR en Olkiluoto, Finlandia, ha experimentado un alza considerable debido a un retraso significativo en la etapa de construcción.

55 En Diciembre de 2009 los Emiratos Árabes Unidos aceptaron una propuesta de un consorcio surcoreano (liderado por KEPCO) para construir cuatro reactores al 2020 con una capacidad instalada total de 5,6 GW. El costo de construir el reactor APR1400 es de US\$ 2.300 por kilowatt.

que las cifras asociadas a la reciente licitación en los Emiratos Árabes Unidos (2.300 US\$/kW) tengan un gran impacto en el mercado y en los costos de inversión de los próximos proyectos.

En cuanto a los costos de operación, éstos son bajos y estables debido a la baja incidencia del precio del combustible en el costo de operación. En el caso de los reactores tipo Pressurized Water Reactor (PWR) o Boiling Water Reactor (BWR), donde el enriquecimiento encarece la fabricación del combustible, el costo variable de combustible, en función de los actuales precios del uranio, alcanza los 6 US\$/MWh. Si al costo del combustible se le agrega el costo de mantenimiento, la gestión del combustible gastado (manejo de residuos o reprocesamiento de éstos) y la reserva para el desmantelamiento final de la planta, el costo variable total bordearía los 20 US\$/MWh⁵⁶. Los costos de operación han venido disminuyendo paulatinamente, principalmente por el mejoramiento de las técnicas de manejo y quemado del combustible al interior del reactor⁵⁷.

El costo medio de la generación nuclear, considerando tanto los costos de inversión como los costos variables totales, se sitúa por debajo de los US\$70/MWh. La generación nuclear aparece, por lo tanto, como una alternativa competitiva en la actualidad frente a la generación térmica en base a carbón, GNL y diésel, lo que se explica entre otros factores por el bajo costo variable que exhibe la operación de las centrales nucleares. La mayor competitividad de la generación nuclear frente a las otras centrales térmicas aumenta a lo largo del período analizado, como consecuencia del encarecimiento esperado de los combustibles fósiles.

2.3.2.2 Resultados

2.3.2.2.1 Análisis económico

Desde una perspectiva económica, el ingreso de la energía nuclear resultaría conveniente para el país ya que permitiría (i) acceder a menores costos de generación al reemplazar generación en base a carbón, y (ii) profundizar la diversificación de la matriz, lo cual ayudaría a fortalecer la seguridad de suministro y a contar con costos más estables.

El principal resultado de las modelaciones es que la generación núcleo-eléctrica surge como parte de la matriz óptima del país. A pesar de que el costo medio actual de la generación

⁵⁶ Información generada a partir de información recogida de casos en EE.UU., Finlandia y Japón.

⁵⁷ OIEA (2008).

nuclear ya es más competitivo que el de las otras formas de generación térmica⁵⁸, el modelo recomienda su incorporación recién a partir del 2024. Esta aparente paradoja se explica por dos factores.

En primer lugar, como se señaló anteriormente, en el modelo se incorporó la siguiente restricción explícita: la generación nuclear no puede iniciarse antes del 2020 dado que el país no estaría en condiciones de implementar un PNP de manera segura antes de ese año. El segundo factor es que durante los primeros años de la década del 2020, el modelo proyecta que el consumo eléctrico del país será satisfecho íntegramente por la entrada en operación de proyectos renovables (principalmente hidroeléctricos convencionales, pero también pequeños proyectos hídricos, geotermia y biomasa). Como el costo medio de esas fuentes de generación es inferior al de la energía nuclear, la entrada óptima de la primera central se produce recién cuando la expansión de la generación de energías renovables (principalmente hidroelectricidad) es insuficiente para hacerse cargo de todo el crecimiento de la demanda y comienza nuevamente a requerirse la incorporación del carbón, lo que recién ocurre el 2024. Entre 2024 y 2035, entrarían 5 módulos nucleares de 1.100 MW cada uno⁵⁹. Durante ese período todos los requerimientos adicionales de capacidad instalada se satisfacen con inversiones en energía nuclear y fuentes renovables, sin nuevos proyectos basados en combustibles fósiles.

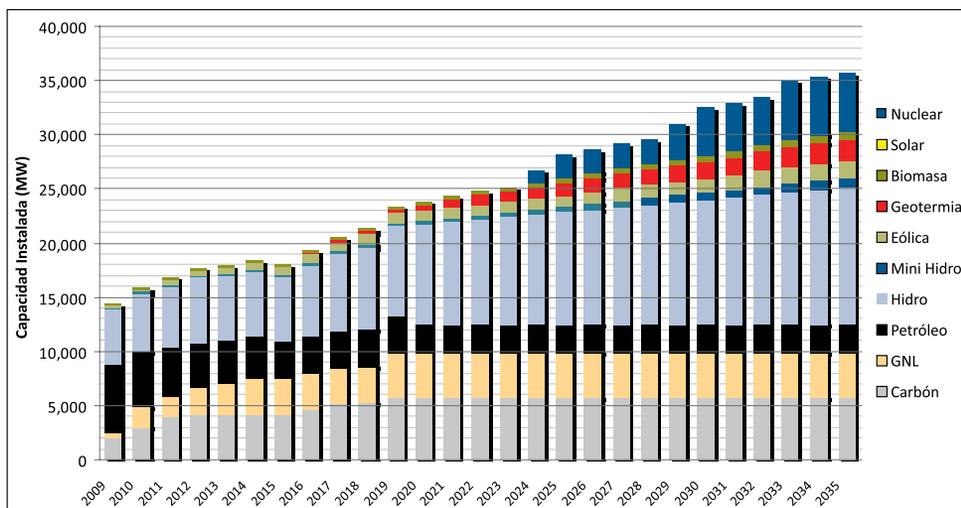
En términos de la participación de las distintas fuentes de generación en la capacidad total, el principal cambio que se observa respecto al escenario de referencia es que la importancia del carbón cae significativamente (ver gráfico 13). De hecho, la caída transitoria que se observa en la participación del carbón en el escenario de referencia a partir del 2017 se convierte en permanente para terminar el 2035 en tan solo un 15,8%. Después de su incorporación, la energía nuclear aumenta su participación en la capacidad instalada hasta alcanzar algo más del 15% al 2035. La participación de las energías renovables se ven levemente afectadas por la entrada de la energía nuclear, alcanzando éstas al final del período un valor cercano al 50%⁶⁰. La disminución se produce en inversiones eólicas.

58 Como se observa en la tabla 3 para el 2009, el costo medio de la generación nuclear es mas bajo que el de la generación en base a carbón, GNL y petróleo. Como a futuro las proyecciones de combustibles fósiles son crecientes, la ventaja en términos de costos de la generación núcleo-eléctrica se mantiene durante todo el período.

59 Si se considera un escenario sin interconexión SIC - SING, la energía nuclear también sería incorporada en el desarrollo óptimo del sector eléctrico, con la diferencia que esto ocurriría recién el 2025 y en el período sólo ingresarían 3 unidades (por cierto, todas en el SIC).

60 En el escenario de referencia, la participación de la energía renovable en la capacidad instalada total llega a algo más del 54%.

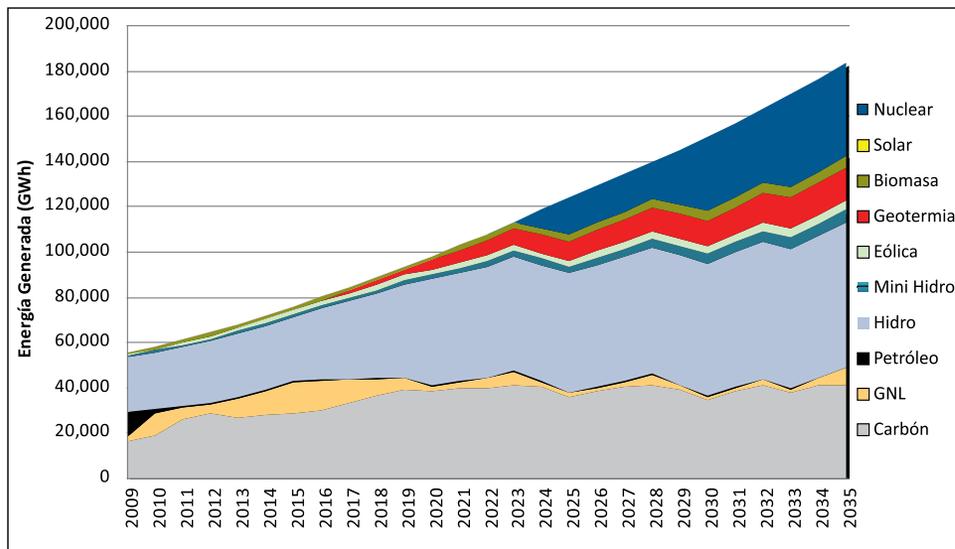
Gráfico 12: Proyección de Capacidad Instalada en Escenario Nuclear (SIC + SING)



Fuente: Elaboración propia a partir de Informe de Precio Nudo, Octubre 2009, y proyecciones modelo MESSAGE.

Por el lado de la generación, la incorporación de la energía nuclear resulta en una participación creciente hasta representar un 22% del total (ver gráfico 14). En comparación con el escenario de referencia, la generación núcleo-eléctrica desplaza a otras fuentes que operan como potencia de base pero a mayor costo, principalmente carbón. Por ello, la participación del carbón cae hasta alcanzar un 22% de la generación total al 2035 gracias a la incorporación de la energía nuclear. Asimismo, aunque en menor medida, reduce la generación de las centrales de ciclo combinado a GNL y la generación eólica. Con todo, la generación total de las energías renovables se mantiene durante todo el periodo sobre el 50%. Así, la matriz eléctrica nacional contaría con más de un 70% de generación libre de emisiones de GEI al 2035.

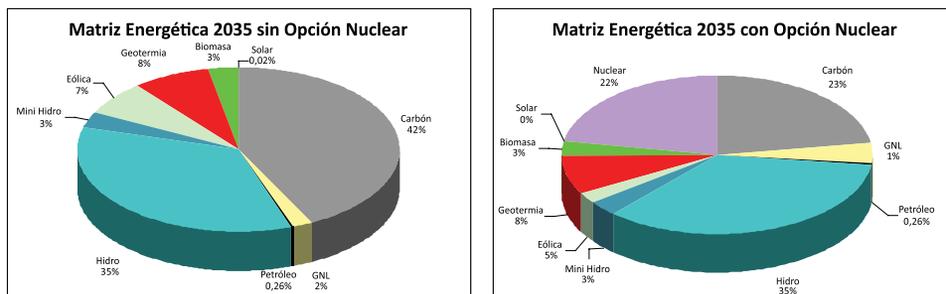
Gráfico 13: Generación en Escenario Nuclear (SIC + SING)



Fuente: Elaboración propia a partir de Informe de Precio Nudo, Octubre 2009, y proyecciones modelo MESSAGE.

La matriz eléctrica que resulta con la incorporación de la energía nuclear no es sólo más competitiva sino que además es más diversificada y, por ende, más segura (ver gráfico 15). La mayor diversidad de fuentes reduce los riesgos de suministro y además da mayor certeza y estabilidad respecto a los costos de la electricidad al reducir significativamente la participación de los combustibles fósiles⁶¹.

Gráfico 14: Diversificación de la matriz eléctrica SIC + SING (generación).



Nota: Los porcentajes presentados no suman necesariamente 100%, por efecto de las aproximaciones.

Fuente: Elaboración propia a partir de proyecciones modelo MESSAGE.

⁶¹ Con la introducción de energía nuclear se reduce la participación de los combustibles fósiles en la generación del 2035 desde un 44% (en el escenario de referencia) a un 27%.

Los resultados que se han presentado en esta sección corresponden al escenario que, a la luz de la información disponible parece el más probable. Sin perjuicio de ello, el resultado principal del análisis, es decir la conveniencia de introducir la energía nuclear en la matriz en la década del 2020, se obtiene para una amplia gama de escenarios alternativos considerando distintos supuestos. Variaciones en los escenarios considerando otras alternativas razonables de supuestos respecto a las proyecciones de precios de los combustibles, a los costos de las tecnologías, al tamaño de las plantas nucleares, a la interconexión y a la velocidad de entrada de las energías renovables sólo afectan la fecha de ingreso de la primera central nuclear y el número de centrales que ingresarían en el período contemplado.

2.3.2.2 Suministro de combustible nuclear

En la evaluación del riesgo de suministro asociado a la mayor diversificación de la matriz se asume que el suministro de combustible nuclear es seguro. Por ello resulta fundamental revisar la experiencia y los antecedentes disponibles respecto a esta materia.

La experiencia internacional ha demostrado que ni la disponibilidad local de uranio ni la capacidad de manejar por completo el ciclo de combustible nuclear son requisitos para el desarrollo de un PNP. En el caso de aquellos países que dependen del abastecimiento externo de combustible nuclear, la suspensión del suministro no representa un riesgo relevante.

El bajo riesgo de suministro de combustible nuclear se debe a las reservas demostradas y proyectadas de uranio; a que los depósitos de uranio están distribuidos alrededor del mundo en diversas áreas geográficas; a que los principales proveedores de uranio presentan un bajo riesgo geopolítico; y a que –dependiendo de la tecnología– existen múltiples proveedores de servicios para cada una de las etapas del ciclo de combustible⁶². Los análisis de más largo plazo incorporan también como combustible para la generación nuclear al torio, que es un mineral aún más abundante.

Con los niveles de consumo actuales, se estima que los recursos identificados de uranio alcanzarían para 80 años de suministro⁶³. No obstante, esta estimación no representa el stock total de uranio disponible en la corteza terrestre, sino que refleja la situación dadas las condiciones económicas actuales. Esto significa que, de seguir mejorando las perspectivas del precio del uranio, es esperable que aumenten las exploraciones y se concreten nuevos descubrimien-

62 Dentro de las cuáles destacan las etapas de conversión, enriquecimiento y fabricación de elementos combustibles.

63 OECD NEA-IAEA (2008).

tos⁶⁴. De hecho, desde el 2002 la exploración de uranio se ha más que triplicado en respuesta a los mayores precios⁶⁵.

Con respecto a la distribución geográfica de las reservas de uranio, éstas se ubican principalmente en trece países⁶⁶, dentro de los cuales destacan Australia, Kazajistán y Canadá. Los requerimientos actuales de uranio están siendo cubiertos en un 60% con nueva producción y el 40% restante con fuentes secundarias⁶⁷. El reprocesamiento del combustible usado, proceso que no está totalmente extendido, representa una alternativa viable para lograr un mejor aprovechamiento del uranio disponible.

En el caso de nuestro país, es necesario también considerar en el análisis la posibilidad de explotar las reservas nacionales de uranio. De acuerdo al último reporte conjunto de la Agencia de Energía Nuclear de la OCDE y el OIEA⁶⁸, Chile cuenta con 1.930 toneladas de uranio identificadas. Estas estimaciones corresponden a exploraciones que se han hecho sólo en parte del territorio nacional, por lo que se requiere mayor actividad exploratoria para obtener estimaciones más completas.

Respecto al resto del ciclo de combustible, tanto los servicios de conversión como de enriquecimiento, así como también los de fabricación de elementos combustibles, se encuentran bien cubiertos por el mercado.

Ante el fenómeno de la reactivación de la industria nuclear, la oferta de servicios de conversión se ha empezado a expandir. En Estados Unidos el órgano regulador nuclear (NRC) renovó por diez años la licencia de la planta de conversión de uranio de Metropolis. Por su parte, en Francia AREVA anunció la construcción de una planta de conversión en el sur de ese país, que debiera entrar en operación el 2012.

En el caso del enriquecimiento del uranio (tecnología sumamente sensible desde la perspectiva de la proliferación) existe una gran diversidad de países que ofrece este servicio. Entre ellos se encuentran China, Francia, Alemania, Japón, Holanda, Pakistán, la Federación Rusa, el Reino Unido y Estados Unidos⁶⁹.

Por último, las características mismas de la generación núcleo-eléctrica hacen que el riesgo de suministro sea mínimo. En particular, la capacidad de respaldo intrínseca a la operación

64 OECD NEA-IAEA (2008).

65 OECD NEA (2009).

66 Australia, Kazajistán, Canadá, la Federación Rusa, Sudáfrica, Estados Unidos, Brasil, Níger y Namibia, entre otros.

67 Exceso de stock gubernamental y comercial, uranio de bajo enriquecimiento, re-enriquecimiento de uranio consumido y reprocesamiento de combustible gastado.

68 OECD NEA-IAEA (2008).

69 AMEC-CADE (2008).



de una central nuclear, la existencia de múltiples proveedores que funcionan con contratos a largo plazo, así como los continuos esfuerzos de la comunidad internacional para garantizar el suministro de combustible nuclear, permiten asegurar razonablemente el suministro de combustible.

En términos de respaldo, las centrales nucleares cuentan con almacenes especiales que les permiten disponer de combustible para unas cinco recargas, las cuales, dependiendo del diseño de la planta, se efectúan cada 12, 18 ó 24 meses. Esto permite asegurar cierta independencia del suministro y tener tiempo para buscar alternativas en caso de interrupción, sin necesidad de afectar la generación de electricidad.

En todo caso, los contratos de suministro de combustible de largo plazo entre los operadores y productores han demostrado funcionar adecuadamente, garantizando un suministro estable. De hecho, hasta ahora no se ha registrado ningún caso de una central que haya tenido que dejar de operar por no contar con combustible previamente comprometido⁷⁰.

En la actualidad, el OIEA está abocado a implementar un mecanismo de suministro seguro, con el objetivo no sólo de eliminar el riesgo de interrupciones del suministro que pudieran disuadir a los países de iniciar o ampliar programas de energía nuclear; sino que principalmente para desincentivar el desarrollo de nuevas capacidades nacionales de enriquecimiento y reprocesamiento.

No obstante, para disminuir dicho riesgo, los países que dependen del abastecimiento externo generalmente adoptan estrategias de redundancia (mantener almacenado stock de combustible) y diversidad (tener varios proveedores de combustible)⁷¹.

2.3.2.2.3 Impacto sobre las emisiones de GEI

Dado que la generación núcleo-eléctrica produce electricidad mediante un proceso sin combustión, prácticamente no emite GEI⁷², así como tampoco gases contaminantes con efectos a nivel local, como los óxidos de nitrógeno (NOx) y los óxidos de azufre (SOx). Por ello, el remplazo de generación a carbón y GNL por energía nuclear permitiría al país reducir significativamente las emisiones de todos estos contaminantes. En particular, en el caso de las emisiones de CO₂, con la introducción de la energía nuclear se reducirían en 5 millones de

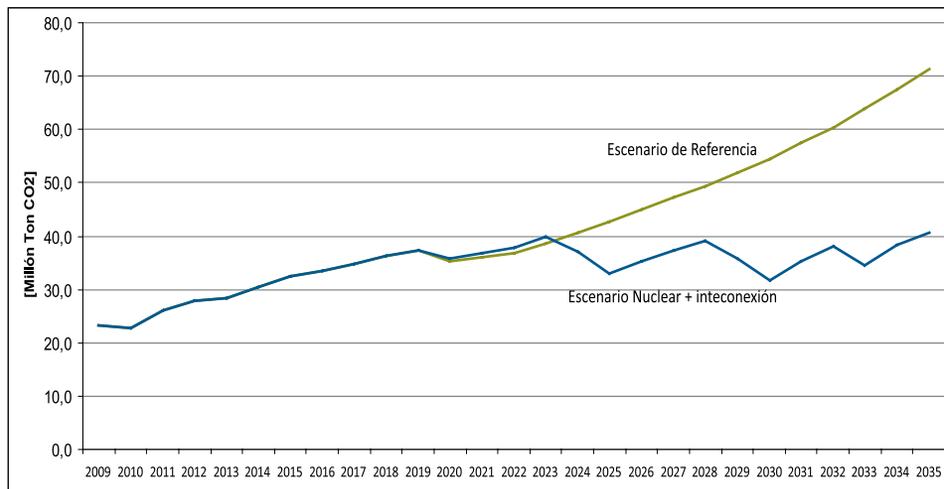
70 AMECCADE (2008).

71 AMECCADE (2008).

72 Las emisiones de CO₂ de la energía nuclear son muy bajas y están asociadas al uso de combustibles fósiles en las distintas etapas del ciclo de combustible, especialmente durante la minería y el enriquecimiento de uranio.

toneladas promedio al año, aproximadamente la mitad de las emisiones que produce el SIC o el SING actualmente (ver gráfico 16).

Gráfico 15: Comparación Efecto Emisiones de CO₂ SIC y SING con y sin opción nuclear (SIC + SING)



Fuente: Elaboración propia a partir de Informe Precio Nudo Octubre 2009 y proyecciones de modelo MESSAGE, considerando sólo la generación eléctrica y usando factores de emisión IPCC.

El ingreso de la energía nuclear no reemplaza por completo a la generación en base a carbón, por lo que incluso en este escenario, las emisiones de GEI del sector eléctrico y las totales serían considerables. Con la introducción de la energía nuclear, las emisiones per cápita del sector eléctrico al año 2030 caen en casi un 40% respecto al escenario de referencia y las de todos los sectores lo hacen en un 15%. Si bien los niveles de emisión per cápita que se alcanzan son significativamente inferiores a los proyectados por la AIE para los países OCDE en el escenario de referencia, estos superarían a los requeridos para lograr el escenario 450 ppm. En efecto, las emisiones por habitante en el escenario con energía nuclear ascenderían a 6,41 toneladas de CO₂ equivalente el 2030. Para detener el alza de las temperaturas globales en 2 grados Celsius en los países OCDE, de acuerdo a la AIE, las emisiones per cápita al 2030 deberían ser de 5,91 toneladas por habitante.

En el escenario que el país tuviese que cumplir con metas de emisiones impuestas unilateralmente por la comunidad internacional o las exportaciones nacionales tuvieran que ajustarse a ciertos estándares en términos de “huella de carbono”, el país todavía enfrentaría un problema por lo que se requerirá introducir de manera más acelerada formas limpias de generación y reducir emisiones en los otros sectores de la economía.

Por último, cabe destacar que, si bien en términos de emisión de GEI y otros contaminantes, la energía nuclear aparece como una alternativa conveniente, para el resto de los impactos ambientales -especialmente los locales- las unidades nucleares deben ser analizadas caso a caso, al igual que cualquier otra tecnología.

En síntesis, además de las ventajas económicas asociadas a los costos de la electricidad, menores y más estables, el escenario nuclear presenta claros beneficios en términos de emisiones de GEI. Ambos impactos positivos se deben a que el principal efecto de la introducción de la energía nuclear es reemplazar al carbón.

2.4 Otras Consideraciones

La conveniencia económica y la que dice relación con las emisiones de GEI por parte de la generación núcleo-eléctrica no son razones suficientes para decidir su incorporación a la matriz nacional. Existe una serie de otras consideraciones fundamentales que deben ser analizadas detalladamente antes de llegar a cualquier conclusión, entre las cuales destacan (i) la protección del medioambiente, (ii) la gestión de residuos radiactivos, y (iii) la seguridad.

2.4.1 Protección Del Medioambiente

El OIEA incluye la protección del medio ambiente local como uno de los aspectos que deben ser considerados en la evaluación integral de la opción núcleo-eléctrica.

Consecuentemente, es necesario identificar los principales impactos ambientales de la operación normal de una planta de energía nuclear y contrastarlos con los impactos ambientales de las demás fuentes de energía. En particular, interesa comparar los impactos de las distintas modalidades tradicionales de generación de electricidad de base (térmicas que usan combustibles fósiles e hidráulicas), sin perjuicio de lo cual se revisan también los impactos ambientales de formas de generación renovables no convencionales (eólica, solar y geotérmica)⁷³.

Para efectos del presente análisis se entiende por impacto ambiental la alteración significativa de la línea de base. Los impactos que se consideran son los que se asocian generalmente a cualquier proyecto eléctrico: contaminación de la atmósfera por emisión de gases y partículas,

⁷³ Una aproximación ideal para comparar impactos ambientales entre formas de generar electricidad debería considerar el ciclo completo de impactos (desde la minería de los combustibles hasta el desmantelamiento y recuperación de sitio) y preferentemente comparar unidades de generación de potencia similar. En los casos en que ha sido posible, el análisis comparativo sigue este enfoque.

alteración de ecosistemas naturales, pérdida o degradación de suelos, alteración significativa del paisaje y contaminación de ecosistemas por gestión inadecuada de residuos.

En el caso de temas específicos de la generación núcleo-eléctrica que no impactan directamente al medioambiente⁷⁴, en particular el tema de la gestión de residuos radiactivos o el eventual riesgo de que elementos radiactivos entren en contacto con el medioambiente, se tratan en detalle posteriormente en el capítulo 3.4.2.

2.4.1.1 Impactos ambientales de la generación núcleo-eléctrica

La experiencia internacional muestra que, en condiciones de operación normal, la generación de núcleo-electricidad no genera impactos ambientales severos. Se reconoce como el impacto ambiental más relevante la alteración del ecosistema acuático local debido a la toma y descarga de agua para refrigeración del reactor.

Los demás impactos al medio ambiente local asociados a la generación núcleo-eléctrica se manifiestan al interior del sitio de la planta, se originan principalmente durante la construcción de la misma, y no difieren mayormente de los que generan proyectos industriales de similar envergadura⁷⁵. El saldo ambiental de la fase de cierre de una planta nuclear en general es positivo ya que siempre se le exige el desmantelamiento de la planta y la restauración ambiental del sitio.

Los impactos principales se describen a continuación:

- **Alteración de ecosistemas naturales:** La alteración del ecosistema acuático local debido a la toma y descarga de agua necesaria para el proceso de refrigeración del reactor es el impacto ambiental más relevante de la generación núcleo-eléctrica.
 - (i) En la toma de agua se produce arrastre y captura de larvas, huevos, componentes del plancton y organismos adultos, pudiendo afectar la población y diversidad de especies en el área cercana al emplazamiento del tubo de toma de agua.
 - (ii) Durante la etapa de refrigeración del condensador, parte del calor no se aprovecha. Este calor residual, disipado en el agua de refrigeración, vuelve a los ríos, lagos o al mar, provocando un incremento de temperatura local en el cuerpo de agua receptor. Este incremento de temperatura altera el hábitat acuático, gene-

⁷⁴ En la metodología planteada por el OIEA (2007), el tema de los Residuos Radiactivos no se considera dentro de la Protección del Medio Ambiente, sino que se tratan de forma separada.

⁷⁵ Proyectos industriales que afectan superficies de alrededor de 400 hectáreas.

rando un impacto focalizado en el entorno inmediato, cuya magnitud dependerá del diferencial de temperatura, la fragilidad del ecosistema y la capacidad de dispersión del cuerpo o curso de agua receptor.

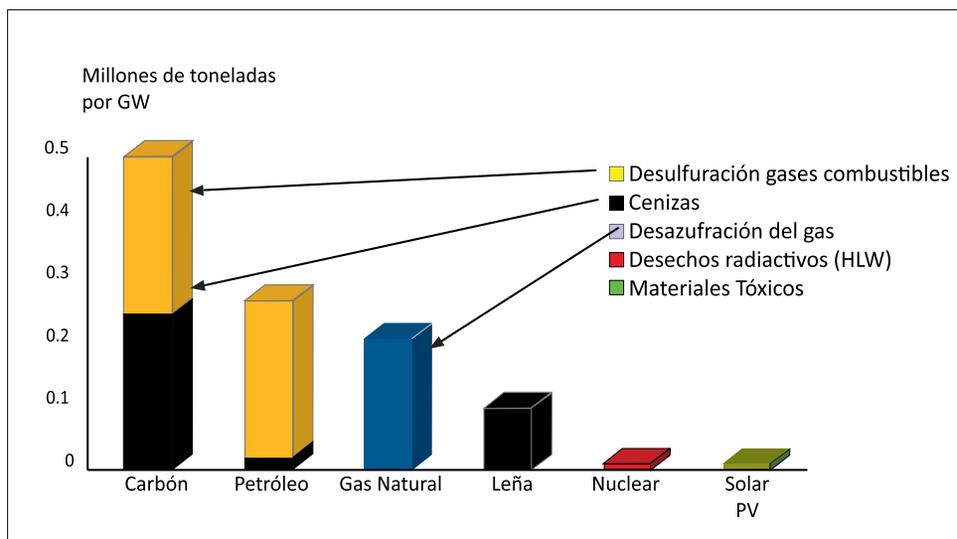
Los impactos asociados a la toma y descarga (a mayor temperatura) de agua sobre un medio acuático son, en buena medida, comunes a todas las centrales térmicas –ya sean éstas a carbón, ciclo combinado a gas o nuclear– y pueden ser mitigados. Dentro de las principales tecnologías de mitigación disponibles se encuentran tomar agua más fría a una profundidad mayor, aumentar la eficiencia térmica de la generación y recurrir al uso de torres de refrigeración. Se estima que estos impactos son reversibles de manera natural si se detienen las acciones de toma y descarga de agua para refrigeración.

- **Contaminación de la atmósfera, por emisión de gases y partículas:** Se produce sólo en la etapa de construcción y en cantidades no relevantes. No genera impactos significativos. Es una ventaja ambiental muy importante.
- **Pérdida o degradación de suelos:** La generación núcleo-eléctrica es una tecnología que utiliza una superficie similar a la que ocupan las plantas térmicas en base a combustibles fósiles y relativamente poco espacio si se la compara con las fuentes renovables. Por lo tanto, y teniendo en consideración que se trata de un espacio que puede ser recuperado una vez cerrada la planta, no se considera un impacto relevante.
- **Alteración significativa del paisaje:** Generalmente no se considera un impacto significativo, aunque puede serlo en función del valor paisajístico del sitio de emplazamiento.
- **Contaminación de ecosistemas por gestión inadecuada de residuos:** Los residuos que se generan en una central nuclear de potencia tienen la particularidad de ser radiactivos, y en consecuencia, potencialmente muy dañinos. Por este motivo, los estándares de manejo de residuos radiactivos son muy exigentes. Esta realidad de gestión adecuada, sumada al escaso volumen de residuos generado⁷⁶, permiten afirmar que la generación núcleo-eléctrica no genera impactos ambientales relevantes durante la etapa de gestión de residuos⁷⁷ (ver gráfico 17).

⁷⁶ OCDE (2007).

⁷⁷ La gestión de residuos radiactivos se trata en detalle en el capítulo 3.4.2.

Gráfico 16 : Residuos anuales producidos en la elaboración del combustible y el funcionamiento de las centrales eléctricas



Fuente: OIEA (2002).

2.4.1.2 Impactos ambientales de las demás fuentes de energía

Para efectos del análisis, es necesario establecer una visión respecto a los impactos ambientales de las demás fuentes de energía. En ese contexto, la quema de los combustibles fósiles es lo que genera mayor impacto, mientras que las fuentes renovables (hidroelectricidad y las ERNC) son consideradas de bajo impacto.

a) Combustibles Fósiles

Los impactos ambientales más significativos de los combustibles fósiles son las emisiones de gases contaminantes a nivel global y local, junto con la contaminación de ecosistemas por gestión inadecuada de residuos.

En el caso de las emisiones, las centrales térmicas de combustibles fósiles emiten cantidades importantes de CO₂, dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre gaseoso (SO₂) y una amplia gama de metales pesados, incluyendo elementos radiactivos que se encuentran contenidos en las cenizas. Si bien existen tecnologías avanzadas que permiten mitigar las emisiones

generadas por las plantas de combustibles fósiles, como las denominadas “*Clean Coal Technologies*” o mecanismos de captura y secuestro de carbono (CCS)⁷⁸, éstas aún no están comercialmente disponibles, se estiman de muy alto costo y producen residuos sólidos.

Con respecto a la contaminación por gestión inadecuada de residuos, el principal residuo generado por las centrales térmicas que operan con combustibles fósiles son las cenizas, las cuales contienen una serie de elementos tóxicos⁷⁹. Estas cenizas tienen niveles de radiación que pueden ser dañinos para las personas y para el medio ambiente. En la práctica, si bien existen formas de disposición final y uso adecuado de las cenizas (concreto, asfalto, ladrillos, estabilización de suelos, etc.)⁸⁰, la gestión de éstas a nivel mundial ha demostrado ser ambientalmente poco eficiente.

b) Hidroeléctricas

Los impactos ambientales más significativos de las centrales hidroeléctricas –en particular, de las de embalse– son la alteración de los ecosistemas naturales, la pérdida o degradación de suelo y la alteración significativa del paisaje.

Las centrales hidroeléctricas de embalse generan impactos tales como pérdida del ecosistema acuático y terrestre, desplazamiento de especies y quiebre de circuitos y corredores biológicos. En algunos casos se generan procesos de aterramiento y eutrofización⁸¹. Estos impactos pueden ser relevantes y, en algunos casos, parcialmente mitigados.

Respecto a la pérdida o degradación de suelos y la alteración significativa del paisaje, ambos impactos están muy vinculados. Las centrales hidroeléctricas de embalse requieren inundar extensas superficies, lo cual implica cambios significativos en el paisaje.

78 La tecnología CCS consiste básicamente en extraer el CO₂ mediante procesos físico-químicos y confinarlo en depósitos geológicos.

79 Arsénico, berilio, cadmio, bario, cromo, cobre, plomo, mercurio, molibdeno, níquel radio, selenio, torio, uranio, vanadio y zinc.

80 En EE.UU., 460 centrales a carbón producen anualmente 131 millones de toneladas de fly ash, de las cuales el 43% es reutilizada.

81 La eutrofización es un proceso natural en ecosistemas acuáticos (especialmente en lagos y embalses) que se caracteriza por un aumento en la concentración de nutrientes. Pasado cierto nivel, este proceso reviste características negativas ya que se produce gran cantidad de materia orgánica cuya descomposición ocasiona un descenso en los niveles de oxígeno, afectando el equilibrio biológico de la zona.

c) ERNC

Las ERNC no generan mayores impactos ambientales. Dentro de los impactos genéricos más relevantes cabe mencionar la pérdida o degradación de suelo (en especial en los casos de la energía eólica⁸² y solar) y la alteración significativa del paisaje⁸³. A nivel mundial, la alteración de ecosistemas naturales que provocan los parques eólicos⁸⁴ constituye una preocupación, así como también la gestión inadecuada de residuos en el caso de la energía solar fotovoltaica⁸⁵.

Tabla 4: Impactos Ambientales Comparados de las distintas fuentes de energía

Fuente de Energía	Emisión de CO ₂ eq (Ton/GWH)	Alteración de Ecosistemas	Superficie (Ha)	Alteración del Paisaje	Generación de Residuos
Carbón	1058	Toma y descarga de agua de refrigeración.	100 – 400	Reducido	Altos volúmenes de cenizas y escoria.
Petróleo	742	Toma y descarga de agua de refrigeración.	100 – 400	Reducido	Volumen medio de residuos tóxicos.
Gas Natural	608	Toma y descarga de agua de refrigeración.	100 – 400	Reducido	No significativo
Geotérmica	56,8	Ampliamente variable	Ampliamente variable	Reducido	No significativo
Nuclear	8,6	Toma y descarga de agua de refrigeración.	100 – 400	Reducido	Bajo volumen de residuos radiactivos.
Eólica	7,4	Alteración de los patrones de circulación atmosférica.	5.000 – 15.000	Significativo	No significativo
Hidráulica de Embalse	6,6	Pérdida del ecosistema acuático y terrestre.	10.000 – 15.000	Significativo	No significativo
Solar Fotovoltaica	5,9	No Aplica	2.000 – 5.000	Significativo	Bajo volumen de residuos tóxicos ¹ .
Solar Térmica	3,6	No Aplica	2.000 – 5.000	Significativo	No significativo

Nota 1: Todos los impactos están estimados considerando generación de 1.000 MW (1 GW).

Nota 2: Los niveles de emisión de CO₂ consideran el ciclo completo de la energía.

Fuentes: AIE, DOE, Council for Renewables Energy Education y Worldwatch Institute, CRIEPI

82 En Chile el parque eólico Talinay de 500 MW cerca de la ciudad de Ovalle, contempla la instalación de 243 aerogeneradores de entre 2 y 3 MW cada uno y ocupará alrededor de 6 mil hectáreas.

83 En el caso de las granjas off-shore, este impacto es menor.

84 Las granjas eólicas generan ruido, alteran los patrones de circulación atmosférica, impactan negativamente la población de aves locales (que mueren al chocar contra las aspas de los molinos), y generan campos electromagnéticos que pueden alterar la conducta de las aves locales (Fuente: SEO (2008)).

85 La energía solar fotovoltaica requiere de baterías de respaldo, las que constituyen importantes fuentes de contaminación de metales pesados y sustancias tóxicas al final de su vida útil.



Como se desprende del análisis y se resume en la tabla 4, no hay fuentes de energía completamente libres de impactos ambientales. Si bien una comparación rigurosa requiere la evaluación de los proyectos específicos tomando en consideración las particularidades locales, en términos generales se puede señalar que la energía nuclear destaca por combinar las ventajas de las energías renovables –en cuanto a emisiones– con las ventajas de las centrales térmicas –en cuanto a lo reducido de la superficie que ocupan.

No obstante, al igual que cualquier proyecto energético, una central nuclear requiere de un análisis de impacto ambiental específico sometiéndose al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA)⁸⁶. Hasta la fecha, ningún proyecto de generación núcleo-eléctrica ha sido presentado al SEIA. En todo caso, si el país avanza en el desarrollo de un PNP, será necesario realizar ajustes, establecer normas y crear competencias especializadas para permitir una evaluación rigurosa de un proyecto basado en esta tecnología.

2.4.2 Gestión de Residuos Radiactivos

Uno de los aspectos más sensibles relacionados con la generación núcleo-eléctrica es la gestión de residuos radiactivos. La experiencia internacional muestra que esta es una actividad segura, de carácter cotidiano y que se encuentra en constante perfeccionamiento. Por lo tanto, se estima que no representa un riesgo mayor para el medioambiente ni para la salud de la población.

Desde los inicios del desarrollo de la energía nuclear en la década de los 50', los países que cuentan con centrales nucleares de potencia o con aplicaciones nucleares medicinales e industriales han tenido que hacerse cargo del tema del manejo de los residuos. Nuestro país cuenta con más de 30 años de experiencia en el manejo de combustible usado y residuos generados por el funcionamiento del reactor de investigación de La Reina.

En términos de procedimiento, una vez usado, el combustible nuclear se almacena temporalmente hasta su disposición final. El almacenamiento temporal puede ser húmedo o en seco. En ambos casos es necesario que, una vez retirado del núcleo del reactor, el combustible sea depositado en piscinas de refrigeración –ubicadas dentro del edificio de contención del reactor– por un período de entre 5 y 10 años. Transcurrido dicho período, éste puede permanecer en piscinas dentro o fuera del reactor (almacenamiento temporal húmedo) o bien, una vez que se ha producido una disminución suficiente del calor y la radiactividad del combustible, puede ser cargado en contenedores (almacenamiento temporal en seco) o encapsulado para su disposición final⁸⁷.

⁸⁶ Ley 19.300 de Bases del Medio Ambiente.

⁸⁷ En cuanto a volumen y cantidades de residuos, un reactor de 1.000 MW genera anualmente alrededor de 20 m³

El almacenamiento temporal –ya sea húmedo o en seco– considera toda la vida útil de la central y se estima una solución segura por un período de hasta cien años⁸⁸. En el caso del almacenamiento temporal en seco, el combustible gastado es confinado en contenedores de acero o concreto y almacenado en el mismo sitio de la planta o trasladado hacia un centro de acopio.

En la actualidad, la solución más comúnmente aceptada para la disposición final de residuos –que garantice que éstos se mantengan aislados del medioambiente– es el almacenamiento en repositorios geológicos profundos⁸⁹. Con respecto a estos repositorios, hay un amplio consenso entre las organizaciones científicas mundiales acerca de que éstos representan un método aceptable y seguro⁹⁰.

No obstante lo anterior, en la actualidad aún no hay ningún repositorio en operación⁹¹. Esto significa que la mayoría de los países ha adoptado una estrategia de almacenamiento temporal a la espera de la evolución de las tecnologías de reprocesamiento y de gestión final de residuos (dentro de las que se encuentra la quema de combustible⁹²).

2.4.3 Seguridad de la Generación Nucleo-Eléctrica

La experiencia internacional ha demostrado que, en condiciones de operación normal, la generación nucleo-eléctrica es una tecnología segura que no presenta riesgos a la salud de la población.

El principal riesgo asociado a la generación nucleo-eléctrica es la eventualidad que ocurra un accidente severo que pudiera provocar emisión de radiación al medioambiente. Un accidente de este tipo puede tener causas naturales (sismos, tsunamis, remociones en masa, erupción de un volcán, inundaciones, etc.) o causas antrópicas (error en las etapas de diseño o construcción, descuido humano en la etapa de operación o ataques terroristas).

(27-30 toneladas) de combustible gastado, que corresponden a un volumen de disposición final de 75m³ al ser encapsulado.

88 OIEA (2003).

89 En la actualidad no existen en el mundo repositorios geológicos en operación; sin embargo, hay repositorios en construcción en Francia, Finlandia y Suecia.

90 Corporación Nuclear Eléctrica (2009).

91 En la actualidad hay repositorios en construcción en Francia, Finlandia y Suecia.

92 Esta es una de las alternativas que está analizando Estados Unidos. Steven Chu, el actual secretario de energía norteamericano y premio Nobel de Física, ha señalado que el reservorio geológico de Yucca Mountain ya no se considera una opción ya que existen otras alternativas más eficientes. De acuerdo al secretario de estado, las soluciones temporales son suficientemente seguras como para permitir que la investigación y desarrollo que se está realizando resulte en una solución definitiva. Entre las alternativas que están investigando están los reactores de neutrones rápidos que permiten quemar los residuos de larga vida (Fuente: MIT (2009)).

2.4.3.1 Seguridad ante peligros naturales

durante la historia de la industria núcleo-eléctrica no existe registro de eventos naturales que hayan causado accidentes en plantas nucleares con consecuencia de emisión de radiación al ambiente en niveles peligrosos para la salud humana⁹³.

En el caso específico de los terremotos –tema particularmente relevante para nuestro país– hasta el momento no han ocasionado ningún accidente grave en una planta nuclear (i.e. que haya significado emisiones de radiación a la atmósfera o provocado muertes), por lo cual no se estima que signifiquen un impedimento para el desarrollo de un PNP⁹⁴.

La experiencia a nivel mundial ha demostrado que, sin importar su diseño de origen, los reactores han soportado actividad sísmica considerable sin sufrir daños y sin liberar radiación al ambiente. Existen numerosos ejemplos de plantas que han soportado adecuadamente sismos importantes, especialmente en la zona de California, Japón y el sudeste asiático⁹⁵.

Por lo tanto, es posible que países sísmicos generen núcleo-electricidad de manera segura. El único requisito es una correcta selección del sitio y que la construcción de la central cumpla con las normas antisísmicas adecuadas. Si bien este es un problema técnico, puede tener implicancias económicas, elevando el costo de construcción de la planta.

En el caso particular de Chile, un estudio encargado al Departamento de Geología de la Universidad de Chile⁹⁶ concluye que la alta probabilidad de ocurrencia de eventos naturales catastróficos no es un impedimento para la instalación de una planta nuclear de potencia⁹⁷. Si bien la naturaleza y magnitud de los riesgos naturales ocurridos en nuestro país presentan un desafío en términos de ingeniería, hay soluciones tecnológicas conocidas y disponibles que no elevarían de sobremanera los costos de construcción de una central.

⁹³De todos los terremotos ocurridos, el del 2007 en Japón que afectó a la planta Kashiwazaki-Kariwa es el que ha concitado mayor atención a nivel mundial. Si bien ningún sistema de seguridad fue afectado y no se detectaron fallas estructurales en el reactor ni en las turbinas, hubo varios incidentes en el sitio, incluyendo fuga de agua radiactiva al mar. Esta fuga se produjo por el rebalse de una de las piscinas donde se guardaba combustible gastado. No obstante, tanto el volumen de agua descargada como su actividad radiactiva fueron estimadas extremadamente bajas. En particular, la estimación de la actividad liberada al exterior resultó en una dosis muy inferior a los límites permitidos durante la operación normal de la planta. Ver OIEA (2009a).

⁹⁴En la actualidad, alrededor de un 20% de los reactores nucleares en operación en el mundo se encuentran en áreas con actividad sísmica significativa. La mayor parte de ellos se encuentran en Japón, país que cuenta con 55 plantas y que se encuentra construyendo dos más.

⁹⁵En el caso de los terremotos de California (1994, Richter: 6,6) y Armenia (1988, Richter: 6,9) los reactores continuaron operando normalmente, mientras que en los casos de los terremotos de Taiwán (1999, Richter: 7,6), Indonesia (2004, Richter: 9,3) y Japón (2007, Richter: 6,8) se activaron los sistemas de seguridad y los reactores se apagaron automáticamente.

⁹⁶Departamento de Geología de la Universidad de Chile (2009).

⁹⁷Lo ocurrido en los reactores de La Reina y Lo Aguirre en el terremoto del pasado 27 de Febrero del presente año es un ejemplo claro de la seguridad de este tipo de instalaciones. En efecto, frente a un sismo que alcanzó una intensidad de 8,8 grados en la escala de Richter, en ninguna de estas instalaciones se registraron daños en la infraestructura o fallas operacionales.

2.4.3.2 Seguridad frente a peligros antrópicos

Desde 1945 a la fecha se han producido sólo dos accidentes en centrales nucleares: Three Mile Island (Estados Unidos, 1979) y Chernobyl (Ucrania, 1986), de los cuales sólo Chernobyl provocó emisión significativa de sustancias radiactivas al medioambiente. Ambos accidentes se produjeron por errores humanos, relacionados con una operación negligente, más que por deficiencias de la tecnología misma, y sólo Chernobyl causó muertes directas⁹⁸.

El caso de Chernobyl presenta una serie de anomalías particulares que ayudan a entender las causas del accidente y concluir que es altamente improbable que pueda volver a repetirse un incidente de esta naturaleza. La razón principal del accidente fue la extraordinaria irresponsabilidad del personal a cargo, quienes desconectaron el sistema de regulación de potencia, el sistema refrigerante de emergencia y otros sistemas de seguridad, con el objetivo de testear la respuesta del reactor. Estas acciones, sumadas a una serie de deficiencias en el diseño del reactor⁹⁹ y de errores en el proceso de toma de decisiones, llevaron a un violento aumento de potencia dentro del reactor que culminó con la explosión del mismo. Por último, las medidas que se tomaron para hacer frente a la explosión y minimizar las consecuencias de la radiación fueron inadecuadas, aumentando las fatalidades más allá de lo necesario¹⁰⁰. El accidente de Chernobyl ha sido el más estudiado en la historia y existen una serie de documentos que registran detalladamente tanto sus causas como sus consecuencias¹⁰¹. Las medidas de seguridad vigentes –que incorporan no sólo las lecciones de Chernobyl y Three Mile Island, sino que la experiencia acumulada por más de cuarenta años de operación de reactores– garantizan que no pueda volver a repetirse un accidente como el ocurrido en Chernobyl.

Más allá del impacto en la opinión pública que causó el accidente en Chernobyl, si uno analiza los registros históricos para las distintas fuentes de generación se obtiene que la generación núcleo-eléctrica es una de las fuentes de electricidad más segura en términos de la probabilidad de ocurrencia de accidentes severos¹⁰². De hecho, si se considera sólo el historial de

98 Como consecuencia del accidente se produjeron 31 muertes directas y aproximadamente 4.000 indirectas. Esta última cifra representa una estimación que considera la mayor incidencia de cáncer entre las 600.000 personas más expuestas a la radiación (Fuente: The Chernobyl Forum (2005)).

99 El diseño de los reactores tipo RBMK usados en Chernobyl presentaban una serie de características que impactaban negativamente la seguridad de operación. Entre estas destacan los moderadores de grafito utilizados y el hecho que, a diferencia de las plantas que operaban en occidente, el reactor no contaba con un edificio de contención.

100 Entre aquellas medidas que no se adoptaron y que podrían haber reducido significativamente el número de fatalidades destacan la inadecuada protección del personal de emergencia que participó en apagar el incendio post explosión y el hecho que no se prohibió la ingesta de leche en algunas de las zonas más afectadas por la radiación durante un periodo que habría evitado que los niños consumieran leche con altas dosis de yodo (UNSCEAR (2000)).

101 UNSCEAR (2000), OIEA (2006), OMS (2006), The Chernobyl Forum (2006).

102 El Instituto Paul Scherrer establece como “accidente severo” todo aquel en el que ocurren al menos cinco fatalidades.

funcionamiento de las centrales convencionales de generación, la generación núcleo-eléctrica es la menos riesgosa y de menor impacto¹⁰³ como se ve en la Tabla 5.

Tabla 5: Registro histórico de accidentes severos por fuente de generación

Fuente de Energía	Número de accidentes severos	Número de fatalidades directas por GW año		
		Mundo	OCDE	No OCDE
Carbón	1.221	0,876	0,185	1,576
Carbón (sin China)	177	0,69		0,589
Petróleo	397	0,436	0,392	0,502
Gas Natural	125	0,093	0,091	0,096
Hidro	11	4,265	0,003	10,285
Hidro (sin Banquiao/Shimantan)	10	0,561		1,349
Nuclear	1	0,006	0	0,048

Nota: El accidente de Banquiao/Shimantan (China, 1975) es el más severo registrado en instalaciones energéticas. Este accidente, en el cual colapsó una represa, significó la muerte directa de 26.000 personas e indirecta de alrededor de 145.000 (debido a hambruna y epidemias causadas por la contaminación de las aguas).

Fuente: Burgherr et al. (2004).

En la actualidad, la industria nuclear opera con un concepto de “defensa en profundidad” y ha desarrollado las tecnologías necesarias para garantizar la protección radiológica de la población ante el riesgo de eventuales fallas de la central, así como sistemas de protección física para evitar posibles sabotajes o ataques terroristas. Además, es la única tecnología para la cual hay todo un sistema de estándares y supervisión internacional, lo que evidentemente ha contribuido a los positivos resultados históricos exhibidos por la energía nuclear en el mundo.

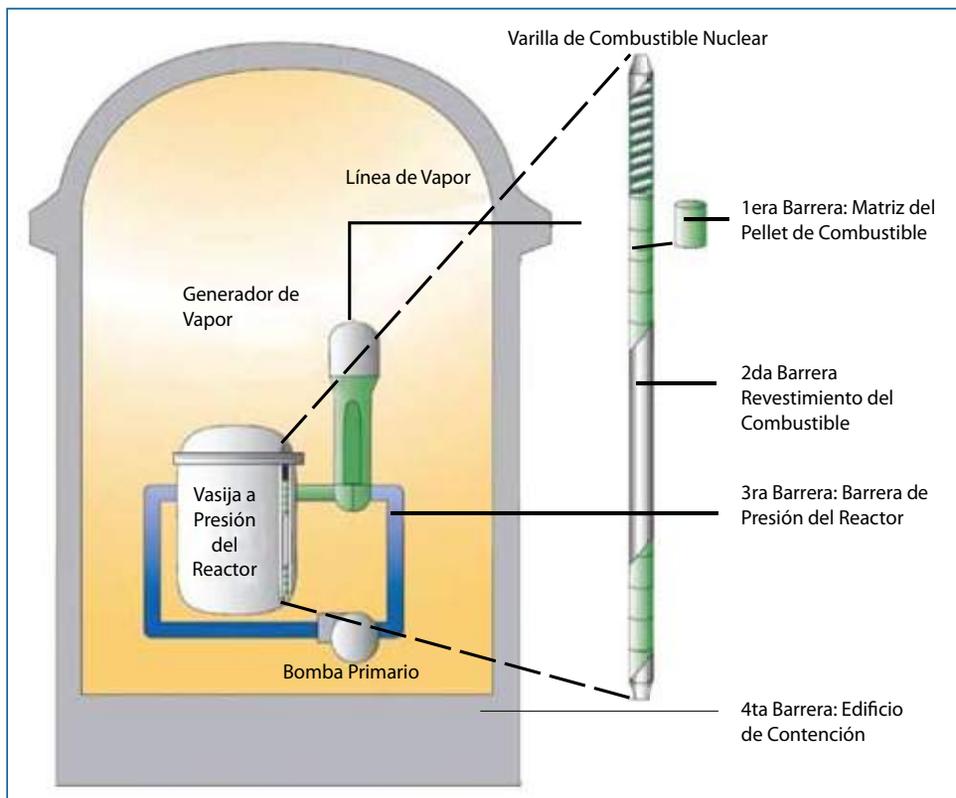
¹⁰³ El mayor riesgo de este tipo de generación está asociado a las explosiones que se producen durante las etapas de extracción, refinación y transporte (Ver Corporación Nuclear Eléctrica, 2009).

2.4.3.2.1 Protección radiológica

en las centrales nucleares todos los sistemas responden a la filosofía de la “defensa en profundidad”, lo cual se traduce en un sistema de seguridad integral que contempla el establecimiento de distintas barreras de protección para evitar que los productos radiactivos que se encuentran dentro del reactor lleguen al medioambiente.

Existen cuatro barreras de contención: la pastilla de combustible, las barras dentro de las que se encuentran las pastillas de combustible, la vasija del reactor en la que se aloja el núcleo, y el edificio de contención¹⁰⁴.

Figura 3: Barreras de contención para el confinamiento de los materiales radiactivos



Fuente: Corporación Nuclear Eléctrica (2009).

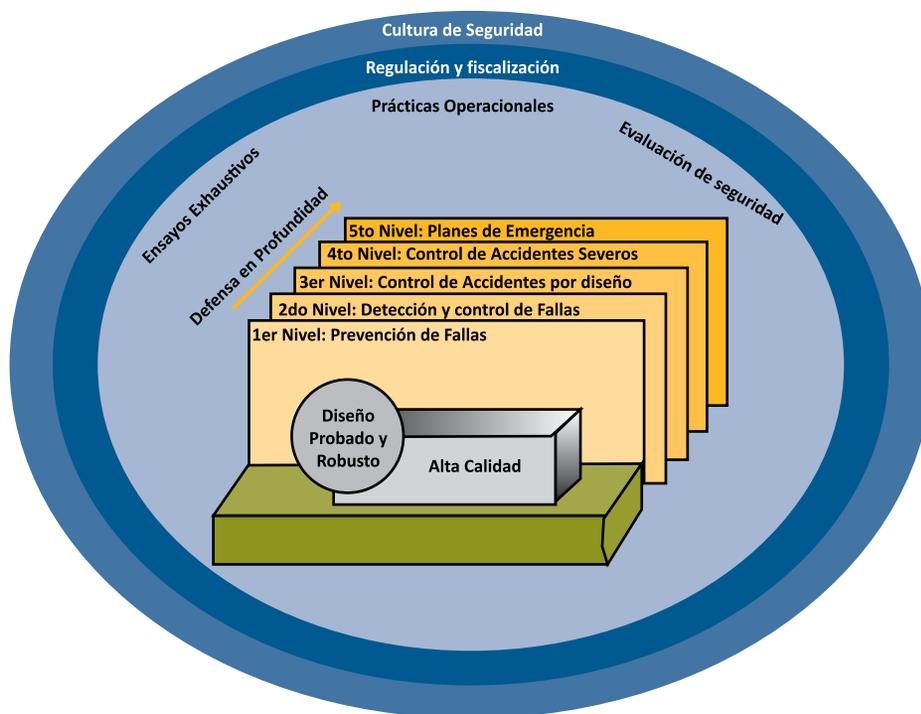
¹⁰⁴ Conformado por muros de hormigón forrados internamente con una capa de acero. Estos muros (cuya función es evitar que se emita radiación al exterior en caso de accidente) se construyen de acuerdo a rigurosas especificaciones técnicas de manera de ser resistentes a terremotos, choques de avión o atentados terroristas.



En particular, estas barreras de seguridad buscan garantizar que el material radiactivo permanezca confinado, que el proceso de fisión pueda ser detenido instantáneamente en todo momento y que el calor residual sea extraído después de apagado el reactor, de manera de proteger las barreras de integridad contra las fugas de material radiactivo.

Por otra parte, el sistema de seguridad integral considera cinco niveles y cubre las etapas de construcción de la central, su operación y planes de contingencia para hacer frente a eventuales emergencias.

Figura 4: Elementos considerados en la seguridad de una central nuclear



Fuente: Corporación Nuclear Eléctrica (2009).

En primer lugar, está el criterio con que se elige el sitio donde se va a construir una central nuclear. Para garantizar la seguridad del sitio, el proceso de selección debe considerar sus características sísmicas, demográficas, climáticas, entre otras.

En segundo lugar, con el objetivo de asegurar condiciones normales de operación y minimizar la probabilidad de accidentes por causa de error humano, el personal a cargo está especialmente capacitado en el manejo y control total de los sistemas operacionales del reactor.

En tercer lugar, por diseño, las centrales incorporan sistemas de seguridad capaces de enfrentar eventuales fallas técnicas. Estos sistemas de seguridad se caracterizan por contemplar todos los riesgos previsible y por ser redundantes (es decir, por contar con varios equipos capaces de realizar una determinada tarea). Por lo tanto, en caso que alguno de ellos falle, existe un respaldo que le permite al reactor seguir funcionando normalmente¹⁰⁵. Por otra parte, los últimos diseños de reactores actualmente en construcción incorporan mayores niveles de seguridad “pasiva”, los cuales operan sin necesidad de ser activados directamente por los operadores¹⁰⁶.

Asimismo, el desarrollo tecnológico actual permite minimizar al máximo la posibilidad de accidentes severos. Esta “seguridad intrínseca” se ha alcanzado principalmente mediante el uso de materiales especiales durante la construcción de los reactores y a través de los sistemas de seguridad incorporados.

Por último, en el caso hipotético de un eventual accidente, existen planes de emergencia especiales que establecen y coordinan los procedimientos correspondientes¹⁰⁷. Estos planes de emergencia son preparados por el explotador de la central, requieren de la aprobación del órgano regulador, contemplan todos los niveles de seguridad y establecen distintas respuestas frente a diversos eventos.

2.4.3.2.2 Protección física

En relación a la protección física hay dos aspectos a considerar: (i) la protección de las instalaciones nucleares, y (ii) la protección de los materiales nucleares para evitar que sean sustraídos por agentes terroristas¹⁰⁸.

Respecto a la protección física de las instalaciones nucleares, el diseño de las plantas de potencia establece perímetros de acceso controlado para evitar el posible ingreso de personas no autorizadas. Para responder a dicho objetivo, las plantas cuentan con personal especialmente entrenado en funciones de seguridad que se encargan de resguardar el perímetro y controlar el acceso a las instalaciones.

¹⁰⁵ Por ejemplo, si falla el circuito primario de refrigeración, existe un sistema de refrigeración de emergencia que evita que se funda el núcleo (Ver Corporación Nuclear Eléctrica (2009)).

¹⁰⁶ OECD-NEA (2009).

¹⁰⁷ Los procedimientos involucran la participación y coordinación tanto de organizaciones civiles como militares.

¹⁰⁸ UAI-Senes (2008).

Con respecto a los materiales nucleares, lo fundamental es la protección del uranio enriquecido y de los residuos de alta actividad. En el caso del uranio enriquecido, se estima que debido a su tamaño y peso, la protección física de los elementos combustibles es relativamente sencilla, requiriéndose sólo de escolta policial para su transporte y centros de acopio seguros dentro de las instalaciones dispuestas para su almacenamiento. En el caso de los residuos radiactivos, para evitar que se sustraiga material de alta actividad, en todas las instalaciones nucleares se emplean estrictos procedimientos de contabilidad de material nuclear, con objeto de evitar que cantidades pequeñas de éstos puedan ser sustraídas inadvertidamente¹⁰⁹.

Conclusiones

De acuerdo con las proyecciones que consideran distintos escenarios probables, la energía nuclear sería conveniente económicamente para el país a partir de mediados de la década del 2020. Además de permitir acceder a un menor precio de la energía, su ingreso tendría claros beneficios en términos de emisiones de GEI y de seguridad de suministro.

Por otra parte, los impactos ambientales locales de una central nuclear son comparativamente bajos y similares a los de proyectos térmicos de similar envergadura. Además, tanto la experiencia internacional en la operación de centrales y la gestión de residuos, como el estado actual de la tecnología, permiten afirmar que es posible desarrollar de manera segura un PNP, haciéndose cargo responsablemente de los riesgos. Ello, evidentemente, requiere que la implementación del PNP se efectúe cumpliendo con los más altos estándares de seguridad.

Hasta el momento, se ha mostrado no solo la conveniencia y necesidad de incorporar la energía nuclear como parte de la matriz energética mundial, sino que además se ha mostrado que sería también conveniente para nuestro país hacerlo siguiendo los más altos estándares. En la próxima sección responderemos la siguiente pregunta: ¿estamos en condiciones de implementar un PNP de manera segura?

¹⁰⁹ UALSENES (2008).

3. INFRAESTRUCTURA NECESARIA PARA EL DESARROLLO DE UN PNP

En las secciones anteriores se ha mostrado que a nivel mundial se ha producido un renacimiento de la energía nuclear –el cual se está traduciendo en una renovación y expansión de la capacidad instalada de generación núcleo-eléctrica– con el objetivo de hacer frente a los desafíos energéticos y ambientales; y que las proyecciones, utilizando los supuestos más probables, indican que la generación núcleo-eléctrica sería una alternativa conveniente para nuestro país a partir de la próxima década.

Asimismo, la experiencia internacional indica que si se respetan los estándares internacionales, ésta es una tecnología segura con un impacto mínimo en el medioambiente. En efecto, del análisis efectuado se deriva que para implementar un PNP de manera segura, es necesario contar con una infraestructura¹¹⁰ adecuada. Esto implica que se requiere, entre otros aspectos, un marco legal, institucionalidad regulatoria, recursos humanos e instalaciones físicas acordes al desafío.

De igual forma, la experiencia internacional también indica que otro requisito fundamental para garantizar el éxito de un PNP es contar con un amplio acuerdo nacional con respecto a la introducción de la energía nuclear en la matriz energética. Habiendo concluido que la energía nuclear sería conveniente para el país, es necesario determinar en qué condición se encuentra el país respecto a estos dos requisitos, infraestructura y opinión pública.

En el caso de la infraestructura, como el país opera reactores de investigación desde hace más de 30 años, ya cuenta con un marco legal, una entidad regulatoria, recursos humanos capacitados e instalaciones físicas diseñadas para realizar actividades asociadas a la operación de reactores de este tipo¹¹¹.

En esta sección se revisa el estado de esta infraestructura nacional para determinar si es la requerida para implementar un PNP. Para ello se presentan los resultados de un ejercicio de autoevaluación de las capacidades nacionales, el que siguió la metodología establecida por el OIEA. Luego, en la sección se realiza un diagnóstico del nivel de apoyo ciudadano que hay actualmente respecto a la posibilidad de incorporar la generación núcleo-eléctrica a la matriz energética del país.

110 Para el caso de la generación núcleo-eléctrica por infraestructura se entiende todos los aspectos asociados, incluyendo la infraestructura física, los recursos humanos, la infraestructura legal y regulatoria, etc.

111 El reactor de investigación de La Reina tiene una potencia de 5 MW y produce radioisótopos para ser utilizados con fines medicinales, así como en actividades industriales, mineras y agrícolas.

3.1 Evaluación de las Capacidades Nacionales

De acuerdo a la experiencia internacional, resulta indispensable contar con una infraestructura adecuada para implementar un PNP de manera exitosa y segura. Esta infraestructura incluye diversos aspectos, entre los que destacan contar con una legislación nuclear, establecer un órgano regulador nuclear, disponer de sitios adecuados para la construcción de una planta, contar con un sistema eléctrico capaz de incorporar una unidad nuclear, construir instalaciones para el almacenamiento de residuos, tener previstos sistemas de protección radiológica y física para todas las instalaciones nucleares y, especialmente, contar con los conocimientos y recursos humanos necesarios para llevar adelante todas las actividades relacionadas con el desarrollo de un PNP.

Está claro que sin una infraestructura que cubra satisfactoriamente cada uno de los aspectos anteriores, no es posible implementar un PNP. Por ejemplo, una legislación nuclear comprensiva que considere todos los aspectos asociados a la generación núcleo-eléctrica y que cumpla con todos los requisitos exigidos por los tratados y convenciones internacionales, es fundamental como marco estructural para las actividades nucleares. Asimismo, contar con un órgano regulador con claras atribuciones y que sea efectivamente independiente también es clave para dar transparencia y hacer predecible el proceso. En el caso de potenciales sitios, no se puede avanzar en el desarrollo de un PNP sin disponer de sitios que cumplan con los requisitos adecuados en términos de características geológicas y sísmicas, acceso a agua suficiente, acceso a la red eléctrica, etc. Por último, no es posible realizar ninguna de estas actividades sin los recursos humanos adecuados. Por lo tanto, resulta primordial contar a nivel nacional con el conocimiento y la experticia requeridos en todas las áreas para poder garantizar el éxito y seguridad del proceso.

Disponer de una infraestructura adecuada es importante tanto desde el punto de vista de la opinión pública como desde la perspectiva de los potenciales inversionistas. En el caso de la opinión pública, le da seguridad de que el proceso se va a llevar a cabo siguiendo los más altos estándares de seguridad. Mientras que a los inversionistas les entrega un marco claro, estable y predecible que los incentiva a participar en un proceso serio.

Por todo lo anterior, como parte fundamental de la estrategia diseñada para el proceso de estudio de la opción de generación núcleo-eléctrica, durante el año 2009 el país decidió revisar el estado de su infraestructura y de sus capacidades para desarrollar un PNP de manera segura. Para ello se realizó un ejercicio de autoevaluación de las capacidades nacionales, el cual fue llevado a cabo siguiendo el modelo que sugiere el OIEA (2008a). Dicho modelo –cuyo objetivo es entregar un acercamiento integral a la evaluación del progreso en el desarrollo de infraestructura para energía nuclear– establece diecinueve aspectos clave que deben ser

considerados en cada una de las tres fases sucesivas que se han establecido en la evaluación e implantación de un PNP.

Tabla 6: Aspectos de Infraestructura e Hitos

Aspectos	Hito 1	Hito 2	Hito 3
Posición Nacional			
Seguridad Nuclear			
Administración			
Financiamiento			
Marco Legislativo			
Salvaguardias			
Marco Regulatorio			
Protección Radiológica			
Red Eléctrica			
Recursos Humanos			
Involucramiento de Grupos de Interés			
Emplazamiento			
Protección Medioambiental			
Planificación de Emergencia			
Protección Física			
Ciclo de Combustible Nuclear			
Residuos Radiactivos			
Involucramiento de la Industria			
Adquisiciones			

Fuente: OIEA (2007).

En el caso de Chile, para la fase 1 se evaluaron dieciocho de estos aspectos¹¹² y se le pidió al OIEA una misión que revisara el avance del proceso para poder entregar un registro del estado de las capacidades nacionales al próximo gobierno. Estas misiones forman parte del modelo del OIEA; en particular, se realizan misiones INIR¹¹³ al final de cada fase, las que tienen por objetivo evaluar los resultados del ejercicio de autoevaluación de cada país.

Finalmente, y como parte del modelo general del OIEA para apoyar a los países en la evaluación de sus capacidades para avanzar en un PNP, se participó desde fines de 2008 en una serie de Talleres de Trabajo focalizados en ámbitos específicos del proceso.

112 Se consideró irrelevante en esta fase evaluar el aspecto relativo a la preparación del proceso de licitación para la construcción de una central.

113 Integrated Nuclear Infrastructure Review.

3.1.1 Metodología del Proceso de Autoevaluación

El OIEA (2007) identifica tres fases distintas en la introducción de un PNP y determina las actividades que deberían realizarse en cada una de ellas a lo largo de un plazo estimado de 15 años promedio. La fase 1 incluye los trabajos preparatorios necesarios para tomar una decisión informada sobre un eventual PNP. La fase 2 incluye el desarrollo de los aspectos de infraestructura que deberían estar listos para que el país pueda convocar a una licitación exitosa de una primera planta. Por último, la fase 3 abarca todas las actividades previas a la operación de una planta, incluyendo la construcción de la planta y la aprobación de la licencia de operación.

Con el fin de garantizar el funcionamiento seguro, responsable y pacífico de la energía nuclear, para cada fase se identifican diecinueve aspectos de infraestructura que deben ser abordados por un país que esté considerando la introducción de la energía nuclear como parte de su estrategia energética nacional.

Al final de la fase 1 el país debe demostrar que ha entendido cabalmente los requisitos y obligaciones asociadas a la aplicación de un PNP seguro. Asimismo, se espera que el país demuestre que ha previsto adecuadamente las actividades de la fase 2 y estimado los recursos para desarrollarlas.

3.1.1.1 Etapas de evaluación

Una evaluación íntegra comprende cuatro etapas importantes: (i) identificación de los términos de referencia para la evaluación, las organizaciones participantes y el personal que llevará a cabo la evaluación; (ii) evaluación del estado de desarrollo de la infraestructura comparándolas con las bases mencionadas en OIEA (2008); (iii) identificación de los aspectos que necesitan mayor atención, y (iv) preparación de un plan de acción para abordar estos aspectos y cerrar las brechas.

En la primera etapa el país debe determinar el alcance de la evaluación. En general, se recomienda que se abarquen los diecinueve aspectos de infraestructura con el fin de obtener un panorama completo del progreso. Posteriormente, a fin de establecer estados de avance y de asignar las prioridades, a cada uno de los aspectos y a sus condiciones se les otorga un “estado”, para lo cual se utilizan tres calificaciones: se requieren acciones significativas, se requieren acciones menores o no se requieren acciones.

Estos resultados se registran en un formulario resumen establecido por el OIEA. El siguiente capítulo proporciona un ejemplo de los formularios utilizados, los cuales incorporan resultados reales de la evaluación para el caso de Chile.

3.1.1.2 Ejemplo

A continuación presentamos un ejemplo real de la aplicación de esta metodología al aspecto N° 5 “Marco Legal”.

Tabla 7: Formulario de Autoevaluación del aspecto Marco Legal

5.1 Plan de adhesión a todos los instrumentos legales internacionales.	Fase 1	
Bases para la Evaluación	Evidencia	Observaciones
<p>1. Un plan aprobado por el gobierno identificando los instrumentos legales internacionales que el Estado debe ser parte. El plan debe incluir: la escala de tiempo para la adhesión, tiempo y recursos requeridos para implementar los instrumentos. Como mínimo debe considerarse los siguientes instrumentos:</p> <p>(a) Convención sobre Pronta Notificación de un Accidente Nuclear.</p> <p>(b) Convención sobre Asistencia en Caso de Accidente Nuclear o Emergencia Radiológica.</p> <p>c) Convención sobre Seguridad Nuclear.</p> <p>d) Convención Conjunta sobre la Seguridad en la Gestión del Combustible Gastado y sobre la Seguridad en la Gestión de los Desechos Radiactivos.</p> <p>(e) Convención sobre la Protección Física de los Materiales Nucleares y sus enmiendas.</p> <p>(f) Convención de Viena sobre Responsabilidad Civil por Daño Nuclear, el Protocolo de Enmienda de la Convención de Viena sobre Responsabilidad Civil por Daño Nuclear y la Convención sobre Compensación Suplementaria por Daño Nuclear.</p> <p>(g) Acuerdo Total sobre Salvaguardias entre Chile y OIEA.</p> <p>(h) Acuerdo Complementario Revisado concerniente con la provisión de asistencia técnica por parte de la OIEA.</p>	<p>Todos los documentos firmados por el país y ratificados por el parlamento.</p> <p>La página del OIEA contiene los instrumentos firmados por Chile.</p>	<p>Falta firma de punto d).</p> <p>CCHEN ha sido requerida por la Cancillería para emitir una opinión técnica sobre punto d). CCHEN ha elaborado y entregado un documento para revisión.</p> <p>Se necesita ser parte del Protocolo de Enmienda y de la Convención sobre Compensación Suplementaria por Daño Nuclear.</p>
<p>EVALUACIÓN: <i>Acciones significantes necesarias:</i> ▲ <i>Acciones menores necesarias:</i> ▲ <i>No acciones necesarias:</i> ▲</p>		

5.2 Planes para promulgar la legislación nuclear nacional	Fase 1	
Bases para la Evaluación	Evidencia	Observaciones
<p>1. Un plan aprobado por el gobierno para completar la legislación nuclear nacional. El plan debe incluir la escala de tiempo para la aprobación y las acciones, escala de tiempo y recursos requeridos para promulgar la legislación planificada. El plan debe cubrir:</p> <p>(a) Establecer un órgano regulador efectivamente independiente.</p> <p>(b) Establecer un sistema de autorización, responsabilidades del operador, inspección y sanción.</p> <p>(c) Formular principios y requerimientos para cada área de trabajo (protección radiológica, fuentes de radiación, instalaciones nucleares, gestión de residuos radiactivos y de combustible gastado, decomiso, minería y molienda, preparación de emergencias, transporte de material radiactivo).</p> <p>(d) Establecer mecanismos de compensación por daño nuclear.</p> <p>(e) Implementar las Salvaguardias del OIEA.</p> <p>(f) Implementar los controles de importación y exportación de material nuclear e ítems.</p> <p>(g) Formular principios de Seguridad Física, incluido protección física de los materiales e instalaciones nucleares.</p>	<p>La ley N° 16.319 de 1965, que crea la CCHEN.</p> <p>Decreto Supremo No. 1.304 de 1983 que "Aprueba Objetivos y Políticas para el Desarrollo Nuclear Chileno"</p> <p>La Ley N° 18.302 de 1984 sobre Seguridad Nuclear.</p> <p>Decreto Supremo No. 302 de 1994 que "Aprueba los planes nacionales para el desarrollo nuclear."</p> <p>Estudio Legal recién terminado.</p>	<p>Un plan de acción que involucre la legislación Nuclear Nacional requiere los siguientes pasos:</p> <p>(a) Revisión y análisis de los instrumentos legales vigentes tanto nacionales como internacionales.</p> <p>(b) Detección de las brechas a partir del anterior análisis.</p> <p>(c) Establecimiento de las definiciones básicas sobre el Órgano Regulador.</p> <p>(d) Diseño de una proposición que incluya las diversas alternativas de ajuste al marco legislativo tanto para la actual como futura actividad nuclear en el país.</p> <p>(e) Fase de Negociación: En ésta fase la autoridad decide sobre los diversos escenarios recomendados. Se identifican los requerimientos necesarios para ejecutar la opción elegida (recursos y requerimientos de coordinación y fechas límites involucrados)</p> <p>(f) Finalmente, se concluye con un plan de acción para cumplir con los compromisos contraídos.</p> <p>(g) El estudio legal que se contrató para la segunda parte del marco legislativo desarrollará éste punto.</p>

<p>2. Un plan para identificar otras leyes a preparar o enmendar debe estructurarse. El plan debe incluir la escala de tiempo para la aprobación y las acciones, la escala de tiempo y recursos requeridos para promulgar la legislación. El plan también debe incluir:</p> <p>(a) Protección ambiental (aire y calidad de agua y protección de la vida silvestre).</p> <p>(b) Preparación de Emergencia y su gestión.</p> <p>(c) Salud Ocupacional y seguridad de los trabajadores.</p> <p>(d) Protección de la propiedad intelectual.</p> <p>(e) Control local de uso de tierras.</p> <p>(f) Inversión Extranjera.</p> <p>(g) Impuestos.</p> <p>(h) Roles del Gobierno nacional, local, interesados y público.</p> <p>(i) Garantías financieras.</p> <p>Más detalles están disponibles en el Manual de OIEA sobre Ley Nuclear [13].</p>	<p>Estudio sobre Ley19.300 de 1994 “Sobre Principios Generales del Medioambiente”, que contiene el Sistema de Evaluación del Impacto Ambiental”.</p> <p>Gestión y manejo de emergencias cubierto por asunto 14.</p> <p>Decreto Supremo No. 3 de 1985, “Regulación sobre Protección Radiológica en Instalaciones Radiactivas”.</p> <p>Ley N° 17.336 de 1970 “Sobre Propiedad Intelectual”.</p> <p>Decreto Ley No. 600 de 1974 sobre “ Inversión Extranjera”</p> <p>Decreto con Fuerza de Ley No. 7 de 1980 que establece la Ley Orgánica de la Contraloría General de La República.</p> <p>Decreto con Fuerza de Ley No. 251 de 1931 “Sobre Compañías Aseguradoras, Corporaciones y Venta de Títulos”.</p>	<p>Parte de éste marco legal fue identificado en el estudio de STUK.</p> <p>Otros asuntos serán considerados en el estudio legal que recién termina en febrero de 2010.</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

EVALUACIÓN: *Acciones significantes necesarias:* Δ *Acciones menores necesarias:* Δ *No acciones necesarias:* Δ

<p>5.3 Consulta planificada a los interesados sobre el Marco Legislativo</p>	<p>Fase 1</p>
-------------------------------------------------------------------------------------	---------------

Bases para la Evaluación	Evidencia	Observaciones
<p>1. Evidencia documentada que los interesados relevantes han sido identificados y consultados y que sus comentarios han sido solucionados o satisfechos.</p>	<p>Estudio de Marco Legal en evaluación</p>	<p>Está considerado en el desarrollo del asunto 5.2</p>

EVALUACIÓN: *Acciones significantes necesarias:* Δ *Acciones menores necesarias:* Δ *No acciones necesarias:* Δ

Tabla 8: Resumen de la autoevaluación para aspectos legales

5.- MARCO LEGISLATIVO	
Condición	
<i>5.1 Adhesión planificada a todos los instrumentos legales internacionales relevantes.</i>	Acciones Menores Necesarias
<i>5.2 Planes para promulgar la legislación nuclear nacional.</i>	Acciones Menores Necesarias
<i>5.3 Consulta planificada a interesados nacionales sobre el Marco Legislativo.</i>	Acciones Menores Necesarias

3.1.1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y SU EVALUACIÓN

En el caso de nuestro país, el ejercicio de autoevaluación fue realizado por el equipo de trabajo conjunto CNE-CCHEN, el cual durante un período de diez meses revisó las condiciones para dieciocho aspectos de la fase 1. En diciembre del año 2009 el ejercicio fue objeto de revisión por parte de una Misión de Verificación del OIEA compuesta por cuatro expertos. El objetivo de la Misión era establecer si el país estaba trabajando de manera adecuada y entregar retroalimentación con miras a una Misión INIR a realizarse a fines del 2010.

La Misión de Verificación enviada por el OIEA concluyó que el ejercicio de autoevaluación que está siendo llevado a cabo por el país es completo, bien preparado y cumple satisfactoriamente con las recomendaciones del OIEA¹¹⁴.

Entre las principales conclusiones de la Misión destacan la constatación de que el país cuenta con una base importante para evaluar sus capacidades y brechas en relación a un eventual PNP y para planificar adecuadamente el fortalecimiento de las competencias necesarias. Esta capacidad responde a que el país ha operado por más de 30 años reactores nucleares experimentales y otras instalaciones nucleares bajo los estándares de seguridad establecidos y controlados por el OIEA, lo que le entrega una experiencia considerable en ámbitos como seguridad nuclear, protección radiológica, protección física y manejo de residuos radiactivos. Asimismo, de la extensa y continua colaboración entre el país y el OIEA, así como de la expresa ratificación del conjunto de tratados internacionales que regulan el uso pacífico de la energía nuclear, se considera que Chile ha demostrado su compromiso con el desarrollo pacífico de la energía nuclear.

114 OIEA (2009b).

Por otra parte, la Misión reconoce que Chile aún tiene pendiente importantes desafíos frente al eventual desarrollo de un PNP, entre los que destacan el diseño e implementación de los ajustes legales y regulatorios necesarios, el desarrollo de recursos humanos y la generación de información geológica crítica.

Finalmente, la misión de expertos destacó el proceso y el formato en que fueron presentados los resultados del ejercicio de autoevaluación, manifestando su interés en que sean usados como modelo por otros países que se encuentran evaluando la opción nuclear¹¹⁵.

3.1.2 Principales Dimensiones Consideradas y Algunos Resultados

3.1.2.1 Recursos humanos

La opción nuclear implica un enorme desafío en lo que se refiere a contar con personas con competencias (conocimientos y habilidades) específicas del área. Actualmente, el país se encuentra en la fase 1, por lo que se está generando un plan de desarrollo de los recursos humanos necesarios para un PNP, principalmente enfocado en las primeras dos fases. El trabajo inicial se ha centrado en identificar las competencias necesarias para el órgano regulador y para un comité de alto nivel asesor del gobierno.

Las competencias que requiere el órgano regulador son conocidas y se encuentran especificadas en las distintas convenciones de seguridad nuclear. Al órgano regulador le corresponde velar por el cumplimiento de las normas y estándares de seguridad en la operación de una central nuclear, así como también velar por la protección de las personas.

En el caso del comité de alto nivel asesor del gobierno, estas competencias incluyen las capacidades técnicas para continuar con el desarrollo de estudios y análisis necesarios, así como las que se requieren para preparar un equipo de gestión de proyecto que pueda cumplir el rol de “comprador inteligente”. Por comprador inteligente se entiende un equipo que sea capaz de especificar el alcance y los estándares que requiere un PNP, así como posteriormente, durante la etapa de licitación, evaluar si las propuestas recibidas satisfacen las especificaciones requeridas. Cabe destacar que éste último rol puede ser asumido íntegramente por el sector privado si es que finalmente el Estado no participa en la propiedad del proyecto.

Por último, con respecto a la operación de una central, si bien en una primera instancia el país puede adquirir el capital humano requerido con un *vendor* a través de un contrato “llave en mano”, en un mediano plazo se requeriría invertir en la formación de personal a nivel

115 OIEA (2009).

nacional. Cabe destacar que, dadas las características de la energía nuclear y dado que la operación de una planta involucra al menos a tres generaciones de profesionales y técnicos, el proceso de formación requiere varios años de entrenamiento especializado. Este proceso se ha enfocado desde la perspectiva de un modelo por competencias. En este sentido, se ha realizado una distinción entre las competencias requeridas para operar la planta respecto de aquellas necesarias para el desarrollo de las funciones del órgano regulador y del comité de alto nivel asesor del gobierno. Así, se ha estimado una dotación promedio de alrededor de 100 profesionales y técnicos para estas últimas dos funciones y se han definido los mínimos conocimientos, habilidades y actitudes que debieran adquirir de acuerdo al proceso que corresponda.

De acuerdo a la etapa en la que se encuentra el país, la prioridad en términos de recursos humanos se encuentra en el órgano regulador, el cual dentro de sus primeras funciones debe autorizar el emplazamiento de la planta. En la actualidad en Chile la autoridad regulatoria de las operaciones de primera categoría es el Departamento de Seguridad Nuclear y Radiológica de la CCHEN. Se considera que las personas que trabajan en este departamento pueden servir como la base a partir de la cual debieran desarrollarse las competencias futuras. Así, se está trabajando para disponer de un diagnóstico de las competencias actuales de cada una de las personas que desarrollan funciones en el área para, de acuerdo a las futuras funciones, elaborar el programa de formación por cargo y poner a disposición del país lineamientos para los programas de educación superior. Esta primera aproximación entrega una estimación de la cantidad de personas requeridas, identifica las competencias necesarias y el lugar donde pueden ser capacitados.

De acuerdo al ejercicio de autoevaluación, este es un aspecto en el que se requieren acciones significativas.

3.1.2.2 Marco legal y regulatorio

El marco legal establece los deberes y responsabilidades de las diversas organizaciones necesarias para un PNP exitoso. Dado que un PNP no puede ser operado en forma aislada, la legislación debe aplicar los instrumentos internacionales en los que el gobierno es parte. Por lo tanto, la legislación nacional deberá incluir en forma integral todos los aspectos de la legislación nuclear, es decir, seguridad nuclear, seguridad física, salvaguardias y responsabilidad por daños nucleares.

El país cuenta con una Ley de Seguridad Nuclear (LSN)¹¹⁶; sin embargo, ésta ley no fue creada considerando una central de potencia, por lo que es inadecuada e insuficiente para enfrentar un PNP. El juicio anterior también aplica a la legislación y la institucionalidad ambiental vigente en materia de generación núcleo-eléctrica. En el caso de ésta última, si bien contempla las centrales nucleares, no establece requerimientos específicos para las etapas de emplazamiento, diseño, construcción y puesta en marcha de la misma (incluido el cierre y/o clausura de la planta)¹¹⁷.

Asimismo, se ha detectado la necesidad de realizar una serie de ajustes legales en diversos ámbitos, entre los que destacan: responsabilidades estatales y privadas durante el ciclo de vida nuclear; gestión de residuos radiactivos; implementación de convenios internacionales; establecimiento de seguros y garantías estatales, entre otros¹¹⁸.

En lo referente a las responsabilidades estatales y privadas, se debe adecuar la legislación vigente a la normativa internacional que trata estas materias, ajustando plazos de prescripción, límites, daños que no son cubiertos por la cobertura, etc.

Con respecto a la gestión de residuos, falta una normativa específica que se refiera al manejo de residuos de alto nivel¹¹⁹. Asimismo, se deberán introducir normativas que regulen el mecanismo a través del cual se financiará la gestión de residuos radiactivos.

En el tema de implementación de convenios internacionales, si bien el país ha suscrito la mayoría de los convenios requeridos, no todos ellos se encuentran reflejados en la legislación nacional; por ende, se requiere que éstos sean incorporados y desarrollados en base a los principios que los mismos establecen.

En materia de garantías estatales y seguros privados, ni la LSN ni la normativa en materia de seguros privados se condicen con lo que se requiere para llevar a cabo el proyecto. En cuanto a las garantías estatales, la LSN no cumple con los requerimientos internacionales y lo establecido en los tratados internacionales¹²⁰. En relación con los seguros privados en materia de responsabilidad civil nuclear, es necesario revisar los límites de las coberturas, la prescripción, las restricciones y exclusiones, y las posibilidades de reaseguro, entre otros aspectos.

Por su parte, el establecimiento de un marco regulatorio adecuado es crucial para el éxito a largo plazo de un PNP. En particular, es fundamental la existencia de un órgano regulador

116 Ley N°18.302 sobre Seguridad Nuclear.

117 U. de Chile - Barros & Errázuriz (2010).

118 U. de Chile - Barros & Errázuriz (2010).

119 La estrategia utilizada a la fecha para la gestión de los desechos radiactivos de alto nivel ha sido la repatriación de éstos a USA (previo enfriamiento en la piscina del reactor), en el marco del "Programa Global de Amenazas" impulsado por el Departament of Energy (DOE).

120 Incluso en algunos ya ratificados por Chile.

nuclear independiente y competente para asegurar la confianza del público y de la comunidad internacional. La experiencia internacional ha demostrado que la seguridad nuclear y la credibilidad son mejor servidos por una separación completa del órgano regulador de las organizaciones de promoción y aplicación de la energía nuclear como de las autoridades políticas. Por lo tanto, el país necesita resolver cuanto antes la separación efectiva del órgano regulador, que hoy forma parte de la CCHEN, independiente de si se decide o no avanzar en la opción núcleo-eléctrica¹²¹.

3.1.2.3 Salvaguardias

El OIEA establece que todo país que esté considerando implementar un PNP debe demostrar un compromiso profundo y explícito con la no proliferación de armas nucleares. Esto se expresa principalmente a través de la firma de acuerdos internacionales de no proliferación y acuerdos de salvaguardias con el OIEA. La firma de estos acuerdos facilita la comprensión de los compromisos inherentes a la utilización de la energía nuclear a la vez que legitima la posición del país para avanzar hacia la implementación de un PNP.

En este ámbito, nuestro país ha firmado, ratificado y es miembro activo de las convenciones internacionales en materia de seguridad, desarme y no proliferación. El país comparte la visión acerca de los fines exclusivamente pacíficos de la energía nuclear, lo que queda demostrado a través de la suscripción y ratificación del Tratado de Tlatelolco (18 de enero de 1994) y del tratado de No Proliferación Nuclear - TNP (25 de Mayo de 1995).

En relación con la aplicación de salvaguardias, nuestro país suscribió y ratificó la aplicación de Acuerdos Amplios de Salvaguardias (5 de abril de 1995, promulgado por el Decreto N° 539, publicado el 19 de Julio del mismo año) y el Protocolo Adicional (Decreto N° 17, publicado el 20 de Marzo de 2004), instrumento jurídico que permite al OIEA evaluar en forma segura la no desviación de materiales nucleares para fines no pacíficos. Al respecto, Chile ha cumplido a cabalidad con el calendario establecido por el OIEA, remitiendo cada una de las declaraciones solicitadas dentro del marco del Protocolo. Asimismo, se han llevado a cabo regularmente las inspecciones establecidas dentro del marco de este acuerdo.

Por lo tanto, queda de manifiesto que nuestro país tiene una clara comprensión y un compromiso explícito con sus obligaciones internacionales de no proliferación, así como de sus acuerdos de salvaguardias con el OIEA.

121 STUK (2009).

Entonces, al considerar el ejercicio de autoevaluación, Chile no sólo estaría listo en este aspecto para la fase 1, sino que de acuerdo al esquema propuesto por el OIEA, nuestro país se encontraría con casi todos los requisitos cumplidos hasta la fase 2.

3.1.2.4 Emplazamiento

La evaluación geológica del territorio nacional es una parte crucial dentro de un PNP, ya que permite identificar la disponibilidad e idoneidad de posibles emplazamientos para la construcción de una eventual central nuclear.

Para la fase en la que se encuentra el país es fundamental analizar si se cuenta con información disponible para poder evaluar adecuadamente la viabilidad de desarrollar un PNP en el territorio nacional. En el caso de la energía nuclear, la información geológica existente en el país es incompleta para poder evaluar adecuadamente un proyecto de estas características. Para ello se requiere contar con información geológica adicional y en mayor profundidad (sísmica, litológica, vulcanológica, etc.) de todo el territorio nacional, así como también monitorear una serie de variables meteorológicas.

Para reunir esta información y asegurarse de obtener resultados válidos, se necesita de ciertos plazos mínimos. Estos plazos dependen de la información requerida o del tipo de peligro a evaluar, y pueden ir desde los dos hasta más de cuatro años.

En el caso de un eventual PNP, los estudios geológicos constituyen la principal brecha debido a que son los que requieren de mayores esfuerzos de medición y monitoreo y los que involucran mayor tiempo. Para enfrentar dicha brecha, se sugiere promover el desarrollo temprano de estudios geológicos a lo largo del territorio nacional, a objeto de generar una base de datos que permita realizar una caracterización confiable en términos de riesgos naturales. Esta información será de gran utilidad, aún cuando se decida no avanzar en el desarrollo de un PNP, ya que permitirá contar con una línea de base adecuada para evaluar diversos proyectos de gran envergadura y entregar información relevante para la planificación territorial.

Un estudio encargado al Departamento de Geología de la Universidad de Chile (2009) determinó las brechas existentes en términos de información y los recursos necesarios para cubrirlas. Los resultados de este estudio, el cual realizó un levantamiento de información disponible en Chile en materia de riesgos naturales e hizo una primera identificación de macro zonas potencialmente riesgosas, cumplen a cabalidad los requerimientos de información necesaria para cumplir con la fase 1 de un PNP. Asimismo, entrega una base sólida para programar los pasos a seguir en la planificación del desarrollo de los estudios, poniendo énfasis en aquellos que requieren de mayor cantidad de tiempo para ser realizados.

Por último, cabe destacar que si bien en nuestro país existen capacidades técnicas de alto nivel para realizar estos estudios, se estima que la dotación de profesionales especialistas en el tema sería insuficiente para generar la información requerida en el plazo estimado para la fase 2, así como para asistir técnicamente al órgano regulador. Por lo tanto, se requieren mecanismos que incentiven el incremento de profesionales en el ámbito de ciencias de la tierra.

3.2 Opinión Ciudadana Respecto a la Eventual Implementación de un PNP

3.2.1 Importancia de Contar con Apoyo Ciudadano

La experiencia internacional ha demostrado que sin un amplio acuerdo nacional no es posible desarrollar un PNP. Este amplio acuerdo nacional se requiere tanto por motivos prácticos como éticos.

En términos prácticos, la decisión de desarrollar un PNP careciendo de respaldo ciudadano implica la posibilidad de que eventualmente se revierta la decisión, lo que haría inviable el desarrollo del proyecto¹²². Dado que Chile cuenta con períodos presidenciales de cuatro años, y que por lo tanto un PNP involucraría por lo menos a tres gobiernos, este riesgo es particularmente relevante. Un gobierno con una mirada cortoplacista puede encontrar conveniente revertir la decisión de la administración anterior si esta no contaba con un apoyo ciudadano suficiente. Por los plazos que lleva la implementación de un PNP la reversión de la decisión puede ocurrir antes que haya siquiera comenzado la construcción de la central. A nivel internacional existen varios ejemplos de plantas que debieron dejar de operar, o que incluso nunca alcanzaron a hacerlo, debido a que los gobiernos o la ciudadanía decidieron prescindir de la energía nuclear. Esto es lo que sucedió en los casos de las centrales Zwentendorf (Austria, 1978), Caorso (Italia, 1987) y Valdecaballeros (España, 1984)¹²³.

¹²² SYSTEP (2009).

¹²³ La construcción de la central de Zwentendorf fue finalizada pero nunca alcanzó a operar tras un referéndum que prohibió el uso de energía nuclear en Austria. En el caso de Caorso, ésta dejó de operar después de que en un plebiscito (gatillado por el accidente de Chernobyl) se decidiera cerrar las centrales nucleares de Italia. Por último, en España la construcción de la planta de Valdecaballeros se vio interrumpida luego que el gobierno decretara una moratoria nuclear.

Evidentemente, dados los riesgos involucrados, para viabilizar un PNP resulta fundamental alcanzar un amplio acuerdo nacional que dé certeza que la decisión de incorporar la energía nuclear en la matriz se va a sostener en el tiempo. De no contar con dicha certeza, el riesgo financiero asociado a decisiones políticas que implican detener o cancelar un PNP es de tal magnitud que desincentivaría cualquier interés privado en invertir en un proyecto de generación núcleo-eléctrica, así como también el interés de los profesionales y técnicos por capacitarse y especializarse en temáticas relacionadas con dicho proyecto.

En una dimensión ética, dado que un PNP involucraría a varias generaciones, se necesita contar con un debate informado que le dé legitimidad a la decisión de implementarlo. Un tema particularmente relevante en esta dimensión es el de la gestión de los residuos. Al respecto, si bien la tecnología actual garantiza que los residuos pueden ser almacenados temporalmente de manera segura y posteriormente dispuestos en repositorios geológicos en condiciones que evitarían la entrada en contacto con el medioambiente, el manejo de los residuos es una responsabilidad que recae sobre varias generaciones. Por consiguiente, será tarea de las generaciones futuras proteger las instalaciones donde se almacenan los residuos, así como también monitorear las condiciones dentro de los repositorios geológicos en caso que ésta sea finalmente la alternativa escogida para la disposición final de los residuos.

3.2.2 Energía Nuclear y Opinión Pública en Chile

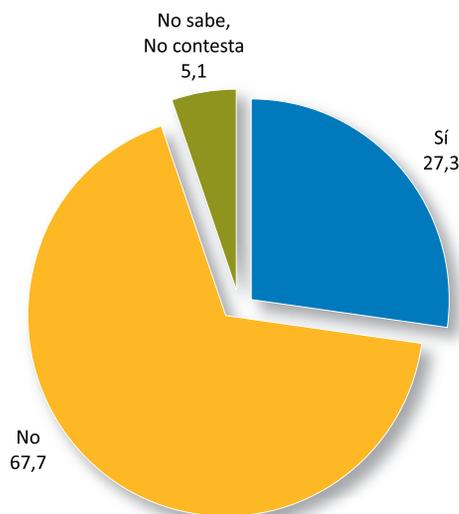
En los últimos años diversos estudios de opinión pública nacionales han incorporado preguntas respecto a la posición de las personas frente a la posibilidad que se incluya la energía nuclear en la matriz eléctrica. Durante el año 2009 la CNE encargó un estudio específico con el objetivo de medir conocimiento y actitud hacia la generación núcleo-eléctrica, en un contexto que considere distintas fuentes de energía¹²⁴. Este estudio –que combinó metodologías de investigación cualitativa y cuantitativa– confirmó los resultados obtenidos por otros sondeos, en cuanto a que la opinión pública se manifiesta mayoritariamente en contra de esta opción¹²⁵. En particular, el estudio arrojó que un 67% de los encuestados a nivel nacional señaló estar en desacuerdo con que se construya una central nuclear en Chile.

¹²⁴ Tironi y Asociados (2009).

¹²⁵ Un estudio realizado por la UDP el 2009 en la RM arrojó que un 42% de los encuestados opina que Chile debería evitar a toda costa el uso de la energía nuclear.



Gráfico 17: Respuestas a la pregunta ¿Estaría usted de acuerdo con la construcción de una central nuclear en Chile? (%)



Fuente: Tironi y Asociados (2009).

Además de registrar las opiniones más comúnmente asociadas a esta tecnología, el estudio se propuso medir el nivel de conocimiento e identificar las principales percepciones en relación con una eventual implementación de un PNP en el país, así como analizar detalladamente los fundamentos de las mismas.

En términos de conocimiento, se aprecia una desinformación generalizada en relación con las distintas fuentes de energía y con la energía nuclear en particular. Por ejemplo, un 34% de los encuestados señaló que en términos de costo, la energía solar es la más barata, mientras que un 35% indicó a la energía hidráulica como la más cara, cuando la realidad muestra justamente lo contrario.

En el caso de la energía nuclear, si bien un 37% de los encuestados la identifica como la fuente más potente, al mismo tiempo un 24% piensa que es la más cara y un 22% la señala como la menos limpia. Esto último revela un profundo desconocimiento con respecto a sus costos de generación y a sus niveles de emisión de GEI, los cuales en ambos casos son relativamente bajos.

Tabla 9: Resultados Encuesta Nacional de Percepción Ciudadana

	Carbón	Gas Natural	Eólica	Hidroeléctrica	Nuclear	Solar
La más limpia	0,4	3,7	32,4	12,0	1,1	48,3
La menos limpia	66,2	3,3	1,2	4,1	22,1	1,2
La que mejor asegura el suministro	2,1	19,6	7,9	37,4	6,2	21,2
La que no asegura el suministro	31,5	21,9	8,3	8,9	9,7	11,4
La más peligrosa	17,8	14,3	,9	3,9	59,0	1,5
La menos peligrosa	4,3	8,0	29,0	13,7	1,7	40,8
La más cara	2,7	17,6	3,8	34,7	24,3	7,0
La más barata	29,3	6,7	13,3	8,4	2,1	33,7
La más potente	1,7	8,3	1,6	31,1	36,9	12,7
La menos potente	44,6	6,2	17,5	3,0	1,8	18,3

Nota: Las cifras corresponden a % de menciones espontáneas. La suma de las respuestas no da 100%. La diferencia corresponde a quienes mencionaron otra fuente de energía o señalaron no saber.

Fuente: Tironi y Asociados (2009).

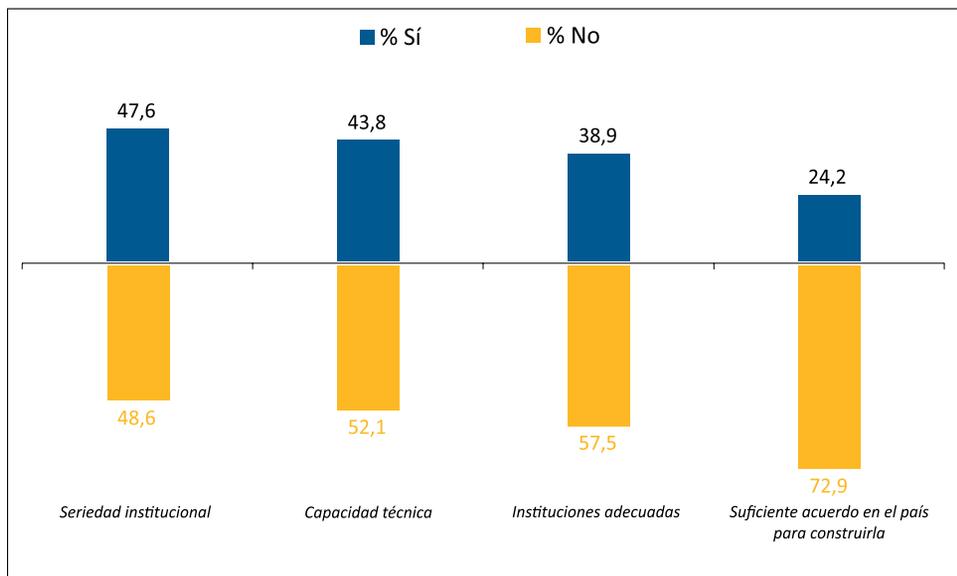
En cuanto a las actitudes, gran parte de la población muestra una aproximación negativa hacia la energía nuclear. Ello se debe en gran medida a que esta tecnología es principalmente percibida como riesgosa. El 23% de los encuestados asoció la energía nuclear a “destrucción”, un 22% a “peligro” y un 15% a “contaminación por desechos tóxicos”. Por el contrario, sólo un 17% de los encuestados asoció la energía nuclear con conceptos positivos, como por ejemplo “alternativa energética”, “desarrollo científico” o “potencia energética”.

Esta percepción negativa presenta una importante carga simbólica y está fuertemente mediada y marcada por el temor, asociado principalmente a posibles accidentes, a la gestión de los residuos y a potenciales usos bélicos. Entre los encuestados que se manifestaron en contra que se construyera una central nuclear, un 89% señaló que en caso que se construyera se dañaría el medioambiente debido a los residuos. Asimismo, un 74% dentro de este mismo grupo opinó que existiría un alto riesgo que ocurriera un accidente radioactivo y casi un 60% que se podría usar la planta para fines militares.

Un segundo factor que influye en la actitud que tiene la población hacia la energía nuclear tiene que ver exclusivamente con el país y la percepción que se tiene acerca de su capacidad de implementar exitosamente proyectos complejos de gran envergadura. En este ámbito, se aprecia una desconfianza generalizada en la capacidad nacional para desarrollar un PNP de manera segura. En particular, se señala que el país no está preparado para incorporar la energía nuclear en la matriz eléctrica, lo cual apunta a que el país no cuenta actualmente con la infraestructura adecuada para implementar un PNP de manera segura, cumpliendo con los

más altos estándares internacionales (especialmente en materia institucional y de RRHH), así como tampoco con un acuerdo país.

Gráfico 18: Respuestas a la pregunta ¿Cree usted que Chile cuenta con las siguientes condiciones para construir una planta nuclear? (%)



Nota: La suma de las respuestas no da 100%. La diferencia corresponde a quienes señalaron no saber.
Fuente: Tironi y Asociados (2009).

Si bien el estudio muestra que en la actualidad la opinión pública está mayoritariamente en contra de la implementación de un PNP, la gente admite no tener suficiente información y declara estar abierta al debate. Esto significa que las posiciones respecto a la energía nuclear están en construcción, que no se percibe un atrincheramiento valórico ni técnico y que, por lo tanto, las posiciones sobre la energía nuclear aún están en formación y aceptan altos grados de flexibilidad¹²⁶. En efecto, entre los encuestados que se declaran contrarios a la energía nuclear, un 74,4% señala que estaría dispuesto a cambiar de opinión si se le asegura alguna de las siguientes condiciones: que sea más limpia que otros tipo de energía; que permita asegurar el suministro continuo de energía; que sea más económica que otros tipos de energía; que evite el uso del carbón; que la mayoría de los chilenos esté de acuerdo con la construcción de una planta o que el riesgo de accidente sea muy bajo.

126 Tironi y Asociados (2009).

Ya que esta extendida actitud negativa se basa en una desinformación y desconfianza generalizadas, y dado que el público se muestra abierto a discutir la opción de generación núcleo-eléctrica, existe un espacio para la entrega y divulgación de información que presente datos con las características de esta tecnología de manera clara y objetiva. Es particularmente relevante proveer información respecto a los avances que ha habido en términos de diseño de reactores, sistemas de seguridad y manejo del combustible usado, así como entregar estadísticas en relación con la eficiencia operativa de los reactores, registro de accidentes y emisión de GEI, entre otros.

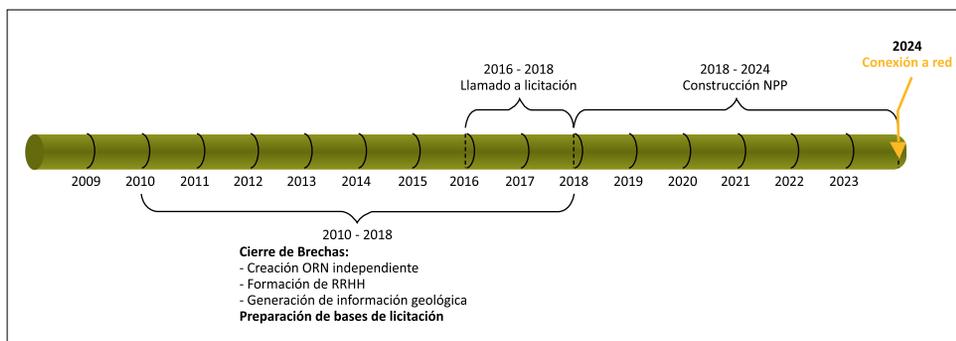
Igualmente relevante es que la discusión que se genere se enmarque dentro de una discusión estratégica más amplia sobre los desafíos que enfrenta el país en materia energética. En particular, es importante tener en cuenta que los requerimientos energéticos del país van a ir en aumento y que contar con energía suficiente y oportuna es fundamental para el desarrollo del país. Por lo tanto, la discusión no debiera focalizarse en si el país quiere o no incorporar la energía nuclear a la matriz, sino más bien en qué tipo de matriz nos permitirá en el largo plazo contar con energía suficiente, a precios competitivos y ambientalmente sustentable. Mantener la discusión acotada a proyectos eléctricos específicos, mantendría la tendencia actual a oponerse a todos ellos. La consecuencia final de un proceso como este sería no contar con la energía necesaria para el país. Evidentemente, la ciudadanía no estaría de acuerdo con este resultado.

Respecto a la desconfianza en la capacidad nacional de implementar un PNP de manera segura, el proceso de construcción de confianza requiere en primer lugar que el país esté objetivamente en condiciones de abordar exitosamente el desafío que involucra este emprendimiento. Para ello es necesario desarrollar la infraestructura requerida a través de un trabajo de cierre de brechas impecable. En última instancia, la única manera en que el Estado puede mostrarle a la ciudadanía que está preparado para implementar un PNP de manera segura, cumpliendo con los estándares establecidos internacionalmente, es contando efectivamente con las capacidades necesarias.

Conclusiones

En base al análisis realizado para 18 aspectos de infraestructura, se concluye que actualmente el país no está listo para implementar un PNP. Sin embargo, existe claridad respecto a lo que se requiere y el país está en condiciones de implementar oportunamente la infraestructura necesaria. En particular, de acuerdo a los plazos estimados, hay tiempo suficiente para avanzar en el cierre de brechas, considerando los plazos establecidos como factibles para el inicio de un PNP. De acuerdo al esquema del OIEA (ver figura 1) desarrollar un PNP, desde los estudios de factibilidad hasta la entrada en operación de una primera central nuclear de potencia, requiere entre 10 y 15 años. Si se estima que el país necesitaría empezar a operar una primera central alrededor del 2024 y que el período de construcción de una central toma alrededor de 6 años, entonces al país le quedarían como máximo 9 años para realizar los estudios de factibilidad y cerrar las brechas. Dado que el país ya cuenta con una infraestructura nuclear que soporta la operación de los reactores de investigación y si se considera además que la fase de estudios de factibilidad ya se encuentra avanzada, habría tiempo suficiente como para desarrollar un trabajo de cierre de brechas impecable.

Figura 5: Hitos importantes en un potencial PNP en Chile



En relación con el cierre de brechas, el ejercicio de autoevaluación permitió identificar aquellos aspectos donde no se requieren acciones, así como aquellos donde se requieren acciones menores o significativas. Entre los aspectos prioritarios en los que se requiere trabajar, destacan las áreas de RRHH, marco legal y regulatorio y realización de estudios geológicos.

Por otra parte, en términos de opinión pública el país tampoco está listo. Al respecto, hay claridad de que uno de los requisitos fundamentales para poder avanzar hacia la implementación de un PNP es contar con un amplio acuerdo nacional. En el caso de Chile, en la

actualidad este acuerdo no existe. Al respecto se identifican dos brechas: (i) desconocimiento y prejuicio con respecto a las características y desempeño de la energía nuclear, y (ii) desconfianza de las capacidades nacionales para llevar adelante un PNP.

En primer lugar, el desconocimiento y el prejuicio generalizado que existe acerca de la energía nuclear impide establecer una discusión seria en relación a la posibilidad de incorporar la generación núcleo-eléctrica en la matriz eléctrica nacional. Esta brecha se puede cerrar a través de informar adecuadamente a la población, no sólo acerca de la energía nuclear, sino que sobre todas las fuentes de energía, con el objetivo de poder tener una discusión pública seria acerca de qué tipo de matriz eléctrica queremos para el futuro. Esto significará una tarea difícil ya que, como señaló en una ocasión Albert Einstein, “es más fácil desintegrar un átomo que un prejuicio”. La tarea de proveer de información relevante es de suma urgencia ya que, sin un mínimo apoyo ciudadano acerca de mantener abierta la opción de incorporar la energía nuclear a la matriz nacional, no se puede iniciar el proceso de cierre de brechas de infraestructura. Y si bien hay tiempo suficiente para cerrar las brechas, los plazos son ajustados.

En segundo lugar, respecto a la desconfianza de las capacidades nacionales para llevar adelante un PNP, este es un juicio que se basa en experiencias recientes de políticas públicas poco exitosas. Por lo tanto, la única manera de cambiar dicho juicio es a través de un trabajo de cierre de brechas impecable que le garantice a la ciudadanía que la infraestructura desarrollada es comprensiva y que cumple con los más altos estándares internacionales de seguridad. Tomar la decisión definitiva de incorporar la energía nuclear a la matriz nacional requiere haber superado esta desconfianza y estar convencidos de que el país puede implementar un PNP de manera exitosa y segura.

En la próxima sección se esbozan las características principales que tendría un PNP en Chile si se decide avanzar en esta dirección, lo que requeriría que los escenarios energéticos más probables se concreten, que el país haya logrado desarrollar una infraestructura adecuada y se haya alcanzado un acuerdo nacional.

4. LINEAMIENTOS PRELIMINARES PARA UN PNP

Tras haber mostrado en las secciones anteriores el renacimiento nuclear a nivel mundial, establecido la conveniencia para Chile de contar con energía nuclear a partir de mediados de la década del 2020, revisado la experiencia internacional de esta tecnología en términos de seguridad e impactos en el medioambiente, en la sección anterior se llegó a la conclusión que, debido a que no se cuenta con la infraestructura adecuada ni con un acuerdo nacional suficiente, el país no está actualmente en condiciones de implementar un PNP. Sin embargo, también se concluyó que el país cuenta con las capacidades y los plazos necesarios para desarrollar una infraestructura adecuada que garantice la seguridad de un PNP, así como también con tiempo suficiente para iniciar un proceso de información a la ciudadanía que permita tener un debate público serio sobre la alternativa de incorporar la energía nuclear a la matriz eléctrica nacional.

Esta sección se desarrolla asumiendo que se ha tomado la decisión de incorporar la energía nuclear en la matriz eléctrica. En este contexto se esbozan las características principales que tendría un PNP en Chile. En particular, se analizan dos aspectos clave: (i) decisiones estratégicas asociadas al desarrollo de un PNP, y (ii) roles público y privado en un PNP. En relación con el primer punto, es necesario examinar una serie de decisiones de carácter estratégico relacionadas con la implementación de una primera central, principalmente aspectos tecnológicos y del ciclo de combustible. Respecto al segundo punto, es fundamental identificar cuál sería la participación del Estado, diferenciando aquellas funciones básicas de aquellas que le podrían corresponder según el esquema de propiedad que se adopte. Este es un ejercicio indicativo de carácter preliminar que se basa en la información disponible hoy. Naturalmente, a medida que se cuente con más información y conocimiento sobre tecnología y ciclo de combustible, estos lineamientos deberán ser objeto de revisión y ajuste.

4.1 Decisiones Estratégicas

Al inicio del proceso de evaluación de cualquier PNP se deben tomar una serie de decisiones estratégicas en el ámbito tecnológico y del ciclo del combustible. Estas decisiones son clave ya que fijan el marco y establecen las directrices que un país piensa seguir en el proceso de desarrollo de la generación núcleo-eléctrica. A continuación se explicitan dichas decisiones y se describen sus alcances.

4.1.1 Decisiones con Respecto a la Tecnología

En el caso de Chile, la evaluación de la opción núcleo-eléctrica está considerando sólo tecnologías probadas; es decir, tecnologías que cuentan con un número significativo de reactores y un récord impecable tanto desde la perspectiva operativa como de seguridad. A nuestro juicio, no es conveniente experimentar con nuevas tecnologías. Esta decisión permitirá garantizar objetivamente mayores niveles de seguridad de los reactores. Por otra parte, obtener apoyo ciudadano se ve extremadamente complejo si además se opta por tecnologías que no han tenido un uso extendido.

De acuerdo a este criterio, se están considerando diseños de reactores de generación III, tanto de agua liviana (PWR y BWR) como de agua pesada (CANDU¹²⁷), ya que son los más difundidos en el mundo. Esto no implica que, dependiendo de la evolución de la industria, en el futuro no se puedan considerar otro tipo de reactores. De hecho, se espera que en los próximos diez años entren en operación reactores de generación III+, los cuales posiblemente se convertirán en el estándar durante las próximas décadas ya que incorporan mejoras sustanciales en materias de eficiencia. Los modelos de generación III+ están siendo desarrollados por AREVA (EPR), Westinghouse (AP 1000), General Electric-Hitachi (ESBWR), Korean (AP 1400) y Mitsubishi Heavy Industry (APWR). De ellos, los más adelantados son el AREVA EPR con dos unidades en construcción en Finlandia (Olkiluoto 3) y Francia (Flamanville 3), y el Westinghouse AP 1000 con dos unidades en construcción en China (Sanmen). Se espera que unidades de los otros modelos empiecen a ser construidas entre el 2010 y el 2013, principalmente en China, Corea, Estados Unidos y Japón.

En caso de avanzar hacia el desarrollo de un PNP, el país tendrá que revisar las ventajas y desventajas de las distintas tecnologías disponibles y evaluarlas teniendo en consideración sus implicancias, particularmente en términos de tipo y suministro de combustible.

En el caso del tipo de combustible y sus características, los modelos de agua liviana (PWR y BWR) usan uranio enriquecido y tienen un sistema de recarga *batch* que implica paradas programadas cada 12, 18 ó 24 meses de operación. Por su parte, de la tecnología CANDU, que usa agua pesada y uranio natural, la recarga de combustible se realiza durante la operación y las paradas ocurren sólo cuando es necesario realizar mantenciones, inspecciones o pruebas de equipos.

Si bien en teoría los reactores CANDU mostraría un mayor *factor de planta* que los reactores de agua liviana, esto no se ha verificado y ambas tecnologías presentan rendimientos simila-

127 Canada Deuterium Uranium.

res¹²⁸. En términos de costo, debido a su diseño más simple y a que no requiere enriquecimiento, el combustible de los reactores CANDU tiene un costo significativamente menor al del combustible para reactores de agua liviana. Sin embargo, este menor costo de fabricación se ve contrarrestado por una menor potencia alcanzable, por lo que la diferencia real no sería relevante¹²⁹. Además, si se considera que los reactores CANDU dependen del suministro de agua pesada para operar¹³⁰, éstos no parecen tener un costo nivelado menor para la generación de electricidad que los reactores de agua liviana¹³¹. Por último, si bien en ambos casos es posible reprocesar el combustible gastado, en el caso de los reactores CANDU no resulta económicamente conveniente dado sus bajos niveles de material fisible¹³².

En términos de seguridad de suministro de combustible, como se señaló en el capítulo 2.3.2.2.2, éste no se considera un riesgo relevante. No obstante, por el mayor tamaño de mercado, hay más proveedores de combustible para reactores de agua liviana que para agua pesada. Sólo Canadá, China, India, Rumania y Argentina proveen servicios de conversión y fabricación de elementos combustibles para reactores CANDU. Asimismo, estos mismos países son los únicos proveedores de agua pesada¹³³.

En conclusión, el país ha decidido avanzar en el proceso de evaluación de la generación núcleo-eléctrica considerando sólo tecnologías probadas. Esto implica analizar tanto reactores de agua liviana como reactores de agua pesada. Si bien existen diferencias entre estos tipos de reactores, ambas son consideradas tecnologías probadas. Por lo tanto, a estas alturas del proceso resulta prematuro elegir entre ellas, aun cuando, por consideraciones de mercado, los reactores de agua liviana parecerían ofrecer una ventaja. Dicha decisión habrá que tomarla antes de llamar a licitación, una vez que se haya realizado un análisis exhaustivo sobre sus respectivas ventajas y desventajas.

4.1.2 Decisiones Con Respecto Al Ciclo Del Combustible

En relación con el ciclo de combustible, se tomaron una serie de decisiones para mantener el análisis focalizado en la conveniencia técnica, económica y ambiental de incorporar la energía

128 OIEA (2010).

129 El costo nivelado del combustible para los reactores de agua liviana es de 0,5 centavos de dólar/kWh versus 0,22 centavos de dólar/kWh para los CANDU (ver OIEA (2002b)).

130 Para abastecerse de agua pesada se requiere construir y operar una planta de producción de agua pesada o adquirirla en el mercado internacional.

131 AMEC-CADE (2009).

132 La concentración de uranio-235 en el combustible gastado de los reactores CANDU es de alrededor de 0,2% mientras que la concentración de plutonio es de 2,6 gramos/kilo inicial de uranio. A estos niveles, reprocesar no resulta económicamente conveniente (ver OIEA (2002b)).

133 OIEA (2005).

nuclear en la matriz eléctrica nacional. Estas decisiones consideraron el contexto internacional así como las capacidades nacionales actuales, y se pueden resumir en que para el caso de una primera planta nuclear el país optaría por: (i) desarrollar un ciclo de combustible abierto, (ii) abastecerse de combustible extranjero, y (iii) un proyecto tipo “llave en mano”.

El ciclo de combustible abierto significa que, una vez gastado, el combustible no será reutilizado. Esto implica que Chile se abstendrá tanto de enviar a reprocesar como también de desarrollar capacidades propias para ello. Esta decisión considera tanto la preocupación de la comunidad internacional con respecto al tema de proliferación, como el hecho que para programas de pequeña escala no resulta económicamente conveniente reprocesar.

Por otra parte, la decisión de abastecerse de combustible extranjero responde a que en la actualidad el país no cuenta con capacidades para fabricar su propio combustible. La parte inicial (*front end*) del ciclo de combustible consta de cuatro etapas: minería de uranio, conversión, enriquecimiento y fabricación de elementos combustibles. De estas etapas Chile sólo tiene competencias en la fabricación de elementos combustibles. En relación con la minería del uranio, si bien se han detectado yacimientos de uranio y hay un proyecto piloto para rescatar uranio de los residuos de la minería del cobre, esta es aún una actividad incipiente. Respecto a los procesos de conversión y enriquecimiento, estas actividades no se realizan en el país y, dado los esfuerzos por parte de la comunidad internacional para garantizar dichos servicios y así evitar que nuevos países desarrollen capacidades en este ámbito, no se espera que se desarrollen en el futuro. A pesar de que el país cuenta con experiencia en la fabricación de elementos combustibles para reactores de investigación y que por lo tanto, no se descarta que en el futuro el país pueda participar en la producción de elementos combustibles para reactores de potencia, nuestro análisis descarta esta opción para el caso de una primera planta, tanto por motivos de escala como para evitar sumarle mayores complejidades al proceso.

Por último, también para concentrar los esfuerzos visualizamos un esquema de “llave en mano”. Esto implica que se firma un acuerdo en el que el contratista (*vendor*) de la planta se compromete a diseñar, construir y administrar el proyecto hasta que esté listo para ser entregado al país para su operación. De este modo, el contratista se hace cargo de todas las actividades relacionadas con la construcción de la planta, así como también de coordinar con el explotador la preparación de los RRHH necesarios para su operación.

4.2 Rol Público y Privado

4.2.1 Institucionalidad Nuclear

Como ya se vio en la sección anterior, para poder implementar un PNP la actividad de generación núcleo-eléctrica debe estar debidamente normada y regulada en todos sus aspectos. Para ello, es necesario que el gobierno estudie y proponga al Congreso proyectos de ley que normen y regulen la instalación de centrales, el funcionamiento de las empresas propietarias de las centrales y de las empresas proveedoras de servicios para la industria nuclear, la creación y funcionamiento de organizaciones que manejen material radiactivo, entre otras materias.

En particular, es fundamental que la legislación nuclear considere todos los aspectos que ayuden a garantizar el desarrollo y uso seguro de la energía nuclear, entre los que destacan:

- Las condiciones y restricciones para el licenciamiento de sitios, construcción y operación de centrales nucleares e instalaciones anexas.
- La protección radiológica, la seguridad nuclear, la protección ambiental, el transporte de materiales radiactivos y la gestión de residuos nucleares.
- El establecimiento de los principios y reglas acerca de la responsabilidad civil y los seguros relacionados con los accidentes nucleares.
- El establecimiento de un sistema de contabilidad de materiales nucleares.¹³⁴

Por otra parte, además de sus funciones normativas, el Estado tiene responsabilidades regulatorias y fiscalizadoras inalienables. Estas responsabilidades deben ser asumidas por el Estado independientemente del modelo de propiedad que se adopte para el desarrollo de un PNP, e incluyen la creación de un órgano regulador independiente y una organización encargada del almacenamiento y gestión final de los residuos. Cabe destacar que si bien estas responsabilidades son intransferibles, la manera cómo las asume el Estado va a depender directamente

¹³⁴ UAI-SENE (2008).

del grado de participación que éste tenga en el proyecto.

4.2.1.1 Órgano regulador nuclear

El órgano regulador nuclear es el organismo encargado de establecer las normas y estándares relativos a la utilización de la energía nuclear en todas sus formas, así como también de fiscalizar su cumplimiento. Generalmente, el órgano regulador nuclear es el encargado de otorgar las licencias para las instalaciones nucleares. Específicamente, su rol es determinar las actividades permitidas, verificar el cumplimiento de las normas y estándares en la operación y suspender o caducar las licencias en casos que así lo ameriten¹³⁵.

Un aspecto fundamental del órgano regulador nuclear es que requiere de un alto grado de independencia respecto de la autoridad política, así como del organismo encargado de promover el desarrollo nuclear. Respecto a su ubicación dentro del organigrama del Estado, ésta va a depender de cuán involucrado se encuentre éste en la propiedad de la central. No existe un criterio universalmente aceptado, aunque en la mayoría de los casos el órgano regulador se encuentra “a nivel ministerial o un nivel bajo el ministerial”¹³⁶.

En el caso de Chile, si bien actualmente existe un órgano regulador nuclear, éste depende de la CCHEN por lo que no satisface las exigencias internacionales con respecto a la separación de funciones de promoción y fiscalización de la actividad nuclear. Por lo tanto, aún en caso que el país decida no desarrollar un PNP, para las actividades nucleares que hoy se realizan, es necesario crear un órgano regulador nuclear independiente de la CCHEN.¹³⁷

4.2.1.2 Gestión final de residuos nucleares

Para la gestión final de residuos nucleares, cualquiera sea la solución técnica que se adopte, debido a los plazos involucrados¹³⁸, el Estado tiene que hacerse cargo. Si se opta por un repositorio, el Estado podría actuar como propietario y operador o sólo como propietario, entregando en concesión la operación a una empresa privada. En cualquier caso, la operación del repositorio tendría que ser supervisada por el órgano regulador nuclear.

En el mundo existen varios modelos alternativos de cómo el Estado participa en la gestión final de los residuos. En Estados Unidos, si bien se descartó la construcción de un repositorio geológico, la responsabilidad por el manejo de los residuos radiactivos de alto nivel depende

135 UAI - SENES (2008).

136 UAI - SENES (2008).

137 U. de Chile - Barros & Errázuriz (2010).

138 En términos de gestión final de residuos se consideran períodos de tiempo que superan los 10.000 años.

del Departamento de Energía a través de la Oficina Civil de Gestión de Residuos Radiactivos (OCRWM)¹³⁹. En los casos de Francia y Finlandia se ha establecido por ley la creación de un organismo encargado exclusivamente de la gestión de los residuos, incluyendo la construcción y operación de repositorios. En el caso de Francia este organismo es una agencia estatal (ANDRA) independiente de los explotadores¹⁴⁰, mientras que en Finlandia es una empresa público-privada (Posive Oy) conformada por los dos explotadores existentes en el país (TVO y Fortum¹⁴¹). Por último, en el Reino Unido el esquema por el que se está optando es el de un repositorio geológico de responsabilidad del Estado, pero que pueda ser administrado por una empresa privada.

En el caso de Chile, la gestión de los residuos podría ser desarrollada exclusivamente por el Estado, o se podría optar por concesionar la operación del repositorio a empresas privadas conforme al esquema de *public-private partnership* (PPP) contenido en la Ley de Concesiones de Obras Públicas¹⁴².

4.2.1.3 Otras responsabilidades

Además de las funciones normativas, regulatorias, fiscalizadoras y de gestión final de residuos, existen otras responsabilidades asociadas al desarrollo de un PNP que, en otros países, han sido asumidas por el Estado. Entre éstas destaca la creación de un instituto de investigación y desarrollo y el establecimiento de un plan para enfrentar las necesidades de recursos humanos.

139 En Estados Unidos los explotadores de centrales nucleares deben pagar por la gestión de su combustible gastado. El gobierno recolecta un impuesto por cada kilowatt-hora de energía nuclear generada, y lo envía al Nuclear Waste Fund. El DOE recibe dinero de este fondo, bajo la aprobación del congreso.

140 El financiamiento viene de contratos comerciales (para el retiro de los desechos y la explotación y vigilancia de los centros de almacenamiento), de un impuesto (para la investigación y estudios sobre la disposición de los residuos) que es recolectada por la autoridad de seguridad nuclear (ASN) y depositado en un fondo de la agencia, y finalmente de una subvención pública (4.5M€ en 2008).

141 El Estado controla el 50,8% de Fortum y el 100% de TVO. Cada año estas compañías depositan un monto en un fondo independiente (National Nuclear Waste Management Fund), que es controlado y administrado por el ministerio de comercio e industria (Ministry of Trade and Industry). La cantidad que depositan se estima año a año según el estado del arte de la tecnología y las perspectivas de generación de residuos. Este fondo debe cubrir todas las necesidades futuras: tratamiento, almacenamiento, disposición final, incluyendo el desmantelamiento de las plantas.

142 U. de Chile - Barros & Errázuriz (2010).

4.2.1.3.1 Centro de investigación y desarrollo

La experiencia mundial indica que en la primera fase de los PNP, han sido las comisiones nacionales de energía atómica¹⁴³ (por sí mismas o a través de un centro de investigación estatal) las encargadas de desarrollar las actividades de investigación y desarrollo. En los países que cuentan con PNP avanzados, estos centros han seguido en funcionamiento y además de investigación, muchas veces entregan servicios y asistencia técnica a plantas y otras instalaciones nucleares, tanto nacionales como internacionales.

En general, estos centros de investigación se organizan como institutos tecnológicos¹⁴⁴. Algunos ejemplos de institutos tecnológicos destacados alrededor del mundo son la CNEA en Argentina, la CNEN en Brasil, el AECL en Canadá (encargado de desarrollar las actividades para respaldar la tecnología CANDU), el CEA en Francia, el VTT en Finlandia, el CIEMAT en España, el KAERI en Corea, el JAEA en Japón, los institutos dependientes de Atomenergoprom en Rusia y los laboratorios de Oak Ridge y Argonne en Estados Unidos.

4.2.1.3.2 Recursos humanos

Tal como se revisó en la sección anterior, el eventual desarrollo de un PNP requiere de personal calificado tanto para funciones normativas, regulatorias y fiscalizadoras, como para funciones operativas. En el caso de las funciones normativas y regulatorias, se necesita una centena de profesionales con conocimientos técnicos durante las primeras etapas del proceso de incorporación de la energía nuclear en la matriz nacional. Ello, porque entre las primeras tareas está la elaboración de un marco legal y un marco regulatorio específico.

Más adelante, en términos de funciones operativas, se requiere una dotación de entre 200 y 1.000 personas que dispongan de una diversidad de conocimientos científicos y técnicos¹⁴⁵ que permitan que la central pueda operar de manera eficiente y segura. Dado que Chile está evaluando la opción de una primera central nuclear “llave en mano”, las necesidades de profesionales para la operación de la central serían cubiertas principalmente por proveedores externos. No obstante, es preferible establecer desde ya un plan para disponer gradualmente de conocimientos técnicos en el ámbito local¹⁴⁶. Es recomendable, sin embargo, que como

143 Instituciones estatales para la investigación, fomento y desarrollo de la ciencia y tecnología nuclear.

144 Institución encargada del desarrollo de proyectos de investigación tecnológica y de formación específica asociada a dicha tecnología.

145 Entre ellos cabe citar la ingeniería nuclear, la instrumentación y control, la ingeniería eléctrica, la ingeniería mecánica, la protección radiológica, la química, la preparación para casos de emergencia, y el análisis y evaluación de la seguridad. El rango es amplio porque depende del tamaño y el tipo de tecnología,

146 Por ejemplo mediante un acuerdo de transferencia de tecnología que forme parte del contrato con el proveedor de la central nuclear.

parte del compromiso de desarrollo de la capacidad nacional necesaria, también se formule un programa destinado a la formación de los científicos, ingenieros y personal necesario para contar con capacidad científica y técnica para dar el apoyo requerido al desarrollo de un PNP. Al respecto, lo fundamental es que se comience a implementar medidas en el ámbito de educación, capacitación y reclutamiento para contar oportunamente con los recursos necesarios. Este tema es particularmente crítico ya que la falta de personal calificado es uno de los grandes desafíos a enfrentar a nivel mundial, de concretarse masivamente el “renacimiento” nuclear. En particular, se espera que en el corto plazo gran parte del personal empiece a retirarse¹⁴⁷, lo que significa que es muy probable que se produzca un déficit importante, especialmente de ingenieros nucleares¹⁴⁸.

En síntesis, el Estado tiene responsabilidades normativas, regulatorias, fiscalizadoras, en relación con la gestión a largo plazo de los residuos, y de planificación. Sin embargo, la manera en que asume estas responsabilidades depende directamente del nivel de participación que éste tenga en la propiedad de las eventuales centrales. Por lo tanto, es fundamental establecer tempranamente en el proceso el esquema de propiedad de un PNP, en particular, el grado de participación del Estado.

4.2.2 Esquema De Propiedad

Todos los PNP en el mundo se han iniciado con una fuerte participación del Estado. Esto implica no sólo que el Estado ha cumplido el rol de propietario de las centrales (al menos en una primera etapa), sino que ha tomado una serie de decisiones estratégicas en los ámbitos institucional, tecnológico, territorial y político que han resultado clave para la viabilidad y éxito del proyecto.

De los modelos de propiedad posibles, el que aparece como más idóneo para el caso de Chile es el de propiedad mixta público-privado. Este modelo considera el desarrollo inicial de la industria núcleo-eléctrica basado en la inversión y operación de una sociedad mixta en cuya propiedad participa el Estado en conjunto con capitales privados. En este esquema el Estado no sólo cumple funciones normativas, regulatorias y fiscalizadoras, sino que comparte como inversionista los riesgos financieros asociados al negocio.

Se estima que este modelo ayudaría a superar algunas de las dificultades que enfrentaría un modelo exclusivamente privado –como por ejemplo, el probable desinterés de los privados

¹⁴⁷ Lo mismo está ocurriendo a nivel nacional. Se espera que casi un 30% de los profesionales de la CCHEN se acojan a retiro dentro de los próximos cinco años.

¹⁴⁸ STUK (2009).

de embarcarse en un programa nuclear dados los altos riesgos políticos, financieros y tecnológicos-, así como también aquellas que enfrentaría un esquema puramente estatal, principalmente los problemas de eficiencia, trabas a la gestión y la utilización de recursos financieros del Estado¹⁴⁹.

La participación directa del Estado en la propiedad presentaría varias ventajas. Primero, desde la perspectiva de la viabilidad del proyecto, demostraría el compromiso político de desarrollar la industria y compartir los riesgos, facilitando así el acceso a condiciones de crédito más favorables. Asimismo, tendría un impacto positivo en disminuir los problemas de coordinación público-privada y en la aceptación pública. Segundo, desde una perspectiva estratégica, podría facilitar el proceso de toma de decisiones en una serie de aspectos preliminares clave, tales como la selección del sitio y las decisiones tecnológicas, dejando el desarrollo del resto de las actividades en manos de inversionistas privados.

En el caso de Chile, existe experiencia previa de esquemas de propiedad público-privada en proyectos energéticos, como por ejemplo en las plantas regasificadoras de GNL de Quintero y Mejillones o en los CEOPs de la Región de Magallanes. De acordarse que este modelo es el más adecuado para nuestro país, habría que evaluar las distintas alternativas y sus implicancias desde el punto de vista legal¹⁵⁰.

Finalmente, el modelo de sociedad mixta puede adoptar distintas formas, dependiendo de las participaciones relativas del Estado y los inversionistas privados en la propiedad y de si el Estado decide involucrarse directamente en la operación de la planta a través de una empresa pública o licitar la gestión a un operador especializado.

149 UAI-SENES (2008).

150 Para más detalles sobre los distintos esquemas de PPP posibles de acuerdo a la legislación nacional, revisar U. de Chile - Barros & Errázuriz (2010).



Conclusiones

Si el país decide implementar un PNP, éste debería seguir las siguientes orientaciones:

- Se optaría por utilizar reactores de tecnología probada y, por consideraciones de mercado, probablemente estos debieran ser de agua liviana.
- En el caso de la primera planta, se debería desarrollar un ciclo de combustible abierto con abastecimiento externo y un proyecto “llave en mano”.
- En términos de participación del Estado y del sector privado, el Estado tendrá que hacerse cargo de todas las funciones relativas a normar, regular y fiscalizar las actividades relacionadas con la generación núcleo-eléctrica, así como también de la gestión final de los residuos.
- Asimismo, de acuerdo a la experiencia internacional, se estima que el Estado debiera encargarse de la creación de un instituto de investigación y desarrollo y la elaboración e implementación de un plan de formación de los recursos humanos requeridos.
- Por último, con respecto a la propiedad de una primera central, se evalúa que un esquema de participación público-privado sería la opción más recomendable para asegurar el éxito y la seguridad del proyecto.

5. CONCLUSIONES

La opción nuclear para la generación eléctrica experimenta un renacimiento en el mundo y Chile no está ajeno a esta tendencia. La evolución proyectada del sector energético mundial y nacional indica que Chile –en los escenarios más probables– requerirá de energía nuclear a mediados de la década del 2020, para apoyar el cumplimiento de sus objetivos de eficiencia económica, seguridad de abastecimiento y precios, así como de sustentabilidad ambiental.

Tomar la opción nuclear, no obstante, es un compromiso de largo plazo que requiere disponer de las condiciones de infraestructura (en un sentido amplio), que garanticen que la utilización de esta forma de energía no conllevará riesgos inaceptables para la sociedad. La energía nuclear no genera impactos relevantes si su desarrollo se enmarca dentro de los más altos estándares de seguridad en todo el ciclo de vida. Ni siquiera las condiciones y peligros naturales de nuestro país son un impedimento para desarrollar un programa nuclear de potencia de manera segura si se toman las precauciones necesarias. Para ello se requiere de capacidades humanas así como de infraestructura física, organizacional y regulatoria de primer nivel en esta materia.

La evidencia que surge del análisis realizado muestra que Chile no cumple hoy estos requisitos por lo que no se encuentra preparado para incorporar la energía nuclear dentro de su matriz eléctrica, de manera exitosa y segura, aun cuando el país tiene experiencia operando reactores de investigación y ha desarrollado capacidades por más de 30 años en la materia. Dicha experiencia es, no obstante, de gran valor pues permite que el plazo disponible sea suficiente para cubrir oportunamente las brechas de infraestructura entre lo existente y lo requerido.

Sin embargo, si bien los plazos son suficientes, no son holgados.

Lo anterior implica que se requiere actuar con decisión y diligencia, pues en el caso de que los escenarios que se consideran más probables se materialicen, la puesta en marcha de un programa nuclear de potencia sería una necesidad ineludible.

En el caso de no estar preparados en ese momento, el país se expone a dos problemas potenciales. Uno de ellos sería pagar el costo de no disponer de la energía nuclear en el caso que esta fuera una opción conveniente (con el consiguiente costo por precios de los combustibles, la mayor inseguridad y emisiones de gases efecto invernadero). Otro sería pagar el costo de llevar adelante un programa nuclear de potencia de manera apresurada, sin cumplir con los más rigurosos estándares, exponiendo al país a un riesgo inadmisibles.

Prepararse para llevar adelante un programa nuclear de potencia puede implicar seguir, en el día de hoy, dos posibles alternativas. Una sería tomar la decisión irrevocable de embarcarse en el camino para la construcción de una primera planta nuclear, incluyendo el desarrollo de la infraestructura (tal como plantea la OIEA) o, alternativamente, avanzar sólo en la construcción de la infraestructura necesaria y decidir sobre la instalación física en un momento futuro, con mayores antecedentes.

Se estima que tomar la primera opción no sería ni necesario ni conveniente. No es necesario, pues la decisión definitiva de construir una planta nuclear para que esté operativa a mediados de la década del 2020 se puede tomar a mediados de la década del 2010. No es una opción conveniente, pues se requiere tiempo para evaluar: (1) si se logra avanzar de manera adecuada en el cierre de brechas, (2) si los escenarios considerados hoy como más probables lo siguen siendo a medida que avanza el tiempo y (3) si se cuenta con el necesario apoyo ciudadano¹⁵¹.

En efecto, dar inicio definitivo a un programa nuclear de potencia requiere estar en condiciones de hacerlo, para que dicho programa sea exitoso y seguro, por lo que lo primero que hay que hacer es invertir en el cierre de brechas de infraestructura y evaluar si efectivamente se estará en condiciones de hacerlo en tiempo y forma.

Adicionalmente, el hecho de que las proyecciones muestren que la energía nuclear ingresa a la matriz óptima en torno al año 2024 surge de un análisis de los escenarios más probables según se visualizan hoy con la información disponible. Sin embargo, algunas variables podrían evolucionar de manera distinta a lo proyectado, por lo cual dicha conclusión podría cambiar¹⁵². Por lo tanto, disponer de más tiempo para una decisión definitiva permitiría evaluar mejor en qué medida la nueva información que se obtiene ratifica o contradice las proyecciones realizadas

Finalmente, se debe reconocer que el apoyo ciudadano a un programa nuclear de potencia –crucial para su materialización efectiva– hoy no existe. Tomar la decisión de iniciar un programa nuclear sería, por lo tanto, apresurado y la incertidumbre que se generaría sobre su continuidad arriesgaría la viabilidad de la opción núcleo-eléctrica al no hacerla atractiva para potenciales interesados en el proyecto ni para los profesionales necesarios para apoyar su implementación.

151 Apoyo nacional sostenible en el tiempo respecto a la incorporación de la energía nuclear en la matriz eléctrica nacional.

152 Por lo tanto, el país requiere monitorear el escenario energético mundial y nacional atento a cualquier cambio tecnológico o de tendencia que haga necesario revisar la conveniencia de incorporar la energía nuclear a la matriz..

Antes de embarcarse en un programa nuclear de potencia se debe construir el apoyo ciudadano por medio de un proceso de difusión que tiene dos aspectos: uno educativo y el otro de persuasión. El desconocimiento y el prejuicio generalizado respecto a la energía nuclear en la población exigen que la ciudadanía se eduque sobre los costos, beneficios, riesgos y oportunidades relativos de las diversas tecnologías que pueden conformar la matriz eléctrica. Por otra parte, la gran desconfianza en las capacidades y recursos para llevar adelante exitosamente un programa nuclear de potencia en Chile requiere convencer a la población de que éstos existen y de que efectivamente se llevará adelante un programa seguro, eficiente y sustentable. Evidentemente, el paso previo a convencer a la ciudadanía de lo anterior es disponer efectivamente de las capacidades y los recursos.

Lo anterior sugiere que la decisión de embarcarse en el camino para la construcción de una primera planta nuclear, como forma de prepararse para llevar adelante un PNP no es acertada. La decisión que se revela más adecuada es la de iniciar las inversiones necesarias para estar preparado para contar con núcleo-electricidad oportunamente, si llegase a requerirse¹⁵³.

Llevar a cabo todas las inversiones necesarias en infraestructura para cerrar las brechas existentes requiere tiempo y recursos. Existe incertidumbre sobre los alcances de estos requerimientos; en particular, existe incertidumbre respecto al tiempo que tomará preparar la infraestructura y respecto al tiempo disponible para hacerlo (esto último depende de la fecha “óptima” de puesta en marcha de la primera planta nuclear). En consecuencia, los plazos son ajustados. Respecto a los recursos involucrados, si bien se desconoce con claridad su magnitud, se puede reconocer que mientras no se lleve a cabo las inversiones principales en infraestructura física, estas serán relativamente acotadas.

Si bien cerrar las brechas detectadas para desarrollar un programa nuclear de potencia de manera segura implica tiempo y recursos, este gasto se puede asimilar a la compra de un seguro ante un futuro energético incierto. En el caso que se verifiquen los escenarios energéticos más probables, se trata de un seguro que, como se ha visto, trae beneficios en eficiencia, seguridad y sustentabilidad ambiental.

Este seguro es particularmente conveniente pues no sólo permite estar en condiciones de integrar la energía nuclear a la matriz eléctrica en el momento y de la forma necesaria, sino que además lo permite a un costo directo relativamente bajo¹⁵⁴. Adicionalmente, aún en el caso que la decisión final no implique continuar con la construcción de una central nuclear, la mayor parte de estos gastos son beneficiosos para el país pues representan inversiones de largo plazo (como, por ejemplo, contar con mejor información geológica sobre nuestro territorio; tener un órgano regulador independiente y recursos humanos avanzados en esta materia).

¹⁵³ En esta opción, el país no está obligado, finalmente, a incorporar la energía nuclear a la matriz; sólo debe estar preparado para hacerlo en caso que ésta se requiera para su desarrollo

¹⁵⁴ Los costos importantes comienzan con la construcción de los reactores

En síntesis, comenzar el trabajo de cierre de brechas aparece hoy como un imperativo ineludible. Se deben cerrar las brechas tecnológicas, institucionales y de conocimiento fundamentales tales como completar la información geológica disponible, modificar la actual institucionalidad legal y regulatoria en materia nuclear, implementar un plan para cubrir las necesidades de recursos humanos y finalizar otros estudios complementarios específicos.

En paralelo, se requiere establecer un programa de educación y difusión nacional sobre las distintas opciones energéticas del país y el rol que puede cumplir la energía nuclear. De ese modo, se facilitará un debate público informado y responsable sobre los desafíos energéticos que enfrentará el país, se permitirá a la ciudadanía conocer y comprender el progreso en el cierre de brechas y, de ese modo, llegado el caso en que las condiciones que hacen necesaria la energía nuclear se materialicen, se podrá contar con el apoyo ciudadano necesario.

Referencias

- Agencia Internacional de Energía, AIE (2008). *Energy Technology Perspectives*.
- Agencia Internacional de Energía, AIE (2009a). *World Energy Outlook 2009*.
- Agencia Internacional de Energía, AIE (2009b): *How the energy sector can deliver on a climate agreement in Copenhagen*.
- Agencia Internacional de Energía, AIE (2009c): *Chile, Revisión de Política Energética 2009*.
- AMEC-CADE (2009), Estudio de Opciones de Ciclo de Combustible Nuclear.
- Argonne National Laboratory, ANL (2002): *Technology Review*.
- Colegio de Ingenieros de Chile A.G. (2009): *Programa de Desarrollo de Centrales Nucleares en Chile 2009-2030*.
- Comisión Chilena de Energía Nuclear - ENDESA, CCHEN - ENDESA (1975): *Antecedentes y Proposiciones a las autoridades de Gobierno para la toma de decisión de centrales núcleo-eléctricas al servicio del país*.
- Comisión Nacional de Energía, CNE (1979): *Factibilidad económica de una central nuclear en el sistema interconectado*.
- Comisión Nacional de Energía, CNE (2009): *Informe Precio de Nudo (octubre 2009)*.
- Comisión Nacional de Energía Atómica, CNEA (2006): *Reactivación de la actividad nuclear en Argentina (agosto 2006)*.
- Corporación Nuclear Eléctrica (2009): *Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo-Eléctrica*.
- Departamento de Geología de la Universidad de Chile (2009): *Caracterización de riesgos de naturales para el desarrollo de un programa núcleo-eléctrico en Chile*.
- Fundación Facultad de Derecho, Universidad de Chile - Barros & Errázuriz Abogados, U. de Chile - B & E (2010): *Estudio Requerimientos de Adecuaciones de Marco Legal ante la Eventual Incorporación de la Energía Nuclear de Potencia*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (2008): *IPCC Fourth Assessment Report*.
- Lovelock, J. (2004): *Nuclear power is the only green solution*, *The Independent*, May 24, 2004.
- Lovelock, J. (2007): *La Venganza de la Tierra (por qué la Tierra está rebelándose y como podemos todavía salvar a la humanidad)*.
- Massachusetts Institute of Technology, MIT (2009): *Technology Review*.
- MZConsulting (en elaboración): *Informe Preliminar del Estudio "Identificación y Evaluación de Costos de Implementación de Energía Nuclear en Chile"*.
- Organismo de Seguridad Radiológica y Nuclear de Finlandia, STUK (2009): *Marco Regulador Nuclear: Experiencia Internacional*.
- Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA (2002a): *Energía nucleoelectrica y desarrollo sostenible, Mantenimiento y aumento del patrimonio para las futuras generaciones*. Colección de Información del OIEA.
- Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA (2002b): *Heavy Water Reactors: Status and Projected Development*,

Technical Report Series.

Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA (2003): *Spent fuel performance assessment and research*. TEC-DOC.

Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA (2005): *Country Nuclear Fuel Cycle Profiles, Second Edition*, Technical Report Series.

Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA (2006): *Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience*. Radiological Assessment Reports Series.

Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA (2007): *Milestones in the development of a national infrastructure for nuclear power*. Nuclear Energy Series.

Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA (2008): *Power Reactor Information System (december 2008)*.

Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA (2009a): *2nd Follow-Up IAEA Mission in Relation to the Findings and Lessons Learned from the 16 July 2007 Earthquake at Kashiwazaki-Kariwa NPP*, Mission Report, January 2009.

Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA (2009b): *IAEA Expert Mission to Support the Self-Assessment of Chile's National Nuclear Infrastructure, End-of-mission Report, December 2009*.

Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA (2010): *Power Reactor Information System (february 2010)*.

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, OCDE (2005): *The Safety of the Nuclear Fuel Cycle*.

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, OCDE, (2007): *Risks and Benefits of Nuclear Energy*.

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico - Agencia de Energía Nuclear, OCDE-NEA (2009): *Nuclear Energy in Perspective (December 2009)*.

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico - Agencia de Energía Nuclear / Organismo Internacional de Energía Atómica, OCDE-NEA / OIEA (2008): *Uranium 2007: Resources, Production and Demand*.

Organización Mundial de la Salud, OMS (2006): *Health Effects of the Chernobyl Accident and Special Health Care Programmes, Report of the UN Chernobyl Forum*.

Programa de Gestión y Economía Ambiental - Universidad de Chile, PROGEA - U. de Chile (2009): *Carga del modelo de proyección de demanda energética global: MAED*.

Sociedad Española de Ornitología, SEO (2008): *Directrices para la evaluación del impacto de los parques eólicos en aves y murciélagos*.

Stern, N. (2006): *Stern Review on the Economics of Climate Change*.

SYSTEP Ingeniería y Diseños, SYSTEP (2009): *Análisis y Propuesta de Regulación Núcleo-Eléctrica*.

The Chernobyl Forum (2006): *Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts*.

Thompson, G. (2008): *Risk of operating Candu-6 Nuclear Power Plants*.

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.*

Tokman, M. (2008): *Política Energética: Nuevos Lineamientos. Transformando la crisis energética en una oportunidad.* Comisión Nacional de Energía, CNE.

Universidad Adolfo Ibáñez - SENES, UAI-SENES (2008): *Roles del Estado y del Sector Privado en la Generación Nuclear: Experiencia Internacional Aplicable a Chile.*

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR (2000): *Exposures and effects of the Chernobyl accident.*

U.S. Nuclear Regulatory Commission, NRC (2001): *Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report.*

U.S. Nuclear Regulatory Commission, NRC (2005): *Standard Review Plan for Review of License Renewal Applications for Nuclear Power Plants.*