

**GRUPO DE TRABAJO EN NÚCLEO-ELECTRICIDAD**

**LA OPCIÓN NÚCLEO-ELÉCTRICA EN CHILE**

**INFORME**

**Septiembre 2007**



## **Grupo de Trabajo en Núcleo-Electricidad**

### **Integrantes**

Ingrid Antonijević Hahn  
Ricardo Baeza Rodríguez  
Carolina Echeverría Moya  
Claudio Gambardella Casanova  
Pío Infante Montt  
Alejandro Jadresić Marinović  
Alejandro Jofré Cáceres  
Andrés Stutzin Schottlander  
Claudio Tenreiro Leiva

### **Presidente**

Jorge Zanelli Iglesias

### **Secretario Ejecutivo**

Cristián Martínez Silva

### **Asistente de Documentación y Edición**

Gabriel Mora Pérez



## **PRESENTACIÓN**

El 13 de marzo de este año, S. E. la Presidenta de la República, Dra. Michelle Bachelet Jeria, oficializó la formación del Grupo de Trabajo en Núcleo-Electricidad mediante el Decreto N° 49 de 2007 del Ministerio de Minería. A este grupo, integrado por 10 profesionales de distintas especialidades, se le encomendó la misión de asesorar al Gobierno “en la evaluación de los estudios tendientes a la identificación de oportunidades, ventajas, desafíos y riesgos que involucraría el uso de la energía nuclear para la producción de electricidad en nuestro país, dentro del marco de los tratados internacionales que rigen la materia.” (Artículo 1° Decreto N° 49 de 2007).

Al momento de su nombramiento, cada uno de los miembros del grupo manifestó no tener vínculos de interés con sectores que pudiesen verse beneficiados o perjudicados por la introducción de la opción nuclear, ni tener una opinión previamente formada sobre la conveniencia o inconveniencia de ello. Aunque recibió el apoyo institucional del Ministerio de Minería y de la Comisión Nacional de Energía, el grupo trabajó en forma autónoma e independiente del Gobierno.

Este informe recoge la opinión consensuada que, honesta y lealmente, pudo formarse el grupo a través del análisis libre e independiente de toda la información que tuvo a su alcance. Para la elaboración de este documento, el grupo se basó en entrevistas con representantes de distintos órganos de la administración del Estado relacionados con energía, medio ambiente, energía nuclear, salud y radioprotección, relaciones internacionales, defensa, incluido un encuentro con el Senado de la República. Se realizaron reuniones con especialistas nacionales y extranjeros en energía nuclear, planificación eléctrica, regulación, y con operadores de plantas de generación núcleo-eléctrica (**GNE**).

Asimismo, se recogió la visión de la sociedad civil, el mundo empresarial, el académico y de representantes de movimientos ambientalistas. Por último, se realizaron varias visitas en que miembros del grupo se entrevistaron con personeros de distintos gobiernos, encargados de la regulación y del seguimiento de la actividad núcleo-eléctrica en el mundo.

### **Qué no pretende este informe**

Este informe no pretende dar un veredicto final sobre la conveniencia de la opción de GNE para Chile, sino más bien documentar la información que refleja el conocimiento mundial sobre la GNE, así como revisar ciertos aspectos pertinentes de la realidad chilena. No obstante, a partir de esta información es posible recomendar la adopción de algunas medidas necesarias para avanzar en la discusión del problema, entre las que se destaca una serie de estudios a realizar. Dichos estudios se refieren a aspectos territoriales, ambientales, institucionales, normativos, económicos y sociales de nuestro país.

La conclusión sobre la conveniencia o no de la opción núcleo-eléctrica debería ser el resultado de un examen de los antecedentes que recaben los estudios que deben realizarse en los próximos años. Corresponderá a la sociedad chilena en su momento tomar la decisión.

**Santiago, septiembre 2007**



## ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN .....	1
2	EL MERCADO ELÉCTRICO Y LA NÚCLEO-ELECTRICIDAD .....	5
2.1	Consideraciones sobre el análisis económico .....	5
2.2	El sistema eléctrico chileno.....	5
2.2.1	Características generales.....	5
2.2.2	Tipo de mercado y papel del Estado .....	6
2.2.3	Oferta y demanda proyectadas .....	7
2.3	Aspectos económicos de la núcleo-electricidad .....	10
2.3.1	El mercado del combustible nuclear .....	11
2.3.2	Efectos de la incorporación de la GNE en la matriz eléctrica. ....	11
3	TECNOLOGÍA DE REACTORES NUCLEARES .....	13
3.1	¿Qué es la generación núcleo-eléctrica? .....	13
3.2	Reactores nucleares.....	13
3.2.1	Reactores convencionales.....	13
3.2.2	Reactores evolutivos actualmente disponibles .....	14
3.2.3	Reactores avanzados o innovativos .....	14
3.3	Combustible nuclear .....	15
3.4	Aspectos económicos.....	16
3.5	Desechos nucleares .....	17
4	INCIDENTES Y ACCIDENTES NUCLEARES .....	19
4.1	Accidentes nucleares.....	19
4.1.1	Three Mile Island (TMI).....	19
4.1.2	Chernobyl .....	20
4.1.3	Lecciones aprendidas.....	20
4.2	Incidentes nucleares .....	21
4.2.1	Vandellos.....	21
4.2.2	Kashiwazaki Kariwa.....	21
5	OPINIÓN PÚBLICA .....	23
6	MEDIO AMBIENTE Y TERRITORIO .....	25
6.1	Lo ambiental .....	25
6.1.1	Riesgo de incidentes y accidentes y sus potenciales efectos ambientales. .	25
6.1.2	Calentamiento global.....	25
6.1.3	Residuos nucleares .....	26
6.2	La núcleo-electricidad en un país sísmico .....	27
6.3	Impactos ambientales.....	28
6.4	Lo territorial.....	30
7	EFFECTOS DE LA GNE SOBRE LA SALUD HUMANA.....	33
7.1	Efectos de las radiaciones ionizantes sobre la salud.....	33
7.2	Efectos de la GNE sobre la salud humana en operación normal y en casos de accidentes nucleares .....	34
7.3	Respuesta de la autoridad ante una emergencia radiológica .....	35
8	DEFENSA NACIONAL: LA ENERGÍA COMO ELEMENTO ESTRATÉGICO .....	37
8.1	Autonomía energética.....	37
8.2	Correlación entre matriz energética y seguridad nacional .....	38
9	RECURSOS HUMANOS .....	41
10	PAPEL DEL ESTADO E INSTITUCIONALIDAD.....	43
11	EXPERIENCIA INTERNACIONAL Y CONCLUSIONES .....	45
12	RECOMENDACIONES .....	49
12.1	Recomendaciones generales .....	49
12.2	Estudios.....	49

## AGRADECIMIENTOS

ANEXO: Decreto N° 49 de 2007, Ministerio de Minería.

## 1 INTRODUCCIÓN

La energía proveniente de fuentes tradicionales está mostrando signos crecientes de agotamiento relativo. Las llamadas energías de origen fósil se han encarecido en forma muy significativa y la mayoría de los expertos coincide en que los precios se mantendrán en niveles muy superiores a los que sustentaron el desarrollo industrial de los siglos XIX y XX.

Aunque el futuro es incierto por definición, no se requieren estudios muy acabados para constatar que una parte significativa de países está creciendo de manera muy acelerada y que la oferta de los insumos que sustentan ese crecimiento, dentro de los cuales sobresale la energía, no ha podido seguir ese ritmo. Destacan especialmente China e India por su impresionante tamaño demográfico, y porque su acelerado crecimiento está generando una presión alcista en muchos de los llamados *commodities*. Más aún, dado el rezago de las economías emergentes y el amplio espacio que tienen para crecer, hace que sea relativamente sencillo predecir que la escasez de estos productos esenciales se mantendrá.

Los sucesivos récords que está batiendo el precio del petróleo son el síntoma de este agotamiento de la energía de base fósil y, a la vez, la causa del renacimiento del tema energético como una preocupación mundial. Con fuerza creciente se instalan en el debate de todo el orbe, tópicos como las energías renovables no convencionales (**ERNC**), la eficiencia energética y también la energía nuclear. Ninguno de estos temas es nuevo y de una u otra manera han estado presentes desde hace tiempo en la preocupación de casi todos los países del mundo, con mayor claridad posiblemente desde la primera crisis del petróleo en 1973. Sin embargo, asistimos a una intensificación de la problemática energética y Chile no escapa a esta realidad. Por el contrario, nuestro país atraviesa por una estrechez de oferta de energía eléctrica que ha hecho más patente este debate.

El calentamiento global incorpora un elemento adicional en este contexto, el que se agrega al agotamiento de los combustibles fósiles. En efecto, ya no es sólo la cantidad de fuentes de energía, sino que también importa la calidad de las mismas. En este sentido, el escenario del desafío energético suma una presión más a la escasez y el alza de precios.

La evidencia empírica que surge de la simple observación de lo adoptado, sobre todo por países más desarrollados, sugiere que nos aventuramos hacia un futuro pluri-energético, donde la solución provendrá de fuentes diversas de energía, de mejoramientos en las distintas tecnologías para su uso y aprovechamiento, y en una aplicación más eficiente de la misma, consistente con la importancia vital que tiene este insumo para las sociedades modernas.

Dentro de este panorama complejo y preocupante, ninguna opción razonable, capaz de mitigar o revertir los problemas que nos incumben, puede ser descartada. Por otra parte, la seriedad y urgencia de la situación exigen un escrupuloso análisis en que todos los efectos -positivos y negativos- de cada opción, sean debidamente ponderados y contrastados. En este análisis, la energía nuclear aparece como una alternativa a considerar, cuyos costos y beneficios deben ser cuidadosamente analizados, a fin de saber si el país debería incluirla entre las componentes de su matriz energética futura.

La experiencia internacional muestra que la energía nuclear correctamente manejada y administrada es una forma confiable y eficiente de producción eléctrica abundante a un costo competitivo y baja en emisiones de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, es evidente también que manejada inadecuadamente puede producir daños a la salud de quienes trabajan con ella y ocasionar desastres ambientales considerables con grave riesgo para la población general.

El punto crucial es que la núcleo-electricidad no es como cualquier otra forma de generar electricidad, y tiene especificidades que la hacen distinta a las otras fuentes. Entre otras peculiaridades establece compromisos a largo plazo que el país debe asumir consciente y responsablemente, requiere de un papel del Estado distinto al actual, y exige la aplicación de una tecnología compleja.

Los peligros objetivos de la energía nuclear se originan en el uso del combustible nuclear, material altamente radiactivo, capaz de causar graves daños al medio ambiente y a las personas en caso de ser directamente expuestas. Además de esto, el combustible nuclear luego de ser utilizado en un reactor debe ser retirado y almacenado en un lugar seguro, pues sigue siendo radiactivo por miles de años. Por último, el hecho de que los reactores funcionen en torno a un punto crítico, significa que los parámetros de funcionamiento normal, como temperatura, presión o flujos de vapor, tienen valores cercanos al umbral en que se produciría una reacción en cadena explosiva. Esto hace imprescindible una enorme robustez estructural del reactor, que permita garantizar un control muy fino de esos parámetros, a pesar de las condiciones extremas en que se opera durante largos períodos.

Estos tres tipos de problemas -la utilización de sustancias radiactivas, el manejo de los desechos y la operación en régimen cercano al punto crítico-, representan desafíos tecnológicos formidables por su complejidad y alto grado de exigencia.

Aparte de los desafíos tecnológicos y operativos, hay otros derivados de la posibilidad de utilización del combustible nuclear con fines bélicos y terroristas. Esto tiene implicancias para las relaciones internacionales, incluida la obligación del Estado de Chile de cumplir un papel de garante que no existe en relación a otras actividades industriales, con la posible excepción de la producción de armas.

Mientras para las ERNC la eficiencia energética y el desarrollo de tecnologías que disminuyan las emisiones, es suficiente un enfoque tradicional de tipo sectorial o multi-sectorial, la energía nuclear desafía a la sociedad en su conjunto. Subirse o no al “tren nuclear” es una decisión que no le corresponde exclusivamente a un Ministerio, a una autoridad sectorial o a un equipo económico, sino a la sociedad en su totalidad. Tampoco la respuesta que se produzca debe plantearse sobre la base de su aceptación o negación pura y simple. Debe entenderse que tanto la respuesta negativa como la afirmativa se basan en supuestos y condiciones que marcan un derrotero de estudio y revisión. Sólo así se garantiza que la decisión que se tome, cualquiera que esta sea, considerará los costos involucrados y los compromisos que se adquieren como Estado.

Los cambios de era van siempre acompañados de crisis en todos los planos de la sociedad y en la vida de las personas. En momentos de crisis, acciones minúsculas suelen tener efectos gigantescos y por lo tanto las decisiones deben ser cuidadosamente tomadas, a fin de evitar que el remedio agrave la condición del paciente. Esto requiere evaluar racionalmente las virtudes y perjuicios potenciales de

cada acción para tener algún grado de confianza en las decisiones, y control sobre los procesos involucrados.

Por otra parte, el calor de una crisis suele generar presiones que son malas consejeras en la búsqueda de soluciones eficaces que, al ser miradas muchos años más tarde, sigan pareciendo correctas. Sería al mismo tiempo una falacia, un error conceptual y, posiblemente, la semilla de otra crisis tal vez peor dentro de algunos años, suponer que la solución a nuestros problemas energéticos a corto plazo requiere la puesta en marcha inmediata de un programa nuclear en Chile.

Por esta razón, nos encontramos en una situación afortunada, en que la evaluación de la opción nuclear puede realizarse con el tiempo, la seriedad y la prudencia necesarios, privilegiando el estudio acabado, sobre información basada en conocimiento y evitando dejarse llevar por mitos o urgencias de corto plazo que en nada se condicen con los tiempos que una decisión de esta envergadura exige.



## 2 EL MERCADO ELÉCTRICO Y LA NÚCLEO-ELECTRICIDAD

La energía es un elemento fundamental en la actividad económica, pues constituye un insumo de todos los procesos productivos; un bien de consumo esencial de la población, y un factor crítico para el desarrollo humano y la competitividad de las empresas. Consecuentemente, el desarrollo futuro de un país y su inserción en la economía mundial depende de que se cuente con adecuados suministros de energía.

### 2.1 Consideraciones sobre el análisis económico

Una condición básica de un análisis económico que involucre la núcleo-electricidad es que debe hacerse a largo plazo, al menos 30-40 años. Esto necesariamente exige la inclusión en el análisis de los cambios que pueden producirse en las tecnologías de generación (particularmente aquellas que hoy conocemos como no convencionales), en los costos relativos, en la demanda y en las reservas de las diferentes materias primas para la producción de energía.

Un segundo requerimiento derivado del anterior es que, además del manejo de la incertidumbre inherente a los factores antes mencionados, se debe agregar los eventuales cambios climáticos que podrían ser significativos en esta escala de tiempo. Por lo tanto, en el análisis económico se debe incluir un abanico de escenarios que tomen en cuenta estas variabilidades, especialmente en un país cuya producción hidroeléctrica es muy relevante.

Además, deben considerarse las señales económicas que introduce la núcleo-electricidad, dado que representa una perturbación de orden mayor en la matriz energética del país y su influencia en las inversiones a futuro es entonces relevante. Factores como barreras de entrada, incentivos y políticas explícitas con respecto a energías renovables no convencionales deben ser incluidos en este análisis.

Así, un análisis económico detallado del mercado de la generación de electricidad debe cubrir aspectos tales como la demanda; la oferta; la estructura y operación del mercado eléctrico y sus actores; el papel del Estado; los requerimientos de estabilidad; así como también los incentivos adecuados para motivar las inversiones oportunamente. En el caso específico de la GNE deben considerarse, además, temas como los recursos humanos; la investigación y desarrollo; la seguridad y el medio ambiente.

### 2.2 El sistema eléctrico chileno

#### 2.2.1 Características generales

En Chile existen cuatro sistemas eléctricos. El Sistema Interconectado del Norte Grande (**SING**), que cubre el territorio comprendido entre las ciudades de Arica y Antofagasta con un 29,12% de la capacidad instalada nacional; el Sistema Interconectado Central (**SIC**), que se extiende entre Taltal y Chiloé con un 70,09% de la capacidad instalada; el Sistema de Aysén que atiende el consumo de la Región XI con un 0,27% de la capacidad; y el Sistema de Magallanes, que abastece la Región XII con un 0,52% de la capacidad instalada en el país.

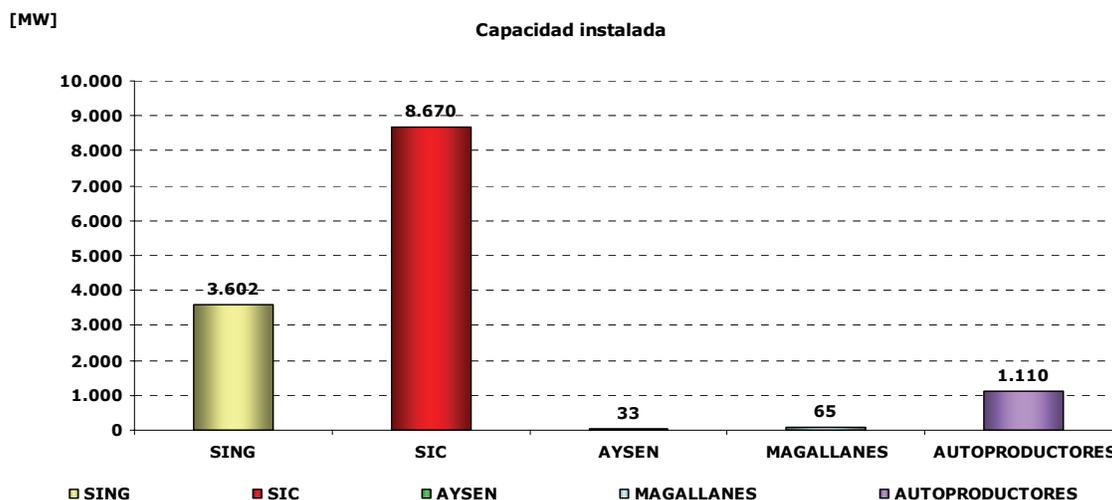
El SING cuenta con una capacidad instalada de 3.602 megawatts (**MW**) a diciembre de 2006. El parque generador es eminentemente termoeléctrico, constituido en un 99,6%

por centrales térmicas a carbón, fuel, diesel y de ciclo combinado a gas natural. Las unidades hidroeléctricas sólo representan un 0,4% de la capacidad instalada.

La capacidad instalada del SIC asciende a los 8.670MW a diciembre de 2006. El SIC es el principal sistema eléctrico del país, entregando suministro eléctrico a más del 90% de la población, y está constituido en un 55,2% por centrales hidráulicas de embalse y pasada, y en un 44,8% por centrales térmicas a carbón, fuel, diesel y de ciclo combinado a gas natural.

Aproximadamente, el 90% del consumo del SING está compuesto por grandes clientes, mineros e industriales, tipificados en la normativa legal como clientes no sometidos a regulación de precios. El resto del consumo, está concentrado en las empresas de distribución que abastecen los clientes sometidos a regulación de precios. A diferencia del SING, el SIC abastece un consumo destinado mayoritariamente a clientes regulados (aproximadamente 60% del total).

El Sistema de Aysén atiende el consumo eléctrico de la XI Región. Su capacidad instalada a diciembre del 2006 alcanza los 33MW, constituido en un 41,5% por centrales termoeléctricas y 58,5% hidroeléctrico. Finalmente, El Sistema de Magallanes está constituido por tres subsistemas eléctricos, el de Punta Arenas, el de Puerto Natales y el de Porvenir. La capacidad instalada de estos sistemas, a diciembre del año 2006 es 65MW, siendo 100% térmica.



Fuente: Balance Nacional de Energía 2006, Comisión Nacional de Energía, 2007.

### 2.2.2 Tipo de mercado y papel del Estado

De acuerdo a la política económica vigente, nuestro país ha optado por permitir que sea esencialmente el mercado el que asigne los recursos, vía precios, libre o reguladamente, según el mercado del que se trate.

Desde el punto de vista funcional, el mercado eléctrico está compuesto por operadores los cuales se agrupan en torno a tres actividades claramente diferenciadas: generación, transmisión y distribución. Se trata de un mercado regulado con el objeto de garantizar el suministro seguro de energía eléctrica a los consumidores domiciliarios e industriales.

El mercado eléctrico opera regulado por la Comisión Nacional de Energía (**CNE**), que estima periódicamente un plan de obras indicativo -inversiones- que debe ir ajustando la oferta a la demanda esperada en un horizonte de mediano plazo y calcula los precios de nudo cada seis meses, a partir de los cuales se define un rango para los precios regulados. Por otra parte, las regulaciones son fiscalizadas por la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (**SEC**). De esta forma, el Estado participa en este mercado principalmente a través de estas dos instituciones.

En la normativa actual, un principio básico es que la generación, que si bien está regulada en términos del despacho, es un negocio privado y por tanto la decisión de inversión en una nueva planta de generación es tomada por el sector privado, considerando los respectivos análisis de rentabilidad en un plazo determinado.

Otro principio básico en la regulación actual es que siempre están generando las tecnologías con menor costo variable disponibles en cada período. En este tipo de sistemas, el momento adecuado para invertir en una nueva planta de generación puede verse alterado por un comportamiento estratégico del entrante que juegue a adelantar o retrasar la inversión para influir en las decisiones de inversiones planificadas. Es decir, una evaluación estándar de costo-beneficio no explica totalmente la inversión en un año específico.

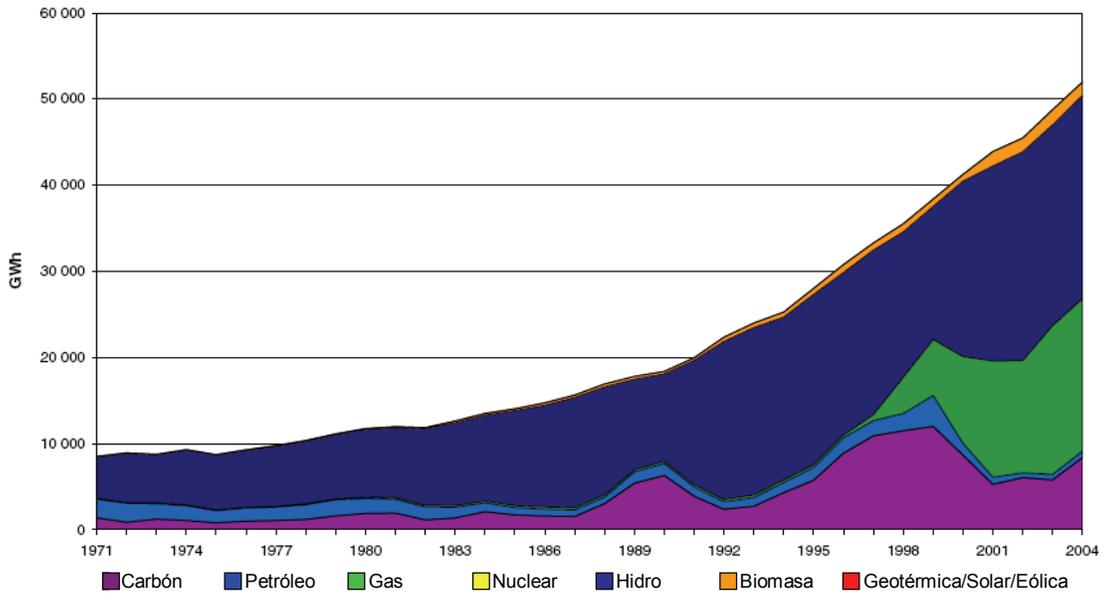
También en el sistema vigente se estipula que las transacciones de energía se desarrollan en dos mercados. El mercado *spot*, donde el precio del kW-hora es a costo marginal, es decir, al valor de la última central que entró a generar en el orden creciente de costos. Esto se aplica a cada sistema definido por su capacidad conectiva (transmisión), que en Chile son el SIC y el SING. Usualmente el menor costo de generación es el hidráulico, le sigue el gas natural, que se prevé irá siendo reemplazado en forma creciente por carbón, que es el tercer recurso, y posteriormente el diésel, siendo estos tres últimos combustibles fósiles. El precio *spot* es función de la demanda, en el período correspondiente y de las diferentes formas de generación disponibles en la matriz en ese lapso.

El otro mercado es el de los contratos, en el cual el precio surge de las fuerzas del mercado entre los concurrentes, actualmente y en el futuro, de acuerdo a la nueva ley de licitación (Ley 20.018, conocida como Ley Corta II). Más en el largo plazo, los precios serán afectados por el costo de desarrollo de las tecnologías más eficientes, junto con las restricciones medioambientales.

### 2.2.3 Oferta y demanda proyectadas

En los últimos 20 años, el consumo global de energía en Chile se ha expandido a una tasa anual en torno al 5,5%, levemente superior a la tasa de crecimiento de la economía. En el mismo período, el aumento anual promedio del consumo de energía eléctrica ha sido de un 7,5% aproximadamente. De acuerdo a estas tasas, el país ha debido duplicar su capacidad de suministro eléctrico aproximadamente cada 10 años, como se observa en el siguiente gráfico.

Evolución de la Generación Eléctrica por Fuente (1971 – 2004)



Fuente: Agencia Internacional de Energía (AIE)

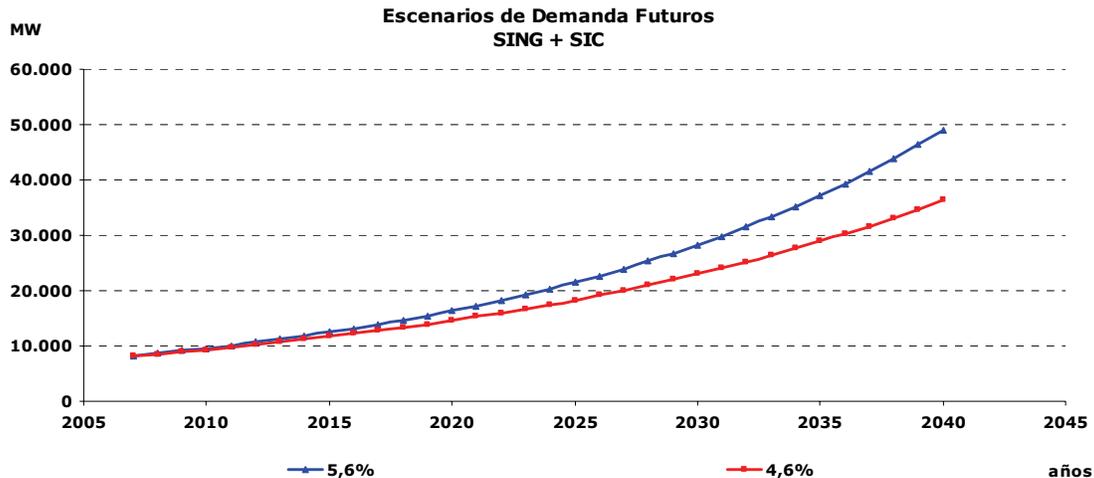
Respecto de la oferta eléctrica futura, las estimaciones de la Comisión Nacional de Energía indican que hacia el 2018, la capacidad instalada, actualmente de 13500MW, se incrementaría en aproximadamente 10.000MW. La composición por tipo de fuente muestra proyectos hidroeléctricos con capacidades acumuladas en torno a 1.100MW, la generación térmica aportaría cerca de 8.500MW, la generación geotérmica instalaría capacidad por cerca de 260MW y la generación eólica generaría aproximadamente 150MW adicionales.

El desglose por tipo de generador que se espera ingrese hacia el 2018 se muestra en la siguiente tabla.

Tipo de Central	Capacidad [MW]	Número de Proyectos
Carbón	4.269	16
Diesel	774	9
Eólica	148	6
Gas	3.370	9
Geotérmica	260	8
Hidroeléctrica	1.100	8
<b>Total Capacidad</b>	<b>9.645</b>	<b>56</b>

Fuente: Comisión Nacional de Energía

En un escenario conservador de crecimiento anual de un 4,6% en la demanda, los requerimientos de energía eléctrica se deberían duplicar hacia el 2023 y triplicar hacia el 2032. Si se supone que se mantendrá la tasa de crecimiento histórico de 5,6%, dichos plazos se reducen al 2021 y el 2028 respectivamente. En un escenario intermedio, considerando una tasa de aumento anual del 5% de la demanda energética, el país deberá duplicar su consumo hacia 2022 y triplicarlo hacia 2030.



Los requerimientos futuros podrán atenuarse si se incrementa la eficiencia en el uso de la energía eléctrica. Por otra parte, la experiencia internacional<sup>1</sup> indica que el consumo unitario de energía tiende a disminuir a medida que un país se desarrolla. Sin embargo, las carencias que aún se observan en el consumo energético de amplios segmentos de la población y la necesidad que tenemos de seguir creciendo, hace irrealista suponer que la demanda de energía no vaya a aumentar en forma sustantiva.

La satisfacción de las mayores necesidades se verá obstaculizada por las significativas carencias que Chile manifiesta en fuentes energéticas de bajo costo. Cabe señalar que en la actualidad sólo alrededor del 30% del consumo doméstico se satisface con fuentes propias. En el caso del suministro eléctrico, dicha proporción fluctúa en torno al 50%, dependiendo de la pluviometría.

Es probable que en el mediano plazo el petróleo y sus derivados mantengan una elevada participación en el consumo global, debido especialmente a su utilización en el transporte y calefacción. Esto ocurriría incluso si se mantienen los altos precios actuales o si se llegan a concretar iniciativas destinadas a desincentivar su uso, por ejemplo, mediante restricciones cuantitativas o impuestos a la emisión de CO<sub>2</sub>.

El gas natural licuado importado en buques desde distintos puntos de origen, podría constituir una alternativa interesante. No obstante, es probable que el alto costo relativo de este combustible y su elevada demanda en la economía mundial, limite sus aplicaciones en actividades muy intensivas en el uso de energía, como la generación eléctrica.

<sup>1</sup> World Energy Outlook 2006. International Energy Agency.

Por otra parte, en un escenario de creciente interconexión, los precios del gas natural deberían tender a los niveles de los mercados internacionales, más elevados que a los que tuvo acceso el país en el pasado.

El carbón importado es una fuente relativamente abundante que deberá seguir estando disponible a los consumidores nacionales. Podrá ser complementado además a menor escala por productores nacionales, especialmente si se reactiva la producción en Magallanes. Es probable que siga teniendo ventajas de costos en la generación eléctrica, pero no puede descartarse una dificultad creciente para ser utilizado, ya sea porque se implementen iniciativas destinadas a restringir las emisiones de CO<sub>2</sub>, o se haga más compleja la identificación de posibles localizaciones para plantas a carbón.

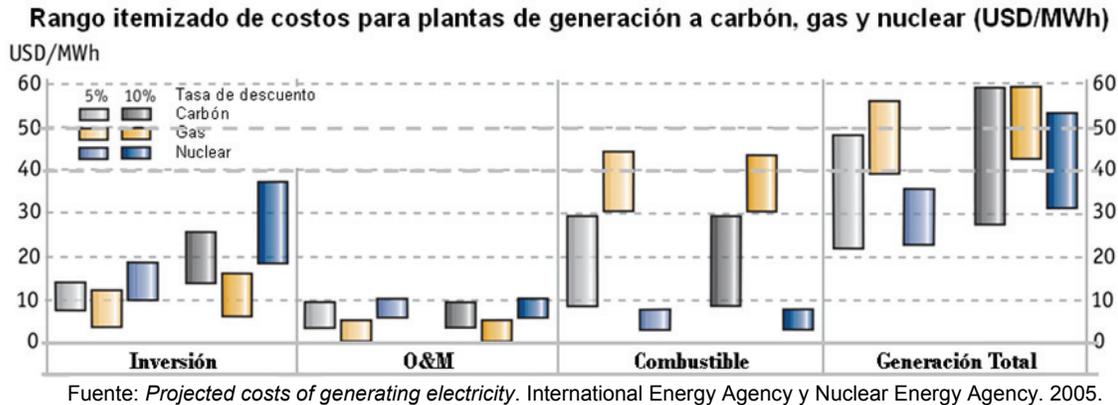
La hidroelectricidad debería seguir manteniendo su papel como principal fuente doméstica de energía, especialmente si se concretan los importantes proyectos que actualmente están en desarrollo. No obstante, su expansión se verá naturalmente limitada una vez que se termine de aprovechar las fuentes con mayor potencial energético, aquellas de menor costo o las más cercanas a los centros de consumo. Por otra parte, en un horizonte de largo plazo, no pueden descartarse cambios climáticos que afecten el aporte hidroeléctrico de las centrales existentes.

Las energías renovables no convencionales deberían jugar un papel de creciente importancia en la matriz energética, especialmente si se mantienen los elevados precios actuales de la energía o se implementan medidas destinadas a incentivarlas. No obstante, a menos que se produzca una innovación significativa en tecnología y costos, es poco probable que en el mediano plazo, aporten una fracción significativa de la generación eléctrica nacional.

### **2.3 Aspectos económicos de la núcleo-electricidad**

La evaluación de una inversión de este tipo debe considerar los costos directos e indirectos de la GNE, incluyendo construcción, operación, desmantelamiento, seguros, institucionalidad regulatoria e infraestructura requerida para su desarrollo. Dado que no hay experiencia núcleo-eléctrica en Chile, es necesario recurrir a la experiencia internacional.

Promediando datos de los países de la OECD, es posible comparar costos de inversión, operación y mantenimiento, combustible y costo total a distintas tasas de descuento. El siguiente gráfico muestra los costos comparativos y sus incidencias en el costo final de la electricidad.



### 2.3.1 El mercado del combustible nuclear

El componente principal del combustible de un reactor es el uranio natural, metal bastante abundante en la corteza terrestre, tanto como el estaño, el tungsteno o el molibdeno, y más abundante que el cadmio, el mercurio y la plata. Las principales reservas conocidas y comercialmente explotables llegan a unas 4.700 toneladas en el mundo y se encuentran principalmente en Australia (24%), Kazakstán (17%) y Canadá (9%). Chile también posee yacimientos de uranio que actualmente no se explotan.

La tasa actual de consumo mundial de uranio es del orden de 66.500ton/año, con lo que se estima que las reservas conocidas alcanzarían para unos 70 años<sup>2</sup>. El uranio es una fuente energética de bajo costo de reposición comparado con el estándar del petróleo. El costo del combustible en la GNE incide alrededor de un 12% del costo final de la energía<sup>3</sup>. Sin embargo, el aspecto más crítico del combustible nuclear no es la materia prima, sino la tecnología involucrada.

Tanto el mercado del uranio como el del combustible son altamente controlados por las grandes potencias. Los contratos de suministros no sólo son acuerdos entre el fabricante y el explotador de un RNP, sino además son materia de acuerdos políticos entre los países y están sometidos al escrutinio de la comunidad internacional.

### 2.3.2 Efectos de la incorporación de la GNE en la matriz eléctrica.

Bajo condiciones de eficiencia óptima, las centrales nucleares están diseñadas para operar en forma permanente, por lo tanto, en caso de incorporar la núcleo-electricidad sería necesario revisar el marco regulatorio actual para asegurar el despacho continuo de estas centrales en base. La núcleo-electricidad compartiría con la hidroelectricidad el segmento de energía de base de la matriz y podría reemplazar parte de la energía eléctrica proveniente de combustibles fósiles. En una matriz eléctrica diversificada, la núcleo-electricidad no compite con las ERNC, ni impacta, necesariamente, su desarrollo.

Una característica específica de la GNE es que, según la recomendación del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), cada reactor no puede tener una potencia superior al 10% de la red a la que está conectado. Esto se debe a la necesidad de

<sup>2</sup> <http://www.world-nuclear.org/info/inf75.html>

<sup>3</sup> *Projected costs of generating electricity*. International Energy Agency y Nuclear Energy Agency. 2005

garantizar la estabilidad de la red frente a una suspensión del suministro al reactor. En el caso de Chile, un RNP de 1.000MW no podría ser conectado hoy, a menos que se interconectaran el SIC y el SING.

No obstante que el marco regulatorio vigente ha permitido ser eficiente en la generación eléctrica, en que las decisiones de inversión son adoptadas por el sector privado en un ambiente competitivo, la GNE podría introducir factores que alteren los principios sobre los que descansa el modelo industrial eléctrico. Si bien el desarrollo de la núcleo-electricidad en el modelo actual sería materializado por inversionistas privados, ello no debe soslayar la necesidad de contar con normas que aseguren internalizar los objetivos sociales (protección del medio ambiente, seguridad nacional, salud humana, prevención del calentamiento global, etc.).

Por otra parte, en el ámbito de los seguros y garantías, se debe tener en cuenta que inicialmente los riesgos de desarrollar un proyecto núcleo-eléctrico pueden ser excesivos para un inversionista privado, dada la falta de experiencia en el país y los eventuales costos políticos involucrados, especialmente durante la fase de construcción e inicio de operación. Adicionalmente, es probable que se requiera la asignación de fondos estatales para el desarrollo de capital humano especializado y el desarrollo de proyectos de investigación pertinentes al tema núcleo-eléctrico.

Dado que los costos de una tecnología dependen de la escala de producción, en el caso de optar por incorporar la energía nuclear de forma paulatina, el análisis de costos relativos debe considerar escenarios suficientemente ricos para capturar toda la variabilidad. Es decir, es posible por ejemplo que en algunos escenarios de precios de combustibles fósiles altos junto con escenarios hidrológicos secos, la energía nuclear pudiese ser rentable desde un comienzo, incluso para escalas pequeñas. Por supuesto se debe considerar cuán probables son estos escenarios. Este punto es especialmente relevante cuando se busca tener un sistema que satisfaga la demanda futura y que sea robusto frente a las incertidumbres usuales.

El análisis de costos relativos entre las diferentes alternativas se torna más complejo cuando se incorporan nuevas exigencias ambientales, en concordancia con acuerdos firmados por Chile como el protocolo de Kyoto, entre otros. Así, por ejemplo, plantas de generación de electricidad basadas en tecnologías que utilicen el carbón como combustible podrían dejar de ser económicas de acuerdo a los nuevos estándares, al incluir el costo de producción limpia.

En un escenario caracterizado por los crecientes requerimientos de energía; las limitaciones en el aporte que pueden hacer las fuentes domésticas existentes; las eventuales restricciones o mayores costos asociados a fuentes que emiten gases de efecto invernadero; el mantenimiento de elevados precios internacionales y las desventajas de costos que aún tienen las energías renovables no convencionales para desplazar a las fuentes más tradicionales, la núcleo-electricidad surge como una opción de abastecimiento energético para Chile que debe ser evaluada.

### 3 TECNOLOGÍA DE REACTORES NUCLEARES

#### 3.1 ¿Qué es la generación núcleo-eléctrica?

La GNE es una tecnología que permite transformar la energía contenida en la materia nuclear, por ejemplo mediante la ruptura (fisión) de núcleos atómicos, en energía eléctrica. Un reactor donde esta transformación tiene lugar es, esencialmente, un calentador de agua que produce vapor con el cual se puede mover una turbina. En el núcleo del reactor, se encuentra el combustible sumergido en agua, la que sirve al mismo tiempo para moderar la energía de los neutrones emitidos por la reacción en cadena, y para transferir el calor a la turbina.

El generador eléctrico conectado a la turbina es de un tipo muy semejante al de una central termoeléctrica a carbón, gas natural, o petróleo. Esta tecnología ha sido desarrollada en los últimos 50 años, a partir del conocimiento de la física nuclear desarrollada en la primera mitad del siglo XX. En principio, un reactor es una fuente de calor industrial que puede ser utilizada en otros usos como la desalinización de agua o la producción de hidrógeno.

#### 3.2 Reactores nucleares

Más que mostrar un listado completo de nombres y características de reactores, interesa describir las grandes tendencias que reflejan lo que está disponible ahora y lo que se prevé estará disponible en los próximos 15 años. El desarrollo de la tecnología núcleo-eléctrica distingue tres tipos de reactores de potencia:

- Reactores convencionales;
- Reactores evolutivos;
- Reactores nucleares avanzados o innovadores.

##### 3.2.1 Reactores convencionales

La tecnología nuclear convencional se ha desarrollado en torno a modelos basados en el uso de agua natural con uranio ligeramente enriquecido con un 2% a 3% del isótopo  $^{235}\text{U}$ , que utilizan agua normal o liviana (LWR). También existen reactores que usan uranio natural y agua pesada<sup>4</sup> (HWR) como refrigerante y moderador.

La tecnología y economía han favorecido los diseños basados en el uso de agua liviana y son los modelos dominantes más recomendados que actualmente se encuentran disponibles de forma comercial. De entre los anteriores, los de agua liviana presurizada (PWR) son los que acumulan la mayor cantidad de horas de operación, y esto se traduce en una seguridad adicional que debe considerarse frente a modelos que si bien pueden incorporar nuevas tecnologías, no cuentan con la experiencia que entregan muchos años de operación. En segundo lugar se encuentran los reactores de agua en ebullición (BWR).

Los 50 años de desarrollo de tecnología núcleo-eléctrica desembocan en los tres modelos más difundidos actualmente: como ya se mencionó, los reactores de agua presurizada liviana PWR, los de agua hirviendo de baja presión BWR y hasta cierto

---

<sup>4</sup> Aquella en que el átomo de hidrógeno de la molécula de agua es reemplazado por un isótopo de deuterio o tritio.

punto los de agua pesada tipo CANDU. De las 434 unidades de generación en la actualidad, 252 son del tipo PWR, 92 del tipo BWR, 34 del tipo CANDU. Además, existen 15 de grafito y agua liviana tipo RBMK (como el de Chernobyl), y dos del tipo *Fast Breeders* de metal líquido, LMFBR. Adicionalmente, hay sobre 100 reactores nucleares PWR compactos utilizados en la propulsión naval. Lo anterior refleja una tendencia hacia el PWR como modelo dominante.

Respecto de la experiencia en Latinoamérica, en Argentina hay dos reactores en operación, Atucha I y Embalse, y un tercero en construcción (Atucha II). El reactor Atucha I es del tipo PHWR de 375MW, mientras que Embalse es del tipo CANDU y tiene una potencia de 648MW. Atucha II es del mismo tipo que el I, pero de 745MW y se espera que entre en operación hacia el año 2010.

En Brasil existen dos reactores en Angra dos Reis, Angra I y II, de tipo PWR, que entregan 657MW y 1.350MW, respectivamente. Un tercero en construcción, también de 1.350MW, se espera estará listo hacia el año 2013.

En México, hay dos reactores de tipo BWR de 690MW, Laguna Verde I y II en Veracruz, cuya potencia está siendo aumentada en 400MW.

### 3.2.2 Reactores evolutivos actualmente disponibles

En Rusia, Ucrania, Armenia, Bulgaria, China, República Checa, Finlandia, Eslovaquia y Hungría hay 49 unidades de diseño ruso VVER, de potencias entre 400 y 1.000MW funcionando. Estos reactores son de tipo PWR y a los últimos diseños se les ha incorporado sistemas de seguridad pasivos y alcanzan niveles de estándar internacional. Se encuentran ya disponibles el VVER-1000 y el VVER-1200, que compiten con el AP-1000 de Westinghouse (EEUU).

Corea del Sur desarrolló los KSNPP-1400, una versión modificada de los reactores de tipo PWR desarrollados en EEUU, con una potencia nominal de 1.400MW, diseño unificado que apunta a economía de escala (modelo único). Los costos de estas plantas superan largamente los 2.000 MUSD.

Otros modelos menos utilizados son los del tipo *Breeders*, de agua liviana o LWBR, basados en el torio como combustible ( $^{233}\text{U}$  como material fisible), ampliando la posibilidad de uso de combustible diferente al uranio (que se sustenta en el  $^{235}\text{U}$  como material fisible).

Los principales fabricantes de reactores en el mundo son FRAMATOM (Francia), Westinghouse-Toshiba (EEUU-Japón), GE-Mitsubishi (EEUU-Japón), Areva-Siemens-Hitachi (Francia-Alemania-Japón), ROSATOM (Federación Rusa) y otros consorcios que en realidad son asociaciones estratégicas de estos mismos actores.

### 3.2.3 Reactores avanzados o innovativos

La evolución en tecnología nuclear condujo a una nueva generación de reactores nucleares de potencia y cuyo diseño incluye dos avances fundamentales: 1) la incorporación de sistemas pasivos de seguridad que no dependan de controles activos; y, 2) alcanzar el menor tamaño posible así como su modularidad.

En los PWR hay cuatro modelos desarrollados con potencias entre los 320 a 600 MW/unidad, el AP-600 en EEUU; PIUS y SIR en Europa, y SPWR en Japón. Adicionalmente, están los modelos SMART de Corea del Sur con potencias entre 30 y 300 MW/unidad, y el CAREM en Argentina.

En Europa también se está desarrollando un modelo de reactor que usa como combustible una mezcla de óxidos, el EPR, que permite reciclar el plutonio generado en la fisión del uranio que se encuentra en el combustible gastado. Este modelo es una evolución de un PWR de 1600MW de 60 años de vida útil con un incremento razonable de eficiencia térmica.

Un desarrollo alternativo es el de los reactores refrigerados a gas (por ejemplo He), el HTGR y su versión modular MHTGR, con potencias del orden de 550MW. En el mismo ámbito están los reactores refrigerados por la técnica de metal líquido, ALMR, con gran capacidad de extracción de calor y cuyos diseños apuntan a 600MW/unidad. Una ventaja adicional de este tipo de reactor es la menor generación de desechos ricos en actínidos.

El Forum Gen-IV, al alero del OIEA, ha escogido seis diseños conceptuales como los más promisorios.

La respuesta de los operadores nucleares se ha centrado en la World Association of Nuclear Operators (WANO) que ha velado por el incremento sostenido en las normas de seguridad de operación, así como la vigilancia en el cumplimiento de los estándares propios de la industria. De manera análoga, la formación del personal se ha estandarizado mediante la World Nuclear University (WNU), ambos organismos bajo el auspicio del OIEA. Esto a su vez ha ayudado a reducir los tiempos de licenciamiento para operar las plantas, haciendo más fáciles también la regulación y fiscalización por parte de los gobiernos.

Lo más probable es que hacia la década 2020-2030, estén difundidos en el mercado los reactores avanzados de tercera generación, GEN III+. Estos serán cada vez más seguros y contarán la mayor experiencia mundial tanto en su construcción como en operación, contando con la más amplia red de apoyo técnico en cualquiera de sus fases de vida, desde su concepción y hasta su desmantelamiento y cierre.

### **3.3 Combustible nuclear**

El material fisionable que genera el calor en el reactor, comúnmente llamado combustible nuclear, está hecho de uranio con distintas concentraciones (enriquecimientos) del isótopo  $^{235}\text{U}$ . El uranio natural, compuesto mayoritariamente del isótopo  $^{238}\text{U}$  contiene alrededor del 0,7% de  $^{235}\text{U}$ .

El mercado del combustible para plantas nucleares está dominado por los pocos países que poseen la tecnología de enriquecimiento de uranio y la metalurgia necesaria para la fabricación de los elementos combustibles. Los países capaces de enriquecer uranio son: Argentina, China Estados Unidos, Francia, Holanda, Inglaterra, India, Japón, Sudáfrica y Rusia. Todos ellos, con excepción de Holanda y Sudáfrica también fabrican combustible. Otros países que fabrican combustible pero no enriquecen son Alemania, Bélgica, Brasil, Canadá, Corea del Sur, España, India, Italia, México, Suecia y Taiwán.

La mayoría de los países que cuentan con energía nuclear aspiran a dominar el ciclo completo del combustible, desde el enriquecimiento hasta el reproceso para extraer el uranio y el plutonio, que forman alrededor del 93% del combustible quemado. Este proceso de separación es permitido por la comunidad internacional sólo a algunos países para reducir el riesgo de proliferación. El OIEA sugiere que sean los mismos países proveedores del combustible original los que ofrezcan este servicio y que para la etapa siguiente se consideren soluciones regionales.

Una característica particular del combustible nuclear, debida a su alta densidad energética (gran potencial energético en poco volumen), es la de ofrecer una posibilidad de almacenamiento relativamente fácil para suministrar energía por muchos años<sup>5</sup>. Una consecuencia de esto es la posibilidad de almacenar el combustible nuclear requerido por una planta para muchos años, algo impracticable en el caso de una planta de carbón o petróleo.

### 3.4 Aspectos económicos

Según el informe de 2005 de la World Nuclear Association, a su vez basado en los informes IEA/OECD-NEA (2005), MIT (2003), DGEMP (2003), Tarjanne & Luostarinen (2003), The Royal Academy of Engineering UK (2004), University of Chicago (2004) y CERI (2004), se observa que el costo de generación núcleo-eléctrica ha mejorado con respecto a los combustibles fósiles en las últimas décadas. Uno de los factores de mayor incertidumbre en el precio continúa siendo el costo del dinero, por cuanto se trata de una inversión muy intensiva en capital y de retorno lento<sup>6</sup>.

Según dicho informe, y basándose en la experiencia en muchos países, *“Los costos marginales de la operación de plantas nucleares son bajos y los únicos que pueden superarlos son las formas de generación que no necesitan combustibles, como la hidroelectricidad o la eólica. En EEUU, los costos de producción promedio alcanzaban a 1,72 centavos de dólar por kWh en 2003, siendo los más bajos de cualquier otra tecnología de generación en el país. La tendencia ha sido fuertemente a la baja en términos reales desde mediados de los '80”*.

Con todo, la experiencia acumulada demuestra que las ventajas y desventajas son diferentes para cada país. El factor determinante en la mayoría de los casos es la competitividad de costos comparada con la de las formas alternativas de generación. Las plantas nucleares tienen una estructura de costos muy altos de construcción, pero relativamente bajos de operación.

La conclusión general señala que: *“En la actualidad, la competitividad económica de la energía nuclear puede ser claramente demostrada frente a las tecnologías alternativas de generación eléctrica. Con el paso de los años, se ha incrementado la producción de los reactores a través de aumentos en la capacidad y la optimización de los procesos. Se espera que la operación segura de los reactores se establezca por muchos años, siempre que sea respaldada por las inversiones que se requiera en mantenimiento y modernización. Estas mejoras son ya rutinarias y están integradas en el diseño de las plantas modernas”*<sup>7</sup>.

<sup>5</sup> El consumo de una planta nuclear de 1000MW en 1 año es aproximadamente 8 m<sup>3</sup> de uranio, la cantidad necesaria para alimentar una planta de carbón de igual potencia durante el mismo período es de 2.300.000 m<sup>3</sup>.

<sup>6</sup> World Nuclear Association, *Report 2005*. ([www.world-nuclear.org](http://www.world-nuclear.org))

<sup>7</sup> World Nuclear Association, *Ibid*.

### 3.5 Desechos nucleares

La GNE implica necesariamente el manejo del denominado ciclo de combustible, desde la extracción del uranio hasta su manejo al final de su vida útil. Durante todo este ciclo se producen residuos radiotóxicos que contienen elementos radiactivos, los cuales deben ser manejados correctamente a fin de evitar que generen un impacto, sea en la salud humana, el medio ambiente o ambos.

En la actualidad no existe una solución que garantice la segregación a perpetuidad de los desechos radiactivos y, por lo tanto, hasta cierto punto, hay una ambigüedad en el costo que esta parte del proceso significa para la producción de energía mediante reactores nucleares de potencia. Los organismos internacionales recomiendan, en primer lugar, la separación por grado de peligrosidad basados en la actividad de los mismos (alta-mediana-baja) así como la vida media<sup>8</sup>. Los desechos de elevada actividad por lo general son de vida media corta, y no representan un peligro significativo después de un período del orden de unas 10 vidas medias<sup>9</sup>, se almacenan por algunos años. Por el contrario, los desechos de vidas medias de miles de años son de baja radiactividad. Estos son reducidos de volumen e inmovilizados de manera segura, hasta que se decida su destino final en algún depósito definitivo.

El combustible quemado es un material que presenta una alta actividad radiológica, y hay diferentes aproximaciones en su manejo. Puede ser descartado como desecho, depositándolo en sitios geológicos estables y profundos, o bien ser reprocesado.

En la actualidad, el problema de los desechos es abordado desde dos direcciones: tratar de reducir la cantidad de desechos producidos y la eliminación de los mismos. Ambas estrategias están en continuo desarrollo, impulsando nuevas tecnologías de reactores que generen menor cantidad de desechos, como los de cuarta generación (Gen-IV). Por otra parte, se están desarrollando prototipos de sistemas para la eliminación (quema) de residuos nucleares por medio de la inducción de reacciones de transmutación, proceso en que se produce más energía al tiempo que se queman los desechos<sup>10</sup>. Se espera que esta tecnología esté disponible hacia la década del 2040, aunque los costos implicados son todavía difíciles de estimar.

No obstante lo anterior, hay que considerar que una planta nuclear comienza a generar desechos al cabo de 10 o 15 años de su puesta en marcha, y su volumen es muy bajo y fácilmente manejable. Estos desechos pasan una primera etapa de “enfriamiento” radiactivo en piscinas de agua en la misma planta, donde pueden permanecer por unos 10 a 20 años antes de ser destinados a un depósito definitivo. De esta manera, si Chile comenzara a operar un reactor de potencia hacia 2020, sus desechos sólo empezarían a ser procesados hacia 2040-2055. Para entonces es razonable suponer que existirán mejores soluciones para manejar estos residuos.

---

<sup>8</sup>Vida media es el tiempo que debe pasar para que la mitad de núcleos radiactivos de una muestra se desintegren decayendo en núcleos más estables. La vida media de una sustancia es inversamente proporcional a la probabilidad de desintegración de los núcleos y por lo tanto los elementos más radiactivos son en general los de vidas medias más cortas. Por lo general, un núcleo decae en otro que a su vez decae. Estas cadenas de decaimientos involucran múltiples isótopos de vidas medias muy diversas.

<sup>9</sup>Al cabo de 10 vidas medias el número de núcleos que aún no se han desintegrado es una milésima parte de la población original.

<sup>10</sup>Esta es una alternativa en estudio y es necesario aclarar que no todos los residuos pueden ser tratados de esta manera. Esto significa que la transmutación es, por ahora, una solución paliativa al problema y no definitiva.

Otro aspecto relacionado con la industria nuclear que no tiene paralelo en otras industrias de generación eléctrica, es el de considerar desde su planificación el desmantelamiento al final de la vida útil de las instalaciones (40-60 años). Esta operación incluye la remoción del material combustible y las partes del reactor expuestas a fuertes dosis de radiación que contienen material radiactivo; posteriormente debe limpiarse químicamente todas las estructuras de sustancias potencialmente radiactivas y finalmente puede considerarse también la demolición de los edificios.

Luego de 60 años de operación, el cierre y desmantelamiento de un reactor de 1.000MW, generaría 3.000m<sup>3</sup> de combustible quemado y residuos de alta actividad, 1.000m<sup>3</sup> de residuos de actividad intermedia, y unos 12.500m<sup>3</sup> de escombros y desechos de baja actividad. El costo de esta operación es de un 4% al 5% del costo total de la planta, y es por lo general financiado por los operadores a través de una tasa de cierre que debe pagarse a lo largo de la vida del reactor. En muchos países hay un organismo central que se encarga de administrar el fondo de cierre.

## 4 INCIDENTES Y ACCIDENTES NUCLEARES

En 1989, el OIEA en conjunto con la Agencia de Energía Nuclear de la OECD, diseñaron la Escala Internacional de Eventos Nucleares (INES)<sup>11</sup> como una manera de estandarizar la comunicación al público de la gravedad de los eventos reportados en las instalaciones nucleares. Esta escala distingue siete niveles: los de menor gravedad (niveles inferiores 1, 2 y 3) son denominados “incidentes”, mientras que los niveles superiores (4-7) se califican como “accidentes”. Eventos que no comprometen a la seguridad se clasifican bajo 0 y se denominan “desviaciones” o bien “fuera de escala”.

Cada uno de los eventos nucleares que ocurren en los países miembros de Naciones Unidas se reportan al OIEA, donde se analizan y se extraen lecciones que luego son compartidas con la comunidad internacional. Esto ha contribuido sustancialmente a mejorar la tecnología, dando lugar a reactores cada vez más seguros, así como a mejorar las prácticas de operación, sistemas de evaluación y prevención de riesgos.

La posibilidad de ocurrencia de un accidente genera una sensación de inseguridad en la población que no corresponde a un análisis objetivo de riesgo relativo, lo cual a su vez afecta directamente el grado de aceptación de la tecnología nuclear. La existencia de esta escala ayuda a comparar la seriedad de cada evento reportado, al establecer un marco de comparación objetivo entre eventos.

### 4.1 Accidentes nucleares

Ejemplos de accidentes son los de Three Mile Island (EEUU, 1979; grado 5) y Chernobyl (URSS, 1986; grado 7).

#### 4.1.1 Three Mile Island (TMI)

El 28 de marzo de 1979, un reactor tipo PWR en la unidad 2 de la planta sufrió un accidente en el sistema de remoción de calor. Durante una operación rutinaria de limpieza de una línea de refrigeración, la información proveniente de dos válvulas y la que contaba el operador eran contradictorias. Este hecho provocó una cadena de malas maniobras por parte de los operadores por falta de información correcta, iniciándose la fusión del núcleo. Después de 13 horas se pudo restablecer la refrigeración del núcleo, a pesar de haberse producido un daño severo al núcleo del reactor.

La dosis de radiación liberada producto del accidente fue de entre 0,015 mSv y 0,83 mSv<sup>12</sup>, no se produjeron víctimas fatales y nadie recibió una dosis de radiación que comprometiera la salud. Desde esta perspectiva, este accidente no revistió impacto importante al medio ambiente, pues no aportó cantidades de elementos radiactivos al medio capaces de alterar las condiciones naturales del entorno. Sin embargo, el impacto en la percepción pública y el costo financiero fueron considerables.

---

<sup>11</sup> The International Nuclear Event Scale (INES), IAEA, Vienna, 2001.

<sup>12</sup> Como comparación, la radiación de fondo natural corresponde a una dosis en torno a 0,01 mSv por día, una radiografía de tórax corresponde a 0,1mSv, y una angiografía cardíaca corresponde a dosis entre 6,7 y 13 mSv.

#### 4.1.2 Chernobyl

El 26 de abril de 1986 se efectuó una maniobra en la unidad 4 de la planta de Chernobyl con el objeto de probar el uso de una turbina auxiliar de generación eléctrica. Este reactor, un RBMK que utiliza grafito como moderador, era de una tecnología discontinuada cuyo diseño original estaba orientado a la producción de plutonio de uso militar. Además, no contaba con un edificio contenedor adecuado y presentaba fallas de diseño e inestabilidad al operar en baja potencia. Irónicamente, se suponía que la turbina auxiliar reforzaría la seguridad del reactor.

Normalmente este reactor funcionaba a 3.200MW térmicos (**MWt**) y se le bajó al rango de 700MWt, sin embargo por errores de operación junto con la desactivación intencional de todas las medidas de seguridad, la remoción de barras de control y bloqueo de las señales de corte, la potencia descendió bruscamente a 30MWt. En el intento de restablecer la potencia a unos 200MWt, ésta aumentó a 100 veces la potencia máxima de diseño en cuatro segundos y las oscilaciones siguientes elevaron a 500 veces esta potencia. Esto causó una explosión del núcleo del reactor, expulsando grandes cantidades de material radiactivo y causando un incendio de grandes proporciones.

Como resultado de la explosión inicial, dos trabajadores murieron. En los tres meses siguientes a la explosión, esta cifra aumentó a 30 (entre bomberos y trabajadores de limpieza de emergencia) debido al síndrome de irradiación aguda (SAR). Se produjeron, además, unos 1.800 casos comprobados de cáncer de tiroides entre personas que al momento del accidente eran menores de 14 años. No obstante, una evaluación detallada de todos los efectos sobre la salud de la población expuesta es difícil de establecer<sup>13</sup>.

Este accidente fue causado por un conjunto de malas decisiones y violaciones a normas de seguridad, lo cual mostró la necesidad de contar con un control riguroso de los operadores. Esto ocurrió en gran medida por tratarse de una instalación fuera del control de los organismos internacionales.

#### 4.1.3 Lecciones aprendidas

El accidente de TMI demostró la necesidad de contar con sistemas de información y control redundantes. Además quedó de manifiesto la importancia de mejorar la calidad de sus componentes y el nivel de entrenamiento de los operadores para responder ante una emergencia.

El accidente de Chernobyl evidenció dramáticamente la obligación de respetar las normas de seguridad y el peligro que encierra el secretismo en la operación de plantas nucleares fuera del control del OIEA.

Estos accidentes mostraron la conveniencia de mejorar los sistemas de seguridad, especialmente los que actúan independientemente de los operadores (de tipo pasivo), y que permiten la refrigeración del núcleo a todo evento. Asimismo, se ha visto que es necesario el relicenciamiento anual de operadores.

---

<sup>13</sup> Para avanzar en el análisis de los efectos sanitarios, ambientales y socio-económicos, en 2003 se creó el Chernobyl Forum, iniciativa del OIEA y el auspicio de una decena de organismos internacionales y los gobiernos de Bielorrusia, Rusia y Ucrania.

Véase, [www.iaea.org/ Publications/Booklets/Chernobyl/chernobyl.pdf](http://www.iaea.org/Publications/Booklets/Chernobyl/chernobyl.pdf)

La experiencia acumulada también exhibe la necesidad de la realización permanente de estudios de análisis de riesgo, incluyendo los análisis determinístico-probabilísticos.

## **4.2 Incidentes nucleares**

### **4.2.1 Vandellos**

Un ejemplo de incidente nuclear lo provee el de Vandellos (España, 1989; grado 3). En ese caso se trataba de un reactor moderado por grafito y enfriado con dióxido de carbono. El evento en cuestión en este caso no liberó material radiactivo ni permitió la emisión de radiación desde el interior, pero un incendio produjo daño en los sistemas de seguridad que comprometieron significativamente la operación segura del reactor.

### **4.2.2 Kashiwazaki Kariwa**

El 16 de julio pasado se produjo un evento nuclear a raíz de un terremoto en el Oeste de Japón, que obligó a detener la planta de Kashiwazaki Kariwa en la costa occidental de ese país. Una misión del OIEA inspeccionó la planta y en su informe se establece que a pesar de que el terremoto excedió significativamente el nivel de sismicidad esperado según el diseño de la planta, ésta respondió de forma segura durante y después del terremoto. En respuesta al sismo, la planta apagó los cuatro reactores en actividad en ese momento y sólo se produjo una pequeña fuga de agua que estaba en contacto con material radiactivo en la piscina de enfriamiento del combustible quemado. El informe estima que la cantidad de líquido dispersado en el ambiente presentaría una radiactividad muy por debajo del límite autorizado para la exposición al público en condiciones normales de operación.

Existe otra lista de accidentes e incidentes nucleares asociados a instalaciones relativas al ciclo del combustible, como el de Tokai-Mura, Japón, en 1999, con tres trabajadores expuestos. El de Tomsk, Rusia, en 1994, produjo un número indeterminado de trabajadores expuestos (alrededor de 160). En Tsuruga, Japón, en 1981 hubo alrededor de 100 trabajadores irradiados al límite máximo permitido.



## 5 OPINIÓN PÚBLICA

El tema núcleo-eléctrico está instalándose con fuerza en el abanico de tópicos relevantes de interés ciudadano en Chile. Su posicionamiento se explica principalmente por la coyuntura energética que atraviesa el país y las proyecciones que se hacen, en el contexto de las restricciones del gas desde Argentina y los impactos en el suministro y en los precios.

En el último tiempo, distintos actores nacionales tales como parlamentarios, partidos políticos, grupos ambientalistas y empresarios se han manifestado públicamente respecto de la opción núcleo-eléctrica. Por otra parte, se han realizado seminarios convocados por academias, colegios profesionales, centros de estudios asociados a partidos políticos, cuyo eje central ha sido el tema energético, y que han incluido la energía núcleo-eléctrica.

Si bien es cierto que la opinión pública siempre está influida por la percepción y la subjetividad, esta situación es particularmente notoria en el caso de la energía nuclear. La eventual implementación de un programa de GNE constituye un punto sensible para la opinión pública, sensibilidad que deriva básicamente de los riesgos (objetivos y subjetivos) que estas instalaciones implican para el medio ambiente y la salud de las personas.

El temor acerca de los impactos de un accidente radiactivo y los potenciales efectos no deseados por la disposición final de los residuos es real y merece ser considerado como una variable relevante en el análisis. En el colectivo están las imágenes que asocian lo nuclear a la bomba de Hiroshima y con el accidente de Chernobyl, como asimismo la idea de que los residuos son un problema inmanejable y una “herencia negativa” para las generaciones que vienen. Como se analizó al abordar el tema de los accidentes, el riesgo asociado a la energía nuclear es real, por lo que la preocupación pública no puede ser minimizada por su naturaleza poco informada o subjetiva.

La aceptación de riesgo nuclear representa un problema para la sociedad. En el campo de la medicina nuclear este riesgo es aceptado, porque se compensa con los beneficios estimados. Esto, sin embargo, rara vez sucede con la energía nuclear de potencia. Para que la sociedad acepte la GNE se requiere de un esfuerzo permanente de comunicación y transparencia (especialmente respecto de accidentes e incidentes), y de una autoridad fiscalizadora de los operadores que sea fuerte e independiente<sup>14</sup>.

Para entender este fenómeno sociológico (la actitud hacia el riesgo y su dimensión subjetiva) vale recordar que “el desagrado asociado con una pérdida es mayor que el placer asociado a una ganancia de dimensión similar. Esto porque los individuos tienden a sobreestimar las probabilidades muy bajas y subestimar las probabilidades medianas y grandes. Lo normal es que las personas tiendan a sobreestimar la probabilidad de ocurrencia de un desastre, la que es de hecho muy baja para el caso de un reactor. Las ganancias y las pérdidas, tanto en términos relativos como absolutos, son evaluadas de manera asimétrica”<sup>15</sup>.

---

<sup>14</sup> Commissariat à l'énergie atomique, *Nuclear energy of the future: what research for which objectives?* A monograph of the Nuclear Energy Directorate.

<sup>15</sup> Franco Romerio, *Nuclear energy, an option for sustainable development?* University Center for the Study of Energy Problems, CUEPE, University of Geneva (2005).

Confirma lo anterior el hecho de que el uso de combustibles fósiles, que también produce riesgos serios al ecosistema y a la salud de la población por emisiones de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, de partículas, incluso radiactivas, no genera sensación de riesgo ni provoca rechazo ciudadano. Aún más, el carácter “limpio” de la energía nuclear de potencia no parece motivar al público a preferir esta opción<sup>16</sup>.

Grupos ambientalistas han reaccionado frente a este debate, reafirmando su oposición a la núcleo-electricidad, recalcando, entre otras cosas, la necesidad de considerar el balance energético global y el ciclo completo de generación al momento de las comparaciones entre formas de producción de electricidad. La disposición final de los residuos y la relación entre energía nuclear de potencia y armamentismo son también motivo de preocupación.

Desde el mundo empresarial, las opiniones han estado situadas en el problema de la seguridad de suministro energético y su impacto en las actividades económicas, particularmente en el SING.

Más allá de las mencionadas intervenciones de estos actores sociales, y de escasos y puntuales estudios y sondeos de opinión, lo cierto es que en Chile existe escasa información científicamente válida sobre la sensibilidad ciudadana o estudios de opinión sistemáticos respecto del contexto energético nacional ya descrito o de la opción nuclear para el país.

Considerando la importancia de la aceptación pública en una materia como ésta, lo cual queda confirmado por el papel que le asigna el OIEA en el proceso de adopción de la núcleo-electricidad, es fundamental disponer de información actualizada y válida sobre la opinión ciudadana para el análisis integral del proceso y la toma de decisiones. Se hace indispensable, por tanto, diseñar e implementar un sistema de seguimiento de opinión pública en materia energética, y nuclear en particular.

Independiente de si el país opta por transitar el camino hacia la núcleo-electricidad, la confianza en la decisión tomada y su aceptación pública sólo serán posibles si se actúa de manera informada, con transparencia, con participación de expertos independientes y abierto a opiniones diversas de la academia y de la sociedad civil.<sup>17</sup>

---

<sup>16</sup> Franco Romerio, *ibid.*

<sup>17</sup> Franco Romerio, *ibid.*

## 6 MEDIO AMBIENTE Y TERRITORIO

### 6.1 Lo ambiental

Los temas ambientales que aparecen como relevantes en relación con la núcleo-electricidad son: los riesgos de incidentes y accidentes y sus potenciales efectos ambientales (básicamente radiación ionizante y contaminación radiactiva), el calentamiento global, el manejo de los residuos nucleares (transporte, disposición transitoria y final), y los riesgos naturales (sísmico, volcánico, tsunami, derrumbes).

#### 6.1.1 Riesgo de incidentes y accidentes y sus potenciales efectos ambientales

Ciertamente la mayor preocupación ambiental surge por la posibilidad de contaminación por radiación ionizante, a raíz de un accidente en cualquiera de las fases del proceso (enriquecimiento, transporte, uso, disposición final). En el caso de la núcleo-electricidad, el componente del ambiente en riesgo es la población, lo que obliga a ser especialmente rigurosos en el ámbito de la seguridad. Esto marca una diferencia con lo que normalmente ocurre con mega-proyectos de generación eléctrica, donde la preocupación se centra en componentes ambientales como el aire, la flora, la fauna o el agua.

La experiencia internacional de más de 50 años de uso de la núcleo-electricidad presenta un historial de muy baja tasa de accidentes en la industria, con un accidente de radiación serio cada 50 años (Chernobyl)<sup>18</sup>, lo que representa una ocurrencia media de aproximadamente un accidente grave por reactor cada 10.000 años. Por otra parte, estudios de ciclo completo realizados en el Reino Unido entre 1972 y 1992<sup>19</sup> que comparan los fallecimientos por accidentes (normalizada por TW/año de producción de electricidad) entre algunas fuentes primarias de producción de energía (carbón, gas natural, hidráulica y nuclear), muestran que la GNE exhibe el número más bajo (8) y la industria eléctrica del carbón el más alto (342). Aún así, y como toda obra humana, la núcleo-electricidad está sujeta a que alguna vez las cosas no salgan como estaban planificadas, ya sea por negligencia, por acto de terceros (terrorismo) o por actos de la naturaleza.

#### 6.1.2 Calentamiento global

En el concierto internacional existe un amplio consenso respecto del carácter *limpio* de la núcleo-electricidad en comparación con las formas dominantes de generación (carbón, gas, petróleo)<sup>20</sup>. Esta característica no es irrelevante, toda vez que uno de los impactos ambientales más significativos derivados de la generación eléctrica es la producción de gases de efecto invernadero (**GEI**) y, consecuentemente, sobre procesos tales como el calentamiento global de la atmósfera.

---

<sup>18</sup> *The future of nuclear power*. MIT. 2003.

<sup>19</sup> Ball, Roberts & Simpson, Research Report #20, Centre for Environmental & Risk Management, University of East Anglia, 1994; Hirschberg et al, Paul Scherrer Institut, 1996; in: IAEA, *Sustainable Development and Nuclear Power*, 1997; *Severe Accidents in the Energy Sector*, Paul Scherrer Institut, 2001).

<sup>20</sup> Las dudas se levantan respecto de si la condición de proceso *limpio* se mantiene al considerar el ciclo completo de la GNE, desde la minería del uranio hasta el desmantelamiento y disposición final de todos los componentes de la central. Si bien existe literatura internacional de estudios comparados de impactos ambientales globales y locales por tipo de formas de generación de electricidad, en Chile falta mucho por investigar. Dada la relevancia del tema, consideramos necesario estudiar, desde una perspectiva de *ciclo completo*, las ventajas y desventajas de cada forma de generación, como asimismo el rol de cada una en la configuración de una matriz sustentable económica y ambientalmente.

La creciente toma de conciencia del fenómeno de calentamiento global pone en realce y da valor a la *calidad ambiental* de los procesos de generación de energía y de toda actividad humana que ayude a reducir emisiones de GEI. Es razonable esperar que, tanto la comunidad internacional como el mercado, aumenten las presiones para reducir las emisiones de GEI o su captura y confinamiento<sup>21</sup>, estableciendo un escenario donde no dará lo mismo cómo se genere la electricidad.

En este contexto, la núcleo-electricidad, la hidroelectricidad y las ERNC tienen ciertas ventajas respecto del carbón y el petróleo, los grandes contribuyentes de CO<sub>2</sub>, y de otros gases de efecto invernadero. La tabla siguiente muestra el análisis de ciclo completo (LCA, Life Cycle Analysis, estándar ISO 14040) realizado por EDF (Energie de France). El resultado (cuarta columna) se expresa en gramos de CO<sub>2</sub> por kw-hora eléctrico.

### Contribución relativa de varias fuentes de generación eléctrica a la producción de GEI

Sistema	Operación	Ciclo de vida restante	Total (g/kWhe)
Carbón 600 MW	892	111	1.003
<i>Fuel</i>	839	149	988
Gas (combustión a turbina)	844	68	912
Diésel	726	159	895
Bombeo Hidráulico	127	5	132
Fotovoltaica/Solar	0	97	97
Hidroeléctrica	0	5	5
Nuclear	0	5	5
Eólica	0	3	3

Fuente: Nuclear energy of the future: what research for which objectives? Commissariat à l'énergie atomique.

Como se puede observar, no es totalmente correcto afirmar que la energía nuclear, hidráulica o eólica no producen GEI, porque la construcción de plantas para usar este tipo de fuente primaria de energía requiere de, por ejemplo, concreto y acero, cuya producción genera GEI. No obstante lo anterior, su contribución respecto de las fuentes primarias fósiles es verdaderamente marginal.

#### 6.1.3 Residuos nucleares

Uno de los aspectos más relevantes del proceso de generación de núcleo-electricidad está referido al manejo de los residuos radiactivos, el que debe cautelar condiciones adecuadas para la disposición transitoria y final de material nuclear o contaminado (combustible usado, plantas desmanteladas, ropa y elementos contaminados, agua de lavado). Esto es particularmente sensible en el caso de los residuos de alta radiación. Es un hecho que el manejo de residuos nucleares de este tipo a perpetuidad es un problema no resuelto por la industria nuclear a nivel mundial.

De acuerdo a la más reciente tecnología en materia de disposición intermedia y final de

<sup>21</sup> Tecnología no económicamente viable en la actualidad.

residuos nucleares<sup>22</sup>, sería posible asegurar, con un horizonte de tiempo de hasta 10.000 años, que los residuos no entrarán en contacto con el medio ambiente y por lo tanto no contaminarán. La discusión técnica y ética continúa respecto de si 10.000 años son suficiente garantía para un potencial de contaminación de millones de años. La puesta en práctica de soluciones tecnológicas, como la disposición geológica a perpetuidad, está aún pendiente, y debe terminar de convencer a la comunidad científica internacional de los beneficios del manejo de estos residuos, en contraste con los riesgos asociados. Con todo, sigue siendo una realidad que la principal preocupación en torno a los residuos nucleares es su manejo previo a su secuestro en formaciones geológicas<sup>23</sup>.

Si bien en el caso de Chile un eventual manejo de residuos nucleares aparece como una preocupación del futuro lejano, es una materia que debe ser evaluada y prevista ahora. Al igual que en el caso de los sitios para emplazamiento de instalaciones nucleares de potencia, el Estado debe evaluar si el país está en condiciones, o puede llegar a estarlo, para hacerse cargo con el rigor que los estándares internacionales imponen para el manejo y la disposición de residuos nucleares. Una posibilidad de evitar el problema del manejo de los residuos en Chile la ofrece la iniciativa Global Nuclear Energy Partnership (GNET), impulsada por USA, China, Francia, Japón y Rusia y que ha sido firmada además por una decena de otros países. Según este acuerdo internacional las potencias proveedoras de combustible se encargarían del retiro del combustible quemado desde los países usuarios para su posterior reproceso y/o su disposición final en repositorios definitivos. De esta manera se resolvería para países como el nuestro el problema del manejo de residuos y se limita la posibilidad de proliferación nuclear.

Finalmente, en lo que se refiere al transporte de residuos nucleares, no hay registro a nivel mundial de accidentes con resultado de radiación ionizante, lo que no exime de la obligación de respetar la normativa que garantiza el transporte seguro de estos residuos.

## 6.2 La núcleo-electricidad en un país sísmico

Cuando se aborda el tema de la núcleo-electricidad en Chile, una interrogante surge inevitablemente: ¿Será recomendable instalar en Chile un reactor nuclear de potencia (**RNP**) con los antecedentes de ser uno de los países más sísmicos del planeta? O puesto de otra manera: ¿Podría una planta nuclear resistir un terremoto de gran intensidad?

Según expertos nacionales, el factor sísmico debe ser integrado en el análisis teniendo en consideración que:

- Chile es el país que libera mayor cantidad de energía por sismos a nivel mundial, con más del 40% de la energía sísmica en el último siglo. Si a lo anterior se agrega la cantidad e intensidad de sismos que ocurren permanentemente en el país, se puede concluir que Chile es el país más sísmico del planeta.
- No es posible determinar científicamente que existan ciclos sísmicos o periodicidad de eventos. De lo que sí hay certeza es de que el territorio nacional

<sup>22</sup> Por ejemplo los estándares del depósito en Yucca Mountain, Montana, EEUU.

<sup>23</sup> *The future of nuclear power*. MIT (2003).

- será afectado por terremotos en el futuro.
- La información sismológica disponible a nivel científico respecto del territorio nacional es insuficiente y se requiere ampliar la cobertura de la red sismológica nacional.
- A pesar del buen nivel de los expertos nacionales, las capacidades científicas y técnicas también son insuficientes.
- Sin embargo, la falta de información sobre riesgo sísmico no debiera ser obstáculo, toda vez que la determinación del riesgo sísmico para instalar un RNP debe hacerse a nivel de sitio potencial, para lo cual existen en Chile la tecnología y la capacidad profesional. Es a partir de estos resultados a nivel de sitio que se diseña la solución de ingeniería.
- La tecnología e ingeniería antisísmica en Chile pueden garantizar niveles aceptables de seguridad para un reactor nuclear de potencia. En otras palabras, es razonable suponer que el riesgo sísmico puede ser controlado con soluciones tecnológicas actualmente disponibles. No obstante lo anterior, la experiencia internacional muestra que es imprescindible, antes de decidir la localización de un reactor nuclear de potencia, disponer de estudios detallados de geología y de mecánica de suelos en relación con la sismicidad del sitio.
- Hay regiones del mundo en que frecuentemente se producen terremotos, incluso más destructivos que en Chile, y aún así tienen plantas nucleares. Por ejemplo, en California, Estados Unidos, donde se registran aceleraciones superficiales horizontales mayores que las observadas en Chile. En ese Estado existen dos plantas con dos reactores nucleares cada una, en operación desde hace 25 años. En consecuencia, la norma de resistencia a aceleraciones de las obras civiles en Chile no necesitaría exceder a la norma de California.
- Finalmente, los sismos, en tanto riesgo natural, deben ser considerados en conjunto con otros riesgos naturales, tales como tsunamis, volcanismo y remoción en masa.

### **6.3 Impactos ambientales**

Si excluimos el impacto térmico global y los riesgos para la salud de la población ante un accidente nuclear, los impactos ambientales de la construcción, operación y desmantelamiento de un RNP se acotan considerablemente, concentrándose en aquellos efectos esperables sobre los demás componentes ambientales en los diferentes niveles territoriales. En este escenario, cabe preguntarse cuáles son los impactos ambientales que genera una planta núcleo-eléctrica.

Los impactos ambientales asociados a la construcción, operación y desmantelamiento de una planta núcleo-eléctrica se manifiestan en tres niveles: impactos a nivel de sitio (emplazamiento de la planta), a nivel de área de influencia regional, y a nivel planetario o global, que ya fueron comentados.

Los impactos a nivel de sitio dependen fuertemente de las características del lugar de emplazamiento, particularmente de la vulnerabilidad de los componentes ambientales y su condición basal. La gran mayoría de los impactos al sitio se generan en la fase de construcción de la planta y no difieren mayormente de cualquier otro proyecto industrial de esta envergadura. Normalmente estos impactos son mitigables, transitorios y de baja significancia en relación a la envergadura del proyecto.

Durante la operación de una planta núcleo-eléctrica, los impactos más relevantes son por contaminación termal local, tanto del aire (emisiones) como del agua (refrigeración).

La experiencia indica que, localizadas en el lugar adecuado y operadas correctamente, las instalaciones nucleares de potencia generan impactos ambientales menores a nivel de sitio y su entorno inmediato.

La contaminación térmica local de cuerpos de agua es uno de los impactos esperables en un RNP, ya que se requiere de grandes volúmenes de agua para enfriamiento. En una planta tipo de 1.000 MW, la operación calienta en 10° C aproximadamente 28,3m<sup>3</sup>/s. Esta contaminación térmica afecta los ecosistemas acuáticos, modificándolos de manera significativa, pero focalizada. Los efectos se harán sentir en los hábitos de alimentación y reproducción de organismos, niveles de oxígeno presente, tasas de descomposición, etc. Tanto al entrar en operación la planta como al cierre, se produce un cambio drástico y repentino de temperatura del cuerpo receptor, lo que afecta principalmente a la fauna acuática local. Sin perjuicio de lo anterior, hay que señalar que estos impactos por contaminación térmica local, acotados en su extensión, son conocidos en tanto existen experiencias muy variadas estudiadas a nivel mundial.

El área de influencia regional normalmente recibe impactos en los ámbitos social y económico. Desde esta perspectiva territorial, la instalación de un reactor nuclear de potencia puede generar impactos relevantes en la economía, en el sistema urbano, en la funcionalidad del territorio y hasta en la imagen regional. Con una adecuada planificación y gestión territorial, estos impactos debieran ser mayoritariamente positivos.

En lo que se refiere a los impactos potenciales del desmantelamiento de un reactor nuclear de potencia, estos son aún un punto de preocupación. Siendo consecuentes con el enfoque de *ciclo completo*, y en una perspectiva de largo plazo, debe darse una atención especial a los impactos propios del cierre y desmantelamiento de una instalación nuclear, materia sobre la cual existe amplia experiencia internacional y con éxito.

En total, se han cerrado de manera definitiva por fin de su vida útil 107 reactores. En los últimos 12 años, se han cerrado 32 reactores en el mundo<sup>24</sup>. Basados en esta experiencia, la Comisión Europea ha estimado que el desmantelamiento de una planta tipo o promedio se generan aproximadamente 10.000 m<sup>3</sup> de material radiactivo, siendo la mayor parte de este material concreto y escombros que contienen muy baja radiactividad<sup>25</sup>.

De lo que no cabe duda es que tanto la adopción como la exclusión de la nucleoelectricidad provocan impactos ambientales. Si el país opta por incorporar la GNE en su matriz energética, ciertos impactos se derivarán de la construcción y operación de las centrales. Si se opta por lo contrario, excluyendo la opción nuclear, otras formas de generación de electricidad deberán emplearse, las que a su vez impactan el ambiente a su manera.

En este contexto, y como un antecedente relevante en el análisis de la opción nucleoelectrica, es necesario estudiar los impactos ambientales que ocasiona la opción nuclear, conocer los impactos ambientales que provocan las otras alternativas de

---

<sup>24</sup> Los Mitos de la Energía Nuclear. [www.greenpeace.org](http://www.greenpeace.org)

<sup>25</sup> Commissariat à l'énergie atomique, *op.cit.*

generación y confrontar sus ventajas y desventajas de manera objetiva e informada<sup>26</sup>.

#### 6.4 Lo territorial

En el análisis de la opción nuclear, los aspectos territoriales que merecen especial atención son la aptitud geográfica (definición del **dónde** para la instalación de un RNP) y los impactos territoriales estructurales, cruzados ambos por un contexto institucional y legal que es tema en sí mismo.

Una de las primeras interrogantes que surge en el ámbito de lo territorial es *si existen condiciones geográficas en Chile para instalar un RNP y dónde*. En una primera aproximación, es razonable señalar que la diversidad geográfica del país, su extenso litoral y la existencia de grandes territorios con muy baja densidad de población aparecen como condiciones favorables para el emplazamiento de un RNP, al tiempo que las características sísmicas del territorio y el riesgo de tsunamis son claramente limitantes serias, pero no insalvables.

Para llegar a responder adecuadamente esta interrogante se requiere al menos conocer a nivel nacional los lugares que aparecen como aptos para la instalación de un RNP. En Chile existen las capacidades profesionales y científicas para responder la interrogante del dónde, como también hay experiencias mundiales que pueden ser estudiadas. El OIEA tiene procedimientos establecidos y otorga apoyo en materia de localización de plantas núcleo-eléctricas.

Por otra parte, se requiere disponer de instrumentos legales y de una institucionalidad sobre ordenamiento territorial acorde con lo delicado del tema: En materia de localización de inversiones en Chile, rigen las decisiones del emprendedor (generalmente un privado), debiendo éste cumplir con la legislación sectorial aplicable. En el actual escenario institucional y legal, el Estado no tiene mayor injerencia en la decisión respecto del “dónde”<sup>27</sup>, y sólo puede velar que se cumpla con la normativa sectorial vigente.

Una de las herramientas para responder adecuadamente a la interrogante debieran ser los Planes de Ordenamiento Territorial, diseñados a nivel de comuna o provincia. Sin embargo, estos instrumentos de planificación territorial tienen sólo carácter indicativo, y no obligan legalmente. En síntesis, *el escenario institucional y legal en lo territorial no es propicio para tomar decisiones acertadas en materia de localización de infraestructura compleja*.

En este contexto, no resulta exagerado señalar que *la institucionalidad ambiental y territorial requiere de profundas adecuaciones para abordar científica y técnicamente la tarea de normar y fiscalizar en el tema de la localización y operación de un eventual reactor nuclear de potencia*. En una materia tan relevante y sensible como la instalación de un reactor nuclear de potencia, se requiere de un rol más decisivo del Estado en la definición de la localización.

Sin perjuicio de las capacidades científicas y técnicas existentes en el país y de los posibles apoyos externos con que se contará, hay ciertas áreas de conocimiento que

<sup>26</sup> El análisis debe abarcar los tres niveles; de sitio, de área de influencia directa y global. Debe definirse en cada caso (tipo de fuente), el ciclo de generación de impactos (inicio y término). Debe compararse proyectos de generación de tamaño similar (capacidad instalada).

<sup>27</sup> Con excepción del ámbito urbano, regulado por PRC.

requieren de mayor desarrollo para aportar significativamente en decisiones de este nivel, no sólo en el caso de la núcleo-electricidad, sino que de todos los mega-proyectos estratégicos, tanto productivos como de infraestructura.

Finalmente, es necesario conocer los impactos territoriales estructurales que se derivan de la instalación de un RNP. Tal como ocurre con cualquier mega-proyecto industrial, la construcción, operación y desmantelamiento de un RNP conlleva acciones y procesos que, por su magnitud y naturaleza, necesariamente generan cambios relevantes en el territorio donde se emplace. Los impactos, tanto positivos como negativos, dependerán, entre otros factores, de las especificidades naturales del lugar, de la infraestructura preexistente, de los procesos económicos imperantes, de la institucionalidad vigente y de las sensibilidades e intereses de sus habitantes.



## 7 EFECTOS DE LA GNE SOBRE LA SALUD HUMANA

La GNE, y en general toda actividad que involucre uso y manipulación de material radiactivo, importa un riesgo potencial para la salud humana. Para entender el alcance de estos riesgos, es conveniente distinguir entre la operación normal de un reactor y las situaciones de accidentes nucleares.

### 7.1 Efectos de las radiaciones ionizantes sobre la salud

Se ha establecido que, en lo que respecta a la salud humana, los tipos más importantes de radiaciones son las ionizantes. Si una radiación ionizante penetra en un tejido vivo, los iones producidos pueden afectar a los procesos biológicos normales. Por consiguiente, el contacto con cualquiera de los tipos habituales de radiación ionizante ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , rayos X y neutrones) puede tener repercusiones sobre la salud. Se sabe también que el efecto depende del tipo y radiación y la dosis. Por ejemplo, la radiación  $\gamma$  sólo provoca lesiones en puntos concretos, de forma que el tejido puede soportarlo razonablemente bien e incluso reparar las lesiones causadas. Por el contrario, una partícula  $\alpha$ , pesada y relativamente grande, provoca grandes daños en un área pequeña y es más perjudicial para el tejido vivo. En términos generales, dosis menores que  $0,1\text{Sv}^{28}$  no generan ninguna respuesta clínica. Por otra parte, una dosis de  $4\text{Sv}$  corresponde a la dosis letal media (dosis por la cual el 50% de los individuos irradiados muere).

Desde una perspectiva operacional, también es posible distinguir los efectos de la radiación entre determinísticos y estocásticos (o probabilísticos). Los efectos determinísticos son aquellos en que la severidad depende de la dosis recibida y para los cuales existe un umbral definido, como por ejemplo, las cataratas inducidas por radiación. Por otra parte, los efectos estocásticos son aquellos que ocurren al azar, generalmente sin un umbral de dosis conocido y cuya probabilidad es proporcional a la dosis y su severidad es independiente de ésta. Las alteraciones genéticas y el desarrollo de cánceres constituyen los efectos estocásticos más importantes de las radiaciones.

Dentro de los efectos determinísticos más relevantes está el síndrome de irradiación aguda, que corresponde a una combinación de síndromes clínicos (principalmente hematopoyético, respiratorio, gastrointestinal y neurovascular), que ocurren escaladamente desde horas a semanas luego de una exposición a radiaciones ionizantes. Este síndrome corresponde a la situación más grave y se registra en accidentes mayores. A modo de ilustración, en el accidente nuclear de Chernobyl, en 1986, 237 personas fueron hospitalizadas con el diagnóstico de sobreexposición ( $>0.1\text{Gy}^{29}$ ). De estos, 134 desarrollaron RSA (57%) y 28 pacientes de este último grupo fallecieron<sup>30</sup>.

Respecto de los efectos estocásticos, el más significativo es la participación de la radiación ionizante en el desarrollo de procesos cancerígenos, en particular cáncer de tiroides (por efecto sobre genes supresores) y leucemias (efecto sobre oncogenes).

<sup>28</sup> El *sievert* (Sv) es una unidad para dosis de radiación absorbida por la materia orgánica. Un Sv equivale a 1 Joule/kg de radiación absorbida.

<sup>29</sup> El *gray* (Gy) es una unidad que mide la dosis absorbida de radiaciones ionizantes por un determinado material.

<sup>30</sup> IAEA, *Acute Radiation Syndrome, clinical picture, diagnosis and treatment*, Module XI.

Diversas investigaciones sobre los mecanismos que pueden explicar una relación causa-efecto entre radiaciones ionizantes y cáncer han permitido establecer la necesidad de considerar, por un lado, la cantidad y la calidad de la dosis recibida, y por otro lado, el tipo de tejido afectado junto a su capacidad de recuperación. Particularmente relevante es el papel de la radiación de bajo LET<sup>31</sup> (radiaciones con una baja densidad de ionizaciones por unidad de trayecto, tales como radiación X,  $\beta$ ,  $\gamma$  y partículas  $\alpha$ ) que puede actuar como iniciadora y promotora débil de procesos oncogénicos. El debate sobre los efectos de las radiaciones ionizantes, en particular aquellas de bajo LET y bajas dosis<sup>32</sup>, dista mucho de estar resuelto, ya que la investigación no ha podido establecer los mecanismos, ni los límites de dosis a partir de los cuales se desencadenan, dado el elevado número de factores que intervienen en el desarrollo de un proceso cancerígeno.

## **7.2 Efectos de la GNE sobre la salud humana en operación normal y en casos de accidentes nucleares**

Bajo los estándares internacionales de seguridad actualmente definidos, en los procesos de instalación, puesta en marcha, operación, manejo de los residuos radiactivos y desmantelamiento de una planta nuclear no se producen emisiones ionizantes constitutivas de riesgo para la salud humana. En efecto, al interior de una planta nuclear, los niveles registrados son equivalentes a la exposición a la radiación natural. Al respecto, debe recordarse que la radiación proveniente de rayos cósmicos que recibe una persona en promedio al año es del orden de 0,35 mSv. Por otra parte, un pasajero de un avión comercial recibe aproximadamente 0,05 mSv en un viaje transatlántico.

Las radiaciones ionizantes también están asociadas a formas de generación eléctrica no nucleares. Plantas generadoras a carbón, gas, petróleo y geotermales levantan material radiactivo de la corteza terrestre a la superficie. Según una estimación de la Environmental Protection Agency de E.E.U.U., una persona viviendo a 80 km o menos de una central a carbón recibe en promedio una dosis de 0,3  $\mu$ Sv, mientras que alguien dentro de ese radio de una planta nuclear recibe menos de un tercio de esa dosis. Ambas dosis son menos que la que recibe un norteamericano medio por radiografías, y menos de una 10 milésima parte de la que recibe por radiación natural de fondo. Para tener una idea, la dosis de radiación dentro de un radio de 80 km de un reactor es comparable con la que resulta de tener un detector doméstico de humo<sup>33</sup>.

Sin embargo, todos los procesos relacionados a la GNE están sujetos a eventos no deseados de magnitud e impactos variables para la salud humana. Estos eventos caracterizados y dimensionados según la escala INES establecida por el OIEA se discutieron en la sección 4.1.

En un accidente mayor (grado 7) como fue el de Chernobyl, la emisión de material puede generar efectos agudos sobre la salud, afectar un área extensa y con consecuencias ambientales de largo plazo. Un incidente serio (grado 4) como el ocurrido en Vandellos, España, en 1989, por lo general no requiere adoptar medidas fuera del sitio de la planta, pero puede afectar severamente la salud del personal de la planta.

<sup>31</sup> LET (*linear energy transfer*), permite definir la cantidad de energía depositada por unidad de trayecto.

<sup>32</sup> Se considera dosis bajas a exposiciones entre 0 y 100 mGy o a exposiciones menores de 0,1 mGy/min

<sup>33</sup> Véase, [http://www.iaea.org/blog/Infolog/?page\\_id=47](http://www.iaea.org/blog/Infolog/?page_id=47)

### **7.3 Respuesta de la autoridad ante una emergencia radiológica**

En Chile existe actualmente uso de fuentes radiactivas que pueden generar un evento que afecte la salud de la población. Las posibles fuentes son los reactores de investigación, equipos médicos y de la industria. Institucionalmente, la respuesta ante un evento de este tipo es de responsabilidad compartida entre la Comisión Chilena de Energía Nuclear y la Autoridad Sanitaria dependiente del Ministerio de Salud. Existe consenso entre los especialistas de que la capacidad actual de respuesta es limitada e insuficiente, particularmente debido a debilidades de los sistemas de fiscalización y de alerta temprana, como asimismo de regulación.



## 8 DEFENSA NACIONAL: LA ENERGÍA COMO ELEMENTO ESTRATÉGICO

La energía es un bien que incide directamente sobre el desarrollo. A su vez, el desarrollo de un país constituye un factor fundamental de la seguridad nacional, en tanto aporta estabilidad, cohesión social, y una mejor o peor posición estratégica. Luego, es posible afirmar que la energía es un producto estratégico, en tanto constituye un recurso cuya escasez compromete el cumplimiento de los objetivos que se derivan del interés nacional.

Desde luego, sabemos que la falta de energía no sólo compromete e incluso impide el desarrollo, sino que afecta también en buena medida la vida de la población. Adicionalmente, la escasez implica precios más altos y, por lo tanto, una menor competitividad de los productos dentro del mercado globalizado al cual Chile ha abierto, sin reservas, su economía.

Desde este punto de vista, no cabe duda que la energía ha de ser clasificada como recurso estratégico, vale decir, como un bien cuya disponibilidad compromete todo, sino el máximo, esfuerzo nacional.

Por otra parte, la forma de enfrentar el problema energético, establece la dependencia, la interdependencia y la relación entre Estados y la seguridad de mantener niveles de desarrollo económico y social en crecimiento.

El tema energético, hoy más claramente que ayer, está determinando en gran medida el orden internacional. La relación país productor, país exportador, país importador está marcando el poder de cada Estado y, como consecuencia, las relaciones inter Estados.

En este contexto, la dependencia de un país de un tipo de energía y por lo tanto la dependencia de un país productor u otro, puede constituir un factor de vulnerabilidad.

Frente a la dependencia y sin ser país productor se abren dos posibilidades básicas:

- 1.- La relación de interdependencia;
- 2.- Las de cooperación;

En conclusión, la energía es un tema de seguridad nacional, y su impacto en los grados fortaleza o vulnerabilidad debe ser evaluado de acuerdo a los niveles de autonomía y dependencia que se deriven de la matriz energética.

### 8.1 Autonomía energética

Se entiende por autonomía energética la *diversificación, con significativos porcentajes posibles de generación propia, y relaciones de interdependencia y/o cooperación -y no de dependencia- entre los Estados.*

A la luz de las experiencias internacionales, es posible plantear que existe una correlación entre niveles de generación propia, autonomía y grado de seguridad nacional.

Respecto de la diversificación, para los Estados importadores de energía, la diversificación de las fuentes generadoras constituye un objetivo esencial, ya no tan

sólo por sus efectos en el desarrollo, sino porque el disminuir la vulnerabilidad de la dependencia ha pasado a ser también un objetivo de seguridad.

Por su parte, los países exportadores de recursos energéticos tienen la oportunidad de establecer e influir en las relaciones de cooperación e integración regionales y fomentar su propio desarrollo y estabilidad.

Lo usual es entonces producir energía con insumos propios para satisfacer parte de la demanda nacional y recurrir al producto importado para satisfacer el resto. La proporción de uno y otro componente variará dependiendo de una serie de factores, tales como la disponibilidad de recursos hídricos, de hidrocarburos, las políticas nacionales que estimulen la generación eléctrica mediante fuentes no tradicionales (eólica, solar, mareomotriz, etc.), el aislamiento de ciertas regiones, la disponibilidad energética de países vecinos, y por cierto, los costos de producción y distribución, por citar los de mayor incidencia.

## **8.2 Correlación entre matriz energética y seguridad nacional**

Existe una relación entre la matriz energética de Chile y la política de defensa, cuyo principal objetivo es la seguridad nacional. Nuestro país ha definido una política de defensa que supera los aspectos militares. Consistentemente nuestra política de defensa también se basa en una de cooperación internacional, fundamentalmente en el plano vecinal, a fin de crear un clima de distensión y confianza, que permita acceder a relaciones menos condicionadas por la agenda histórica y más centradas en construir un futuro estable. En este punto es clave cómo Chile construya su matriz energética futura, pues esto marcará las relaciones presentes y futuras con otros países.

La incorporación de las variables económicas y energéticas han complejizado el concepto de seguridad, y es así como Buzan<sup>34</sup>, utiliza el concepto de “seguridad compleja” y la define como aquella que se da dentro de un grupo de Estados en que sus mayores preocupaciones y percepciones de seguridad se encuentran tan interrelacionados que sus problemas de seguridad nacional no pueden razonablemente ser analizados o resueltos en forma independiente.

Desde este punto de vista, cabe reconocer que la energía nuclear es parte de la diversificación energética, otorga mayor autonomía y posibilidades de alianzas y colaboración energéticas en la región.

Es en la ecuación entre energía y poder donde la inclusión de la energía nuclear en la matriz energética de un país, adquiere ribetes diferenciadores de aquellos que no la tienen. Chile, junto a los Estados de América Latina y el Caribe, comparte *“una visión común acerca de la utilización de la energía nuclear. De acuerdo a esta línea, la Región y nuestro país han sostenido que los Tratados de No Proliferación Nuclear (TNP), el Tratado de Tlatelolco y el de Prohibición Completa de Ensayos Nucleares (CTBT), constituyen la red jurídica esencial en que debe basarse el accionar de todos los Estados con vocación pacífica. Por ello hemos asumido un compromiso, no sólo en la obligación de respetar estos instrumentos, sino también en la promoción de los mismos*

---

<sup>34</sup> B. Buzan, *Security: A New Framework for Analysis*, Rienner Publishers Inc., USA, 1998.

*como herramientas necesarias que favorecen un escenario internacional más seguro y predecible”.*<sup>35</sup>

Una de las principales amenazas a la seguridad y la estabilidad mundial, la constituye el hecho de que grupos terroristas puedan acceder a instalaciones nucleares, material nuclear o fuentes radiactivas para utilizarlas contra terceros.

Esta amenaza mundial implica un reto para todos los países, obligándolos a adoptar especiales medidas de seguridad para evitar que sus instalaciones y material radioactivo puedan ser alcanzados por personas no controladas. La preocupación mundial en este contexto se manifiesta a través de las organizaciones internacionales.

Es en este sentido que la ONU acordó en septiembre de 2005 el Convenio Internacional para la Supresión de los Actos de Terrorismo Nuclear y por su parte el OIEA emitió en septiembre de 2006 la Resolución GC(50)/RES/11 sobre Medidas de Protección Contra el Terrorismo Nuclear, incrementando las distintas labores de fiscalización de las instalaciones y del ciclo de combustible nuclear.

---

<sup>35</sup> *Energía Nuclear y Política Internacional*. Documento elaborado por la Dirección de Energía, Ciencia y Tecnología e Innovación del Ministerio de Relaciones Exteriores para el Grupo de Trabajo en Núcleo-Electricidad.



## 9 RECURSOS HUMANOS

La cantidad de RRHH que demanda la tecnología nuclear es muy variada y la base queda garantizada por el mantenimiento de las disciplinas de la ingeniería, física, ciencias de materiales y otras en las universidades. Asimismo, se requiere de instituciones capaces de formar técnicos de diversas especialidades de apoyo, con estándares de calidad y rigor superior, familiarizados con las demandas tecnológicas de la industria nuclear.

En torno a una planta de generación núcleo-eléctrica se emplea alrededor de un centenar de profesionales en tareas que van desde la operación, mantenimiento y reparación regulares, al análisis de riesgos y la resolución de problemas. Además de ellos, hay un número mucho mayor de técnicos y personal administrativo y de servicios. Por otra parte, debe haber un número no despreciable de profesionales en los servicios de salud y en los organismos de regulación del Estado capaces de entender, colaborar y fiscalizar la operación regular y estar preparados para el manejo de emergencias.

Si se demostrara que un programa nuclear de potencia en Chile es pertinente, una recomendación prudente sería establecer un programa de formación de recursos humanos para cubrir las distintas especialidades en asuntos nucleares. La especialización puede obtenerse mediante un esquema asociativo, hoy en desarrollo en la comunidad internacional bajo el auspicio de la World Nuclear University.

Las aplicaciones y derivaciones de la tecnología nuclear podrían ser incorporadas al país a través de programas académicos de postítulo en energía nuclear o por migraciones generadas por la demanda del mercado, según las evoluciones tecnológicas mundiales.

En caso de contar con un programa para la GNE, sería muy conveniente que el país contara con al menos un centro de investigación y desarrollo de recursos energéticos en general, que abarque todas las formas de energía, incluyendo las convencionales, las renovables y la nuclear, en una mirada de largo plazo. En países como Suecia, España y Corea, estos centros son el soporte del regulador y de las necesidades que se desprenden de la operación y mantenimiento de una central nuclear. Esto es independiente de la condición de importador de tecnología y del soporte que otorga el fabricante.

Como se comentó en la discusión sobre accidentes nucleares, la principal causa de preocupación sería el factor humano involucrado en ellos. En la mayoría de los casos la experiencia internacional indica que la falta de rigor en los procedimientos es la fuente más importante de riesgos. La disciplina que requiere la operación de plantas nucleares es una exigencia para todo el personal involucrado directa e indirectamente con su explotación. Por esto es necesario establecer estándares de seguridad y rigor permanentes y extendidos incluso más allá de las plantas mismas. Este requisito indica la conveniencia de contar con una cultura de la seguridad instalada en la sociedad más allá de quienes trabajan directamente la energía nuclear.

De forma independiente de la adopción de la GNE en Chile, es importante para el país la implementación de la cultura de la seguridad, en general, como columna rectora del desempeño de labores profesionales de todo ámbito.



## 10 PAPEL DEL ESTADO E INSTITUCIONALIDAD

Tal como se ha visto en los capítulos precedentes y como se constata en numerosos ejemplos internacionales, la GNE es una industria singular y distinta de las demás industrias de generación eléctrica. Esta afirmación se sustenta principalmente en que:

- depende críticamente de la percepción y aceptación social;
- las decisiones comprometen al Estado a plazos mayores a cien años;
- está sujeta a estrictas regulaciones y tratados internacionales;
- es particularmente intensiva en costos de capital de alto riesgo.

Estas características determinan que la decisión de incorporar la GNE al sistema de generación desafíe los modelos de organización industrial del sector eléctrico imperantes en el mundo. Chile no constituye una excepción, y el modelo vigente desde hace 25 años muy probablemente necesitará ser ajustado o modificado para incorporar la GNE. El análisis que sigue mostrará que el actual esquema caracterizado por la neutralidad tecnológica del Estado, el proceso de toma de decisión descentralizado y el papel estatal indicativo no es compatible con la GNE.

**Estructura del modelo financiero y de costos.** El sistema de precios vigente tiene dificultades para reconocer e internalizar la totalidad de los costos que conlleva la GNE, como por ejemplo, los que están asociados al tratamiento de los desechos que deja la operación de reactores nucleares. De igual manera, los mecanismos tradicionales conocidos para asegurar cumplimiento u obligaciones legales a las empresas generadoras, como seguros y garantías, no son idóneos para hacerse cargo de plazos tan prolongados como los que supone la GNE y los cuantiosos montos de inversión que requiere este tipo de tecnología. Por la naturaleza de la GNE, que debe considerar el ciclo completo del reactor, incluyendo su fase de desmantelamiento, el operador debiera dar garantías que cumplirá con estas obligaciones, garantías que en el sistema vigente no están consideradas.

**Acceso a contratos regulados compatibles con los ciclos inversión de la GNE.** Los contratos de abastecimiento de clientes regulados tienen una duración máxima de 15 años de acuerdo a la ley, tiempo suficiente para rentar un proyecto térmico, pero insuficiente para rentar un proyecto de GNE. Esto llevaría a los operadores de reactores nucleares a iniciar el servicio bajo la incertidumbre respecto de la colocación de su producción para clientes regulados luego de vencidos esos 15 años..

**Reconocimiento de los aspectos estratégicos y de relaciones internacionales.** La decisión de incorporar la GNE involucra aspectos estratégicos relacionados con los países proveedores de tecnología y de suministro de combustible, de manera similar como ocurre en decisiones respecto a la adquisición de material de defensa de un país. En consecuencia, la selección de la tecnología nuclear debe evaluarse en el contexto de las relaciones internacionales y de los objetivos permanentes que el país tiene en política exterior.

**Definiciones financieras respecto de los costos asociados al desarrollo institucional.** El Estado, para declarar disponible la GNE, debe desarrollar un conjunto de actividades e inversiones previas de elevado costo, como por ejemplo, infraestructura e institucionalidad. Además, debe suscribir convenios internacionales

que pueden llegar a comprometer su responsabilidad pecuniaria. De manera análoga, la capacitación básica e indispensable exigida por acuerdos internacionales en materia de recursos humanos, que incluye, entre otros, la instalación de un sistema de salud adecuado a la demanda impuesta por la operación de la GNE, requiere participación y financiamiento estatal importante.

Como se desprende de este análisis, incorporar la GNE debe ser una decisión estratégica y de Estado, lo que exige a la autoridad un papel activo tanto en el proceso de evaluación, como en la decisión, en la selección de las opciones técnicas, en el diseño del marco regulatorio global, en la adopción de las regulaciones internacionales y en la fiscalización de ambos niveles de regulación.

## 11 EXPERIENCIA INTERNACIONAL Y CONCLUSIONES

### Experiencia Internacional

De la experiencia internacional en medio siglo de generación núcleo-eléctrica se desprende un conjunto de datos relevantes, indicados a continuación, que es necesario considerar al momento de evaluar la opción núcleo-eléctrica en el contexto nacional.

- 1 La tecnología nuclear disponible es diversa tanto en tipos de reactores como en proveedores, y está en permanente evolución. Actualmente predominan dos tipos de reactores y tres o cuatro proveedores principales en el mundo. Existe un consenso relativo respecto de la uniformidad de modelos y procesos, con diseños más sencillos y seguros, y costos de producción reducidos. Paralelamente, la formación del personal se ha estandarizado bajo el auspicio del OIEA, lo que ha acortado los tiempos de licenciamiento para operar las plantas, facilitando también la regulación y fiscalización por parte de los gobiernos.
- 2 En condiciones normales de operación, un reactor nuclear de potencia no genera efectos adversos para la salud de quienes trabajan en una planta ni de quienes viven en su entorno. La industria nuclear exhibe un grado de seguridad mejor que el de otras formas de generación eléctrica.
- 3 La tecnología nuclear ha alcanzado niveles de seguridad que la hacen confiable, pero exige preocupación, disciplina y rigor permanentes. Si no existen estas condiciones, el riesgo de accidentes con consecuencias graves es inaceptablemente alto.
- 4 La núcleo-electricidad es una opción considerablemente más compleja y delicada que las demás formas de generación eléctrica, entre otras cosas, por los riesgos potenciales para la población y el medio ambiente, por sus requerimientos tecnológicos y culturales, y porque genera compromisos a largo plazo para los países.
- 5 La experiencia del OIEA indica que, a partir de la decisión de llevar adelante un programa de generación núcleo-eléctrica, un país requiere entre 10 y 15 años para su realización. Además, se recomienda que la potencia de un reactor nuclear no supere el 10% de la potencia instalada de la red a la cual está conectado.
- 6 Se observa que la energía nuclear puede ser comercialmente competitiva con los combustibles fósiles a los precios actuales, aunque el costo de una planta nuclear es más sensible a las tasas de interés.
- 7 De acuerdo a la más reciente tecnología en materia de disposición intermedia y final de residuos nucleares, es posible asegurar razonablemente, con un horizonte de tiempo de hasta 10.000 años, que los residuos no entrarán en contacto con el medio ambiente y por lo tanto no contaminarán.
- 8 El temor acerca de los impactos de un accidente radiactivo y los potenciales efectos no deseados por la disposición final de los residuos es real, y merece ser considerado como una variable relevante en el análisis.

- 9 La generación núcleo-eléctrica requiere de un sistema de respuesta sanitario ante eventuales accidentes nucleares, con capacidades de contención, tratamiento y seguimiento.
- 10 Tanto la adopción como la exclusión de la núcleo-electricidad dan lugar a impactos ambientales. Si el país decide incorporar la núcleo-electricidad en su matriz energética, ciertos impactos ambientales se derivarán de esta decisión, los que serían mínimos en condiciones de operación normal, pero que podrían llegar a ser muy severos en caso de accidentes. Si se opta por excluir la núcleo-electricidad, otras formas de generación deberán desarrollarse, las que a su vez impactarán al medio ambiente a su manera, en muchos casos con resultados ambientales negativos de largo plazo.
- 11 Los accidentes en la industria nuclear ocurren predominantemente por errores humanos, por lo que el mayor esfuerzo en seguridad operativa debe centrarse en la capacitación y certificación periódica del personal.
- 12 La instalación de la opción núcleo-eléctrica requiere de una cultura de la seguridad difundida en la sociedad, más allá de quienes trabajen directamente en reactores nucleares de potencia.
- 13 La núcleo-electricidad permite desarrollar capacidades tecnológicas fuera del ámbito mismo de la tecnología nuclear.
- 14 La generación núcleo-eléctrica ofrece una oportunidad interesante de cooperación e integración regional no sólo en el plano económico, sino también en ciencia y tecnología.

### **Conclusiones del Grupo de Trabajo en Núcleo-Electricidad**

- 1 El examen de todos los antecedentes de que dispuso este grupo de trabajo no permite descartar la energía nuclear como una opción energética futura para el país.
- 2 Ante el complejo escenario energético nacional y mundial, es necesario posicionar la seguridad de suministro eléctrico como un objetivo estratégico nacional para alcanzar niveles superiores de desarrollo. En el caso de Chile, este objetivo requiere de una mayor autonomía en el abastecimiento energético, lo que se logra a través de la diversificación, donde jugarían un papel relevante las ERNC, la energía nuclear y la eficiencia energética.
- 3 La decisión de incorporar la generación núcleo-eléctrica es estratégica en lo técnico, en lo político y en lo geopolítico. Esto exige del Estado un papel activo y distinto al mantenido hasta hoy, tanto en el proceso de evaluación como en la selección de las opciones técnicas posibles y en el diseño del marco regulatorio global.
- 4 El ordenamiento jurídico de la institucionalidad chilena en asuntos nucleares no es el adecuado para las necesidades actuales, ni menos para la generación núcleo-eléctrica. El hecho de que un mismo organismo promueva, opere

- instalaciones, regule y fiscalice actividades relacionadas con el uso de la energía nuclear es incompatible con la práctica y las exigencias internacionales.
- 5 El escenario institucional y legal sobre ordenamiento territorial en Chile no es propicio para tomar decisiones acertadas en materia de localización de infraestructura compleja, como es el caso de un reactor nuclear de potencia.
  - 6 La capacidad actual de respuesta del Estado ante una emergencia radiológica debe mejorar sustancialmente, independientemente si se opta o no por la generación núcleo-eléctrica.
  - 7 Si se adoptara la núcleo-electricidad, sería necesario apoyar fuertemente la formación de recursos humanos en tecnología nuclear, aprovechando la capacidad instalada en Chile y la cooperación internacional.
  - 8 La instalación de la opción núcleo-eléctrica requiere de una cultura de la seguridad difundida en la sociedad, más allá de quienes trabajen directamente en reactores nucleares de potencia.
  - 9 A pesar de la sismicidad, condición inherente del territorio nacional que justificadamente genera preocupación en la opinión pública, es posible concluir que la tecnología e ingeniería antisísmicas disponibles en Chile pueden garantizar niveles aceptables de seguridad para instalar reactores nucleares de potencia. Sin embargo, para minimizar los riesgos ante eventos sísmicos de gran magnitud, es necesario contar con la información de fallas sismológicas y estudios de mecánica de suelos a nivel de sitio.
  - 10 Si el país eventualmente opta por la núcleo-electricidad, la necesaria aceptación pública sólo será posible si se informa a la población con transparencia, si se trabaja con expertos independientes y con disposición a considerar opiniones diversas de la sociedad civil.
  - 11 Los desafíos energéticos que enfrenta el país hacen imprescindible potenciar en forma significativa la investigación y desarrollo sobre energía, independientemente de si se opta o no por la núcleo-electricidad. En este sentido, sería conveniente contar con centros de investigación capaces de evaluar el potencial de generación en el país, así como impulsar el desarrollo de todas las opciones tecnológicas posibles.
  - 12 La fórmula que Chile adopte para enfrentar el desafío energético de mediano y largo plazo no puede ignorar el contexto internacional en relación con otros problemas, tales como el calentamiento global, la evolución tecnológica, la demanda creciente de energía e incluso, el terrorismo.



## **12 RECOMENDACIONES**

De las conclusiones antes mencionadas se desprende un número de recomendaciones generales y estudios específicos a realizarse en los próximos dos años.

### **12.1 Recomendaciones generales**

- 1 Mantener el enfoque multidisciplinario en el estudio de la opción nuclear y situar el análisis en el contexto de los desafíos energéticos generales del país.
- 2 Estudiar la matriz eléctrica en conjunto con las necesidades globales de energía para evaluar el probable uso de los diferentes recursos.
- 3 Realizar un conjunto de estudios orientados a proveer de información relevante para el proceso de toma de decisiones respecto del futuro de la matriz eléctrica de Chile.
- 4 Constituir un equipo técnico-ejecutivo que se encargue de definir los términos de referencia de los estudios respecto de la núcleo-electricidad; contratar las contrapartes técnicas y administrar el presupuesto disponible para ello.
- 5 Diseñar y encargar estudios específicos que definan las instituciones que deben ser modificadas y/o creadas en el caso de que se opte por la incorporación de la núcleo-electricidad.
- 6 Informar y educar sobre el significado de la energía nuclear y sus implicancias, con transparencia y participación de expertos independientes, en un proceso abierto a opiniones diversas de la sociedad civil.
- 7 A fin de impulsar un desarrollo diversificado y robusto de la matriz energética, con horizontes de largo plazo, sería conveniente incentivar el establecimiento de institutos o centros de investigación y desarrollo tecnológico en todas las formas de energía; así como su uso racional y eficiente, creando innovación propia y promoviendo la aplicación de tecnologías en forma estratégica.
- 8 Fortalecer y/o establecer redes nacionales de información sísmica, hídrica, meteorológica y oceanográfica, que sirvan de base para la toma de decisiones respecto de la matriz energética.

### **12.2 Estudios**

Para efectos prácticos, los estudios recomendados a continuación se agrupan de acuerdo a las áreas más relevantes que inicialmente deben abordarse. En términos generales, estos estudios apuntan a definir la viabilidad institucional, técnica y económica de la GNE; y a dimensionar los requerimientos y el impacto global de la incorporación de ésta.

1. Del ámbito institucional:

- a) Estudio de la estructura jurídica e institucional existente que rige las actividades relativas a los usos de la energía nuclear tales como su regulación técnica, económica, sanitaria, ambiental e internacional.
- b) Evaluación social de la inversión pública en regulación, normativa y otros costos públicos asociados a la eventual incorporación de la GNE.
- c) Estudios conducentes a diseñar y evaluar la implementación del organismo regulador y fiscalizador de la energía nuclear en Chile.
- d) Diseño y evaluación de costos de la adecuación de la institucionalidad pública necesaria en los escenarios alternativos sin y con GNE. Determinación del momento en que deberían introducirse los cambios para, eventualmente, compatibilizar el actual esquema organizativo de generación eléctrica con la GNE.

2. Del ámbito económico:

- a) Estudio de la demanda por electricidad a 30 años, incorporando los posibles efectos de programas de eficiencia energética, desagregados geográficamente y por sector de actividad. Incluir las necesidades de los usuarios tanto domiciliarios como industriales, segmentando adecuadamente el mercado en los usos de la electricidad y en lo geográfico para permitir la incorporación de innovaciones tecnológicas e institucionales adecuadas a la realidad del país que les permitan tener energía segura a costos razonables.
- b) Análisis de la oferta, la estructura y el funcionamiento del mercado eléctrico, sus actores y productores.
- c) Estudio de los costos relativos de las diferentes tecnologías para producir electricidad y su dinámica en los próximos 20-30 años. En particular, se deberán estimar los costos de distintas tecnologías núcleo-eléctricas y tamaños de planta, considerando el ciclo de vida completo de los proyectos. Evolución/escenarios de la matriz eléctrica en Chile.
- d) Estudio para evaluar la competitividad económica de la energía nuclear respecto de otras fuentes de generación y determinar su impacto en otros ámbitos, incluyendo el ambiental y el estratégico (diversificación de matriz energética).
- e) Análisis de las coberturas/seguros financieros necesarios en un escenario de adopción de la núcleo-electricidad.

3. Del ámbito ambiental y territorial:

- a) Estudio y estimación del potencial de todas las formas de generación eléctrica del país.
- b) Análisis comparado de impactos ambientales por formas de generación de electricidad considerando el ciclo completo.
- c) Estudio sobre los instrumentos legales y de la institucionalidad ambiental; sobre ordenamiento territorial y su compatibilidad con la generación núcleo-eléctrica.
- d) Estudio sismológico que complete con un nivel de detalle adecuado la información disponible.
- e) Estudios generales a nivel nacional para identificar los espacios/territorios potencialmente adecuados para la instalación de reactores nucleares de potencia.
- f) Estudios relativos a los impactos territoriales estructurales y su costo que se derivan de la instalación de un reactor nuclear de potencia.

4. Del ámbito de la opinión pública:

- a) Diseño y ejecución de sistemas de consulta y evaluación de la opinión pública.
- b) Diseño y ejecución de un programa de información y educación ciudadana acerca de la GNE.

5. Del ámbito de la salud:

- a) Estudio del marco jurídico y regulatorio de salud (incluyendo las responsabilidades público y privadas) respecto de los incidentes, accidentes y emergencias derivadas de la operación de una planta, transporte y manejo de combustible y desechos radioactivos.
- b) Estudio para definir los organismos responsables y la infraestructura necesaria para responder a las emergencias derivadas de la operación de una planta, transporte y manejo de combustible y desechos radioactivos.

6. Del ámbito de los recursos humanos:

- a) Estudio que permita identificar los recursos humanos necesarios para el desarrollo, operación y mantención de un programa nuclear y de emergencias radiológicas y nucleares para GNE y cuantificar los costos de formación de éstos.



## AGRADECIMIENTOS

Nuestro trabajo contó con el apoyo de las siguientes instituciones: Ministerio de Minería, Comisión Nacional de Energía, Comisión Chilena de Energía Nuclear, Subsecretaría de Marina, Dirección de Energía, Ciencia y Tecnología e Innovación del Ministerio de Relaciones Exteriores, Embajada de Chile en Austria, Embajada de Chile en España, Embajada de Chile en Japón, Embajada de Japón en Chile, Universidad Adolfo Ibáñez, Universidad de Chile, Universidad de Talca, el Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile y Centro de Estudios Científicos CECS. Este Grupo reconoce el permanente respaldo de los Ministros de Minería, Srta. Karen Poniachik, y de Energía, Sr. Marcelo Tokman. Se agradece además en forma especial la colaboración del Dr. Álvaro Covarrubias por su apoyo en la revisión de aspectos específicos de este informe.

A continuación se presenta la lista de personas con las que el Grupo de Trabajo en Núcleo-Electricidad, o parte de sus integrantes, se ha reunido en cumplimiento de su tarea. Agradecemos, a cada uno de ellos, su colaboración y gentil disposición para nuestro Grupo. El contenido del informe es sólo de responsabilidad de los integrantes del Grupo y no compromete de manera alguna a estas personas.

**Marcela Acuña**, Ecosistemas

**Renato Agurto**, Presidente de la Comisión de Energía del Instituto de Ingenieros de Chile

**Ladan Amirazizi**, Agregada Comercial, Embajada de Canadá en Chile

**Rudolf Araneda**, Gerente General Gas Atacama

**Walter Araya**, Coronel, Ejército de Chile

**José Ramón Armada Ramiro**, Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, España

**Julio Barceló**, Consejero del Consejo de Seguridad Nuclear de España

**Sergio Barrientos**, Núcleo Milenio Centro Internacional de Investigación de Terremotos Montessus de Ballore, Universidad de Chile.

**Sergio Bitar**, Presidente del Partido por la Democracia

**Pascal Brancart**, Grupo Suez, Director Electroandina

**Jaime Campos**, Núcleo Milenio Centro Internacional de Investigación de Terremotos Montessus de Ballore, Universidad de Chile.

**Carlos Cantero**, Senador de la República

**Daniel Carvalho**, Embajador de Chile en Japón

**Rodrigo Castillo**, Director Ejecutivo Empresas Eléctricas A.G.

**Felipe Cerón**, Gerente General AES Gener

**Armando Cisternas**, Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile

**Juan Antonio Coloma**, Senador de la República

**Álvaro Covarrubias**, Consultor internacional y ex funcionario del Banco Mundial sobre proyectos energéticos

**Patricia Chotzen**, Superintendente de Electricidad y Combustibles

**Alfredo de los Reyes**, Relaciones Internacionales del Consejo de Seguridad Nuclear de España

**Nils Díaz**, Ex Director de la US Nuclear Regulatory Commission

**Fernando Dougnac**, Presidente de la Fiscalía del Medio Ambiente

**Camilo Escalona**, Senador de la República

**Sylvain Fabi**, Consejero Comercial, Embajada de Canadá en Chile

**Ian Facer**, Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena

**Luis Frangini**, Fiscal de la Comisión Chilena de Energía Nuclear

**Eduardo Frei Ruiz-Tagle**, Presidente del Senado de la República

**Jaime Gazmuri**, Senador de la República

**Jane Gerardo-Abaya**, Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena

**José Luis González Gómez**, Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, España

**Raimundo González**, Ex Embajador de Chile en Viena.

**Álvaro Guzmán**, General de Brigada, Ejército de Chile

**Rodrigo Guzmán**, Director (S) de la Comisión Nacional del Medio Ambiente

**Tetsuo Hashimoto**, Director of the Organization for Earthquake Research Promotion, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japón

**Juan M. Heiremans**, Embajador. Ministerio de Relaciones Exteriores

**Matsuo Hiroki**, Director, International Nuclear and Fusion Energy Affairs Division, Research and Development Bureau, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japón

**Keijiro Hirose**, Manager, Transport Headquarters, Overseas Reprocessing Committee, Japón

**Kazunori Imamura**, Manager, Transport Headquarters, Overseas Reprocessing Committee, Japón

**Junichi Ishihara**, Executive Officer, Station Manager, Hamaoka Nuclear Power Station, Chubu Electric Power Co., Inc., Japón

**Roberto Hojman**, Presidente de la Comisión Chilena de Energía Nuclear

**Antonio Horvath**, Senador de la República

**Rodrigo Iglesias**, Secretario Ejecutivo de la Comisión Nacional de Energía

**Philippe Jamet**, Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena

**Philip Jennings**, Viceministro Adjunto Subrogante, Dirección Energía, Ministerio Recursos Naturales de Canadá

**Norbert Kalisch**, Embajador de Canadá en Chile

**Noburu Kataoka**, Manager, Nuclear Fuel Section 2, Nuclear Fuel Cycle Department, Sojitz Corporation, Japón

**Edgar Kausel**, Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile

**Kenji Kimura**, Director International Nuclear Energy Affairs, Agency for Natural Resources and Energy, Ministry of Economy, Trade and Industry, Japón

**Hiroshi Koge**, Manager, Transport Headquarters, Overseas Reprocessing Committee, Japón

**Takashi Komatsu**, Deputy General Manager, Transport Headquarters, Overseas Reprocessing Committee, Japón

**Yasuyoshi Komizo**, Director of International Nuclear Energy Cooperation Division; Disarmament, Non-Proliferation and Science Department; Ministry of Foreign Affairs, Japón

**Masaomi Koyama**, Deputy Director International Nuclear Energy Affairs, Agency for Natural Resources and Energy, Ministry of Economy, Trade and Industry, Japón

**Takahiro Kunieda**, Manager, Transport Headquarters, Overseas Reprocessing Committee, Japón

**José Manuel Fernández-Labastida**, Consejo Superior de Investigación y Ciencia, España

**Jean-Frédéric Lafaille**, Consejero Oficina del Ministro de Recursos Naturales de Canadá

**Sara Larraín**, Directora Ejecutiva Programa Chile Sustentable

**Luis Lederman**, Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena

**Juan Pablo Letelier**, Senador de la República

**Flavia Liberona**, Directora Ejecutiva Fundación Terram

**Mauricio Lichtemberg**, Jefe del Departamento de Seguridad Nuclear Radiológica de la Comisión Chilena de Energía Nuclear.

**Isabel Lincolao**, Presidenta de Renace

**Hernán Lira**, Ingeniero, Comisión Nacional de Energía

**Gabriel Lobo**, Consejero, Comisión Chilena de Energía Nuclear

**Julia López de la Higuera**, Consejo de Seguridad Nuclear de España

**Gary Lunn**, Ministro de Recursos Naturales de Canadá

**Francisco Mac-Kay**, Teniente 1°, Armada de Chile

**Carmen Martínez-Ten**, Presidenta del Consejo de Seguridad Nuclear de España

**Rafael Mateo**, Gerente General Endesa Chile

**Shinzaburo Matsuda**, Executive Officer for ITER Promotion, Japan Atomic Energy Agency, Japón

**Rosa Moreno**, Programa Chile Sustentable.

**Pedro Muñoz**, Senador de la República

**Rosamel Muñoz**, Jefe de Difusión y Extensión de la Comisión Chilena de Energía Nuclear

**Shoichi Nagayoshi**, Deputy Director of International Nuclear Energy Cooperation Division; Disarmament, Non-Proliferation and Science Department; Ministry of Foreign Affairs, Japón

**Yasuteru Nishihiro**, Secretary General, Transport Headquarters, Overseas Reprocessing Committee, Japón

**Carlos Novoa**, Capitán de Navío, Armada de Chile

**Ricardo Núñez**, Senador de la República

**Juan Pablo Orrego**, Ecosistemas

**Kazuhiko Osada**, International Nuclear Energy Cooperation Division; Disarmament, Non-Proliferation and Science Department; Ministry of Foreign Affairs, Japón

**Hiroshi Ota**, Adviser, The Federation of Electric Power Companies, Japón

**Luciano Parodi**, Ministerio de Relaciones Exteriores

**Bruno Philippi**, Presidente de la Sociedad de Fomento Fabril

**Jorge Pizarro**, Senador de la República

**Oswaldo Puccio**, Embajador de Chile en España

**Sofía Rebolledo**, Núcleo Milenio Centro Internacional de Investigación de Terremotos Montessus de Ballore, Universidad de Chile.

**Gabriel Rodríguez**, Embajador. Ministerio de Relaciones Exteriores

**Hans Holger Rögner**, Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena

**Manuel Romero**, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, España

**Jorge Rosenblut**, Presidente de Chilectra

**Juan Antonio Rubio**, Director del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, España

**Hosaín Sabag**, Senador de la República

**Rodolfo Saragoni**, División Estructuras-Construcción-Geotecnia, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile

**Mauricio Sarrazin**, División Estructuras-Construcción-Geotecnia, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile

**Arturo Silva**, Comandante de Aviación, Fuerza Aérea de Chile

**Milenko Skoknic**, Embajador de Chile en Viena

**Yuri Sokolov**, Organismo Internacional de Energía Atómica, Viena

**Tatsuhiko Takatsuka**, General Manager, Transport Headquarters, Overseas Reprocessing Committee, Japón

**Hiroshi Tani**, Adviser, The Federation of Electric Power Companies, Japón

**Hernán Tinoco**, Ingeniero. Departamento de Integridad Estructural y Mecánica de Fluidos, Forsmark, Suecia

**Carlos Urenda**, Gerente de Asuntos Corporativos de Colbún

**Guillermo Vásquez**, Senador de la República

**Julio Vergara**, Profesor de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Integrante del Consejo Directivo de la Comisión Chilena de Energía Nuclear

**José Antonio Viera-Gallo**, Ministro Secretario General de la Presidencia

**Rosa de Vidania**, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, España

**Rodolfo Von Bennewitz**, Presidente de la Comisión de Energía del Colegio de Ingenieros de Chile

**Takao Wakunaga**, General Manager, Generation Department, Hamaoka Nuclear Power Station, Chubu Electric Power Co., Inc., Japón

**Hans Willumsen**, Comisión Nacional del Medio Ambiente

**Luis Winter**, Embajador. Ministerio de Relaciones Exteriores

**Masahiro Yagi**, Director International Affairs Office, Nuclear and Industrial Safety Agency, Japón

**Pablo Zuloaga**, Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, España

## Bibliografía

1. *Considerations to Launch a Nuclear Power Programme*. International Atomic Energy Agency (IAEA), 2007.
2. *Milestones in the Development of a National Nuclear Power Infrastructure*. IAEA, Draft 3.0, 2007.
3. *World Energy Outlook 2006*. International Energy Agency.
4. *Projected costs of generating electricity*. International Energy Agency y Nuclear Energy Agency. 2005
5. *Report 2005*. World Nuclear Association.
6. *The International Nuclear Event Scale (INES)*, IAEA, 2001.
7. *Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine*. The Chernobyl Forum: 2003–2005, Second revised version.  
<http://www.iaea.org/Publications/Booklets/Chernobyl/chernobyl.pdf>
8. *Security: A New Framework for Analysis*, Barry Buzan, Rienner Publishers Inc., USA, 1998.
9. *Energía Nuclear y Política Internacional*. Documento elaborado por la Dirección de Energía, Ciencia y Tecnología e Innovación del Ministerio de Relaciones Exteriores para el Grupo de Trabajo en Núcleo-Electricidad.
10. *Health Effects of a Exposure to Low Levels of Ionizing Radiations*. National Academy Press, Washington, DC, 1998.
11. *The Future of Nuclear Power*. MIT, 2003.
12. *Stern Review on the Economics of Climate Change*, Nicholas Stern, 2006.  
[http://www.hm-treasury.gov.uk/independent\\_reviews/stern\\_review\\_economics\\_climate\\_change/stern\\_review\\_report.cfm](http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/stern_review_report.cfm)
13. *Nuclear energy of the future: what research for which objectives?*. Commissariat à l'énergie atomique. A monograph of the Nuclear Energy Directorate.
14. *Los Mitos de la Energía Nuclear*. [www.greenpeace.org](http://www.greenpeace.org)
15. *Desarrollo Nuclear y su Repercusión en la Política Internacional de Chile*. Sergio Contardo Flores, Revista Política y Estrategia, Academia Nacional de Estudios Políticos y Estratégicos, N° 80, enero de 2000.
16. *Estudio de Costos para Centrales Núcleo Eléctricas, Fase 1 Informe Final*. 1997. CNE.

17. *Nuclear power issues and choices*. Report of the Nuclear Energy Policy Study Group. Ford Foundation. 1977.
18. *Nuclear Power, How competitive down the line?*, Fatih Birol. IAEA Bulletin 48/2, Marzo 2007.
19. *Nuclear energy, an option for sustainable development?*. Franco Romerio. University Center for the Study of Energy Problems, CUEPE, University of Geneva.
20. *Energía: Hacia Fuentes Sostenibles y Estables en el Largo Plazo*. Seminario Libertad y Desarrollo - Expansiva, Septiembre 2006.
21. *El Futuro de la Energía Nuclear ¿Agonía o Reanimación?* Contribución a la Mesa de Diálogo sobre la Evolución de la Energía Nuclear en España Madrid 3 de Mayo de 2006. Marcel Coderch i Collell. Associació per l'Estudi dels Recursos Energètics (AEREN).
22. *The Costs of Generating Electricity*. The Royal Academy of Engineering, 2004.
23. *Fourth Assessment Report Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change.
24. *Environmental Aspects of Nuclear Power*, Geoffrey G. Eichholz, Ann Arbor Science, 1977, ISBN 0-250-40138-X.
25. *Environmental Radioactivity from Natural, Industrial, and Military Sources*, 3rd Edition, Merril Eisenbud, 1987, Academic Press, Inc., ISBN 0-12-235153-3.
26. *Nuclear Power and Its Environmental Effects*. Samuel Glasstone and Walter H. Jordan, American Nuclear Society, 1980, ISBN 0-89448-024-3.
27. US Department of Energy Report Emissions of Greenhouse Gases in the United States 1987-1994.
28. US Department of Energy Report Integrated Data Base Report -- 1996: U.S. Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste Inventories, Projections, and Characteristics.
29. US Department of Energy Center for Environmental Management Publication List.
30. *Sexto Plan General de Residuos Radioactivos*, Junio 2006. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, de España.
31. *Resumen anual 2005*. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Ministerio de Educación y Ciencia, España.

## **ANEXO**

**Decreto 49  
Ministerio de Minería  
13 de Marzo, 2007**



**Identificación Norma: DTO-49**  
**Fecha Publicación: 19.07.2007**  
**Fecha Promulgación: 13.03.2007**  
**Organismo: MINISTERIO DE MINERIA**

## **CREA GRUPO DE TRABAJO EN NUCLEOELECTRICIDAD**

Núm. 49.- Santiago, 13 de marzo de 2007.- Vistos: Lo dispuesto en el artículo 32 N°6 de la Constitución Política de la República; en la Ley N° 19.880, de 2003, de Bases de los Procedimientos Administrativos que rigen los Actos de los Órganos de la Administración del Estado; en el decreto supremo N°19, de 22 de enero de 2001, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia; en la resolución N°520, de 1996, de la Contraloría General de la República y sus modificaciones posteriores; en uso de las facultades que me confiere la ley, y,

Considerando:

- 1.- El creciente debate mundial en torno al uso de las distintas energías asociadas al consumo humano y el efecto sobre el planeta, y la necesidad de diversificar la matriz energética del país;
- 2.- La preocupación prioritaria del Gobierno por el desarrollo armónico de la actividad productiva, para el logro de mejores y más estables condiciones de calidad de vida para la población;
- 3.- La necesidad de que en el futuro el país pueda decidir informada y fundamentadamente si optar o no por la núcleo-electricidad;
- 4.- La necesidad de implementar una política de seguridad energética de largo plazo, coherente con los cambios estructurales de nuestra economía y en línea con los tratados internacionales que rigen la materia; y
- 5.- La importancia que para un país tienen el buen uso de sus recursos energéticos y su capacidad tecnológica;

Decreto:

**Artículo 1º.-** Créase un "Grupo de Trabajo en Núcleo-Electricidad", en adelante el Grupo de Trabajo, cuya función principal será la de asesorar al Ministerio de Minería en la evaluación de los estudios tendientes a la identificación de oportunidades, ventajas, desafíos y riesgos que involucraría el uso de la energía nuclear para la producción de electricidad en nuestro país, dentro del marco de los tratados internacionales que rigen la materia.

**Artículo 2º.-** Será función específica del Grupo de Trabajo asesorar al Ministerio de Minería en las siguientes materias:

- a) Evaluación de las dificultades y desafíos que implicaría la opción nuclear para la generación de electricidad en Chile de manera de asegurar la salud y seguridad de las personas y del medio ambiente;

b) En el análisis de la situación energética a largo plazo de Chile evaluando el eventual uso y desarrollo de la energía nuclear para la producción de electricidad en Chile;

c) En la identificación de medidas e instrumentos que serían necesarios para el eventual desarrollo de una capacidad nacional en energía nuclear;

d) En la identificación de necesidades educativas, de recursos humanos e institucionales para desarrollar dicha capacidad tecnológica;

e) En el análisis de las propuestas que sobre las temáticas anteriores surjan en el contexto internacional relativo al desarrollo de la núcleo-electricidad, de las agencias, consejos y otras instancias de la institucionalidad científica, así como en aquellas materias que el Gobierno solicite.

**Artículo 3º.-** El Grupo de Trabajo estará presidido por don Jorge Zanelli Iglesias y estará además integrado por las siguientes personas:

1. Ingrid Antonijevic Hahn.
2. Ricardo Baeza Rodríguez.
3. Carolina Echeverría Moya.
4. Claudio Gambardella Casanova.
5. Pío Infante Montt.
6. Alejandro Jadresic Marinovic.
7. Alejandro Jofré Cáceres.
8. Andrés Stutzin Schottlander.
9. Claudio Tenreiro Leiva.

**Artículo 4º.-** El Grupo de Trabajo contará con un Secretario Ejecutivo designado por la Comisión Nacional de Energía, quien colaborará con el Presidente del Grupo de Trabajo para el mejor ejercicio de sus actividades y desempeñará las demás funciones que éste le encomiende, durante el período de vigencia del Grupo de Trabajo. Si éste excede en su funcionamiento del año presupuestario, se prorrogará el respectivo convenio que se haya suscrito con el mencionado Secretario Ejecutivo.

**Artículo 5º.-** La Comisión Nacional de Energía prestará el apoyo técnico y administrativo que sea necesario para el funcionamiento del Grupo de Trabajo.

**Artículo 6º.-** Los miembros del Grupo de Trabajo desempeñarán sus funciones ad-honorem. Sin embargo, los gastos que irrogue el Grupo de Trabajo por concepto de estudios, viajes, jornadas de trabajo que incluyan alimentación y/o alojamiento, equipamiento computacional y otros que sirvan al correcto desempeño del Grupo, así como los honorarios del Secretario Ejecutivo, los cuales podrán ascender hasta la suma máxima de doce millones de pesos al año, supeditados a las correspondientes disponibilidades presupuestarias, serán solventados por el Ministerio de Minería.

**Artículo 7º.-** El Grupo de Trabajo establecerá las condiciones para desempeñar sus funciones y fijará los plazos para cumplir con su cometido.

**Artículo 8º.-** Las autoridades y directivas de los órganos de la Administración del Estado deberán prestar al Grupo de Trabajo, dentro del ámbito de sus respectivas competencias, toda la colaboración que ésta les solicite.

Anótese, tómese razón, comuníquese y publíquese.- MICHELLE BACHELET JERIA, Presidenta de la República.- Karen Poniachik P., Ministra de Minería.

Lo que transcribo a usted para su conocimiento.- Saluda atentamente a usted, Marisol Aravena Puelma, Subsecretaria de Minería.