COLEGIO
DE INGENIEROS
DE CHILE A.G.

FACTORES INCIDENTES EN LA VIABILIDAD DE LA NÚCLEO-ELECTRICIDAD EN CHILE

COMITÉ ENERGÍA NUCLEAR
COMISION ENERGÍA
COLEGIO DE INGENIEROS DE CHILE A.G.

SEPTIEMBRE 2015

COLEGIO
DE INGENIEROS
DE CHILE A.G.

INDICE

1 RESUMEN EJECUTIVO 4
2 INTRODUCCION 9
3 ANTECEDENTES 11
4 EL MARCO JURIDICO INTERNACIONAL Y SUS IMPLICANCIAS 13
4.1 Tratados 13
4.2 Acuerdos de Salvaguardias con el OIEA 14
4.3 Convenciones con el OIEA 14
4.4 Acuerdos de Cooperación entre Gobiernos 15
5 DEFINICION DEL PAPEL DEL ESTADO 15
5.1 Evolución Histórica 15
5.2 Desregulación 16
5.3 La Situación del Sector Eléctrico en Chile 16
5.4 La Visión de Futuro 17
6 ASPECTOS ECONÓMICOS Y FINANCIEROS DE LA OPCIÓN NÚCLEO-ELÉCTRICA 21
6.1 Experiencia internacional en la Economía de Centrales Núcleo-Eléctricas 21
6.2 Eficiencia Económica y Externalidades 23
6.3 Efectos sobre el costo unitario de generación, [US$/MWh], por variaciones en los costos de inversión, tasa de descuento, costos del carbón y gas natural y penalización de las emisiones de GEI. 24
6.4 Factores de Costos del Ciclo de Combustible 26
7 ESTRUCTURA Y CARACTERISTICAS DE LA MATRIZ Y RED ELECTRICAS 27
7.1 Panorama General 27
7.2 Generación Eléctrica Presente y Futura 28
7.3 Sistemas de Transmisión 31
8 REQUERIMIENTOS DE LAS TECNOLOGÍAS DE CICLO DEL COMBUSTIBLE Y DE REACTORES 31
8.1 Ciclo del combustible nuclear 31
8.2 Tecnologías de Reactores 33
9 SEGURIDAD NUCLEAR 34
9.1 Definición de Seguridad Nuclear: 34
9.2 El sistema de seguridad nuclear 34
9.3 Rol del Estado 35

10 REQUERIMIENTOS DE CAPACIDADES TECNOLOGICAS Y PROFESIONALES… ……..36

11 IMPACTOS AMBIENTALES..... 37

11.1 Enfoque del problema..... 37

11.2 La Gestión de los desechos radiactivos de los reactores nucleares de potencia..... 38

ANEXOS

Anexo I Instrumentos Jurídicos relacionados con la Energía Nuclear

Anexo II Estudios comparativos de costos para diferentes opciones tecnológicas usadas en el mundo

Anexo III Costos del Ciclo del Combustible Nuclear

Anexo IV Generación Eléctrica en Chile

FACTORES INCIDENTES EN LA VIABILIDAD DE LA NUCLEO-ELECTRICIDAD EN CHILE

1 RESUMEN EJECUTIVO

El presente y futuro del suministro de energía eléctrica es una preocupación nacional que merece ser abordado con una visión de país a largo plazo. Para ello, se requiere analizar todas las opciones tecnológicas disponibles para una matriz eléctrica, tanto las que el mercado internacional ofrezca, como aquellas que pueden ser desarrolladas en el país. La tendencia actual en el mediano plazo para Chile es hacer uso creciente de combustibles fósiles (carbón y gas natural) y de fuentes eólicas, solares, de concentración y fotovoltaicas. Teniendo en cuenta las restricciones del cambio climático, en forma creciente, se limitarán las aplicaciones de las tecnologías que producen GEI y se promoverá el desarrollo de las tecnologías limpias como son las energías renovables y la energía nuclear cuyas operaciones no generan dichos efectos.

Una visión a largo plazo conduce a la necesidad de tomar en cuenta la posibilidad de introducir otras fuentes energéticas, entre ellas la tecnología nuclear. Por eso, Chile debería avanzar en analizar con la profundidad y completitud necesaria, abordando todos los elementos que tienen incidencia en ella, la posibilidad de emplear la energía nuclear para aportar al suministro eléctrico y obtener provecho de los impactos positivos que su incorporación genera en el desarrollo tecnológico y social del país, evitando desechar esta tecnología sin un análisis acabado.

El Colegio de Ingenieros de Chile A.G. presenta este documento como un aporte a un análisis que, aunque se ha dado parcialmente en algunas instancias, requiere mayor profundidad, relacionado con la posibilidad de usar en Chile la energía nuclear para producir electricidad y que conduzca a una decisión informada sobre dicha opción tecnológica.

La primera cuestión es establecer por el Estado de Chile cuáles son los beneficios que el país puede proponerse obtener con el empleo de la energía nuclear de potencia o núcleo-electricidad (NE), para así llegar al convencimiento de la conveniencia de abordar los esfuerzos que ello impone. Al respecto, la experiencia muestra que se pueden distinguir las siguientes condiciones esenciales, que no son excluyentes, para adoptar una decisión:

- Si la NE contribuirá con energía eléctrica de base en la red, a precios competitivos y estables para los consumidores,
- Si aprovechar la NE como una palanca de desarrollo científico y tecnológico en determinadas áreas favorables para el país.
- Si la NE es un factor importante para fortalecer la posición política internacional de Chile al entrar al uso y dominio de una tecnología de frontera.
- Si aprovechar la NE para reducir los impactos ambientales por emisión de GEI.

Analizar la opción NE hace necesario abordar junto con los factores económicos, de financiamiento, costos y su recuperación, la posible reducción de los precios de la energía producida y el aporte a la estabilidad del suministro en la matriz eléctrica, también otros tales como aspectos políticos; el papel del Estado y sus instituciones; las implicancias con organismos y entidades internacionales sobre cuestiones de "no-proliferación" de armas nucleares, de salvaguardias con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) para el uso pacífico de los materiales nucleares, de seguridad nuclear y seguridad física de las instalaciones nucleares, y también sobre el ciclo del combustible nuclear; las exigencias ambientales para la gestión de residuos y desechos nucleares; los requerimientos de infraestructuras tecnológica y de profesionales, y lo más importante, la percepción y opinión pública frente a una nueva tecnología con toda la carga de controversia que puede provocar.

Es posible constatar que hay un déficit analítico integral en Chile sobre estos aspectos, en que diversos estudios o proposiciones, desde la década de los 70 del siglo XX, han quedado siempre pospuestas y más bien ha predominado el "no hacer", movido primordialmente, por miradas de corto plazo y dudas frente a los "problemas" y temores que la opción NE podría implicar, pero sin llegar a completar el examen. No obstante, en más de un estudio se llega a establecer la conveniencia de contar con generación NE a partir de la década del 2020 en adelante, con un parque generador de 3 o 4 o más reactores, incluyendo entre estos una propuesta del ministerio de Energía en 2010.

Es esperable que en la actual iniciativa de gobierno de la Agenda 2050, en curso a la fecha del presente documento, se considere analizar en completitud la opción NE.

Tomando en cuenta la situación energética nacional y la experiencia internacional según como se analiza en el contexto del presente documento, se pueden extraer importantes conclusiones, las que se resumen a continuación.

1. La situación futura de mercado eléctrico en Chile, a más de 30 años, presentará condiciones de demanda, diversificación de la matriz, tamaño y estabilidad de los sistemas de generación y de transmisión, reducción y/o estabilización de precios, reducción de los impactos ambientales por GEI, atención a las demandas sociales por soluciones cuyas relaciones beneficio/costo sean conocidas y legítimas, todas las cuales hacen conveniente analizar con profundidad las posibilidades, ventajas y requerimientos respecto de la posibilidad de introducir la opción nuclear de potencia en el país. Está claro que esta acción debe acometerse con suficiente anticipación, teniendo en cuenta que una eventual primera central nuclear de un programa nuclear podría entrar al sistema a 10 a 12 años plazo desde que se adopte una decisión de incluirla.

2. No hay razones para que Chile deje o desestime o siga postergando analizar objetiva y seriamente con la profundidad y completitud necesarias la posibilidad de emplear la energía nuclear para ayudar al suministro eléctrico y sacar provecho de los impactos positivos al medio ambiente y al desarrollo científico, tecnológico y social del país, junto con lograr menos grados de dependencia energética. Esto, no obstante que ha sido reconocido por estudios emanados del propio gobierno en distintas épocas, ha carecido de continuidad y permanencia política.

3. La información disponible muestra que, comparada con fuentes fósiles, la generación NE es intensiva en costo de capital y de muy bajo costo de combustible, y logra operar con altos factores de utilización (eficiencia operacional). Así, sus costos unitarios de generación, en el rango de 80 a 130 [US$/MWh], resultan competitivos en los mercados internacionales. Cabe, en cualquier caso, realizar evaluaciones en Chile con bases de diseño propias, cuyos valores no variarían sustancialmente del rango indicado.

4. Los accidentes desastrosos de Chernobyl y de Fukushima Daiichi teniendo orígenes distintos y previsibles, han influido poderosamente a la industria nuclear a revisar los desarrollos tecnológicos. En consecuencia, hay países que han optado u optan por congelar su parque NE; por desmantelarlo a gran costo, como Alemania; y otros, mantienen a firme o incrementan sus capacidades de generación NE, como Argentina, Brasil, Estados Unidos de América, México, Reino Unido, Francia, Corea del Sur, España, Finlandia, por ejemplo. Y hay nuevos países, como Emiratos Árabes Unidos, Turquía, Jordania. Esto, hace de la mayor importancia generar bases de información claras y objetivas que faciliten la comunicación con la opinión pública que permitan conocer con claridad la distribución de beneficios y esfuerzos y que conduzca a la confianza y aceptación ciudadana. Los temas sensibles respecto a riesgo sísmico, maremotos, gestión del combustible nuclear y de sus residuos radiactivos, evidentemente, deben ser ponderados adecuadamente en el análisis de sus riesgos y son desafíos al conocimiento, a la ingeniería y a la gestión.

5. Resulta necesario conocer cuantificadamente y cualitativamente la presencia de uranio que existe en el territorio nacional, sobre la cual la información disponible es parcial y de estimaciones auspiciosas preliminares. Ello implica que, de acuerdo con la legislación actual, el Estado debe definir su interés en el recurso y los medios cómo explorar y establecer el nivel de reservas explotables, sea por iniciativa estatal y/o en unión con privados. Esto, contribuirá a ponderar su efecto en la evaluación de la opción NE, sin perjuicio que es posible reconocer que ambos desarrollos son independientes.

6. Chile posee capacidades y experiencia amplia en usos y aplicaciones "no de potencia" de la energía nuclear, las que evidentemente son un peldaño muy útil para afrontar organizadamente desarrollos de mayor nivel como la NE. La Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), principal institución encargada de desarrollar aquellas actividades debería ser fortalecida para afrontar las etapas iniciales de tareas formativas en NE.

7. Para establecer la viabilidad del empleo y desarrollo de la energía nuclear de potencia, es indispensable que el Estado reconozca que le cabe un papel relevante en el análisis de la posible inclusión de la NE, lo que implica asumir la necesidad de evaluar dicha condición, creando las instancias de dirección y desarrollo del proceso analítico, evaluación y proposiciones. Sin un direccionamiento del Estado, llegado el caso, no será posible acoger ni implantar iniciativas de inversión aisladas en plantas de generación núcleo-eléctrica. Entre las acciones concretas que el Estado debe realizar en esta etapa están:

   a. Definir su papel en la eventual generación NE, la presencia del Estado en un eventual programa nuclear de potencia se hace irrenunciable derivada de los compromisos que se asumen por los tratados, los acuerdos de salvaguardias y las convenciones de seguridad con el OIEA, y que son requisitos que aplican los países exportadores de tecnología, todos los cuales establecen obligaciones para los gobiernos, la industria y reguladores de los Estados que emplean tecnologías y materiales atómicos.

   b. Constituir un órgano directivo político técnico (el OIEA lo sugiere al más alto nivel) que aborde sistemáticamente todos los temas correspondientes para tomar una decisión informada. Para ello, es más que recomendable seguir la secuencia de desarrollo que propone el OIEA. Dicha secuencia se muestra en el capítulo 5.

   c. Llevar adelante estudios sobre materias que determinen la viabilidad de considerar la generación nuclear, es decir, responder cuan beneficioso resulta para Chile incluir dicha tecnología y de asumir las implicancias que esto tiene no sólo en producción de electricidad. Es útil, actualizar y avanzar en profundidad respecto de los estudios que ya se han realizado por el gobierno y por encargo de éste. Se visualizan de partida los siguientes aspectos esenciales, en que otros son para ser abordadas en fase de factibilidad siguiente de desarrollo del análisis:

      (i) determinación de zonas aptas para el emplazamiento de centrales nucleares tomando en cuenta aspectos de ordenamiento territorial, geológicos, sismológicos, de infraestructura física, accesibilidad, etc.

      (ii) necesidad de actualización de la legislación y normativa chilena.

      (iii) evaluación de las condiciones y requerimientos de seguridad nuclear, protección física y de salvaguardias nucleares.

(iv) efectos e impactos ambientales relacionados con la gestión de combustible gastado y de desechos radiactivos.

(v) participación y aceptación ciudadana.

(vi) financiamiento, costos de implantación y costos de generación

(vii) formación de recursos humanos

(viii) posibilidades y disponibilidad de tecnologías de reactores y de ciclo del combustible

El Colegio de Ingenieros de Chile A. G. estima que es oportuno hacerlo ya y se suma al propósito de contribuir a dicho análisis ofreciendo las capacidades profesionales e interés de sus colegiados en aportar al desarrollo del país.

2 INTRODUCCION

El presente y futuro del suministro de energía eléctrica para las actividades nacionales es una preocupación nacional de alta importancia. El diagnóstico de la situación merece siempre una atención permanente, dadas las cambiantes condiciones en el panorama mundial energético y sus efectos sobre las posibilidades en Chile de mantener seguro el abastecimiento en condiciones de: (i) precios convenientes para el usuario a corto y largo plazo; (ii) amistoso con el medio ambiente; (iii) estable para el desarrollo de la actividad económica, y (iv) seguro desde el punto de vista de efectos sobre las personas.

El ministerio de Energía junto con adoptar medidas a corto plazo, está elaborando una Agenda Energética 2015-2050, lo que constituye un esfuerzo serio que debe traducirse en una política energética estable y a cuyo servicio deberían concurrir todos los actores, generando la institucionalidad adecuada para emprender el plan energético resultante. Es lo menos que se merece el país para dar seguridad y soporte a su desarrollo social, industrial y económico.

En este contexto, en las últimas cuatro décadas la núcleo-electricidad no ha estado incluida en el "portfolio" de opciones en Chile, aun cuando en variadas instancias analíticas de alto nivel político se le haya mencionado para su consideración, siempre a futuro, aparte de diversas menciones venidas del mundo empresarial y de congresistas a su favor. Desde luego, muchas voces se manifiestan contrarias, a su estudio incluso.

El Colegio de Ingenieros considera que Chile no debería descartar a priori la tecnología núcleo-eléctrica, así como tampoco adoptarla por imitación a otros países. Sino que, debe ser objeto de un análisis en profundidad de su viabilidad y así, determinar analíticamente si puede ser de utilidad para integrarse a la matriz de generación eléctrica chilena, advirtiendo que, no obstante siendo ello a futuro, éste se aproxima inexorablemente a riesgo que su análisis sea después presionado si no se hace ahora.

Por esta razón, el Colegio mantiene su interés en realizar aportes para mejorar un debate informado y profundo sobre esta materia

El Comité de Energía Nuclear de la Comisión Energía elabora este documento con el propósito de entregar desde el Colegio de Ingenieros de Chile, un examen y una visión de los factores que se ve necesario abordar, analizar y evaluar para establecer la viabilidad que en Chile pueda o no, instalarse un programa nuclear de potencia; es decir, con el fin de identificar las implicancias, impactos y desafíos que ello provocaría en el país en los ámbitos: políticos, diplomáticos, tecnológicos, infraestructura, seguridad, medio ambiente, opinión pública.

Lo primero que sí debe abordarse es para qué lineamiento estratégico nacional podría ser conveniente para Chile incursionar en la NE; es decir, qué factores serían las fuerzas motrices y los beneficios concretos esperables a corto y largo plazo. Al respecto, se pueden distinguir las condiciones esenciales siguientes para una decisión:

- Si la NE contribuirá con energía eléctrica de base en la red, a precios competitivos y estables para los consumidores.
- Si aprovechar la NE como una palanca de desarrollo científico y tecnológico en determinadas áreas favorables para el país.
- Si la NE es un factor importante para fortalecer la posición política internacional de Chile al entrar al uso y dominio de una tecnología de frontera.
- Si aprovechar la NE para reducir los impactos ambientales por emisión de GEI

Al examinar la situación mundial, se constata que prácticamente todos los Estados que han incorporado la núcleo-electricidad han tenido estos factores en alta consideración. Por ejemplo, en países de más reciente desarrollo como Argentina, Brasil, Corea del Sur, España, etc., en los que la tecnología nuclear ha permitido alcanzar altos niveles científicos y de tecnología en materiales, minería, electrónica, satelital, gestión de proyectos, etc.

Se aprecia la necesidad de proponerse en Chile de vincular el empleo de ciertas tecnologías avanzadas, como la nuclear, con fortalecer la actividad científica y desarrollo tecnológico nacionales, lo cual pasa por definiciones de nivel político en forma amplia y con suficiente profundidad, dados los efectos e impactos positivos que se obtienen.

Lo anterior puede servir para explicarse por qué los informes y apreciaciones que se conocen sobre la opción de acceder a la tecnología núcleo-eléctrica han quedado en planos analíticos preliminares, u otros muy descriptivos e introductorios, tocando aspectos a favor y en contra, sin converger a un punto de decisiones, sino más bien condicionadas por la desinformación, temor y prejuicios en muchos casos. La resultante de todo esto ha sido no adoptar o posponer decisiones definitivas, tal como lo hemos venido constatando explícitamente en las últimas décadas.

Por lo tanto, nos parece de la más alta importancia abordar el análisis de aspectos relevantes sobre la opción núcleo-eléctrica para Chile en forma integral y sistemática, lo cual implica la concurrencia del Gobierno a través de sus instituciones relacionadas con la materia (ministerios de Relaciones Exteriores, de Energía, de Medio Ambiente, de Transporte, del Interior, de Salud y organismos dependientes como la CNE, CCHEN y otros) y del Congreso Nacional, del sector empresarial y de la sociedad organizada.

3 ANTECEDENTES

Es de amplio reconocimiento que para el desarrollo del país es necesario o deseable esperar un crecimiento sostenido de la demanda de electricidad en Chile, debiendo tomarse en cuenta varios factores concurrentes tales como, el posible desacople de la demanda con el crecimiento de PGB, la implantación de políticas de eficiencia energética, un inevitable uso de termoelectricidad con escasez de recursos fósiles propios y riesgo de carbonización creciente, o la aún lenta posibilidad de empleo comercial de la geotermia, o la introducción de ERNC, así como el agotable uso de la hidroelectricidad a largo plazo, o los cada vez más exigentes compromisos ambientales y de opinión pública, y en último término, los riesgos de precios demasiado altos e inconvenientes para la sociedad y para la actividad económica.

El problema es determinar cuantitativamente la ponderación de estos factores, compartir los indicadores y fijar una hoja de ruta y reglas del juego a largo plazo: la pregunta clave es quién lo hace y quién decide qué y cuándo hacerlo. ¿El Estado? ¿El mercado o los inversionistas?

En síntesis, el país ha enfrentado costos crecientes de generación eléctrica, con opciones ambientales contaminantes como el carbón, junto con un impulso a aumentar la presencia significativa de las ERNC, al 20%, en los sistemas principales SING y SIC. Además, se contempla la interconexión de estos sistemas a futuro para optimizar el uso de la energía disponible en ellos, junto con visualizar la posible participación de ENAP en proyectos de generación termo-eléctricos. Estas iniciativas abordarían la demanda a mediano plazo (10 a 15 años). Junto a esto, la institucionalidad no sufriría cambios relevantes, es decir, se mantendría una prácticamente exclusiva participación privada en un sector entregado a variables de mercado, con una intervención del Estado regulatoria ambiental perfeccionada, y en caso excepcional en ámbito operacional. A futuro, con horizonte 2050 o más largo plazo, el desarrollo del sector eléctrico chileno es más bien un terreno por definir.

En los pasados 10 años se han emitido numerosos informes y diagnósticos de la situación presente y próxima futura del abastecimiento eléctrico para el país. No es propósito de este documento de agregar uno nuevo, sino referirse en forma concreta a aportar elementos sobre aspectos de la tecnología nuclear que contribuyan a su examen en relación con la situación futura que el país enfrenta.

De partida, con el empleo de la núcleo-electricidad (NE) se debería aspirar a tener junto con el beneficio posible de economía en precio de la energía, estabilidad en el suministro, preservación del medio ambiente por la no emisión de GEI y generación de residuos, un enorme impacto positivo sobre el mejoramiento en la actividad científica y desarrollo tecnológico e industrial del país y en su estatura internacional con todo su significado.

Habría que recordar intentos serios de considerar la introducción de la NE en Chile, durante los años 70 en el siglo pasado[1], cuando en 1979 la CNE desde un análisis económico

[1] Las centrales nucleares. Su proyecto y su costo. Oficina de Centrales Nucleoeléctricas; ENDESA, Abril, 1979

descartó esta opción y pospuso su re-análisis para una década posterior[2]. Esto no se ha vuelto a estudiar.

En el año 2005 se mencionó digna de considerar por el gobierno a la opción nuclear y en 2007 se constituyó un grupo de trabajo, conocido como Comisión Zanelli [3], cuya principal conclusión fue recomendar que la NE no podía descartarse y la conveniencia de acometer la realización de diversos estudios temáticos, lo que hizo la CNE en 2008-09 a través de licitaciones internacionales[4] . Dichos trabajos aportan amplia información sobre aspectos relevantes para ser desarrollados en profundidad, respecto de establecer los caminos a seguir y su aplicabilidad en Chile.

En forma independiente a mediados de 2009, en el Colegio de Ingenieros se elaboró un texto Programa de Desarrollo de Centrales Nucleares en Chile, 2009 - 2030, que sugiere una hoja de ruta para la construcción de 4 reactores nucleares de 1100MWe cada uno, antes del año 2030 [5] , el que fue presentado a autoridades de gobierno, del Congreso y académicas, entre otras.

Luego, el naciente ministerio de Energía, en 2010, examinó la conveniencia de introducir la NE a contar del año 2024[6], en un completo estudio presentado por el entonces Ministro de Energía Marcelo Tokman, cuya amplitud nos evita repetir muchas de las consideraciones y conclusiones que mantienen plena validez y vigencia. En dicho estudio se plantea una ruta de "cierre de brechas" conducente a crear condiciones adecuadas para analizar y adoptar decisiones (ver figura 1), junto con mostrar las ventajas de la posible incorporación de la núcleo-electricidad en Chile.

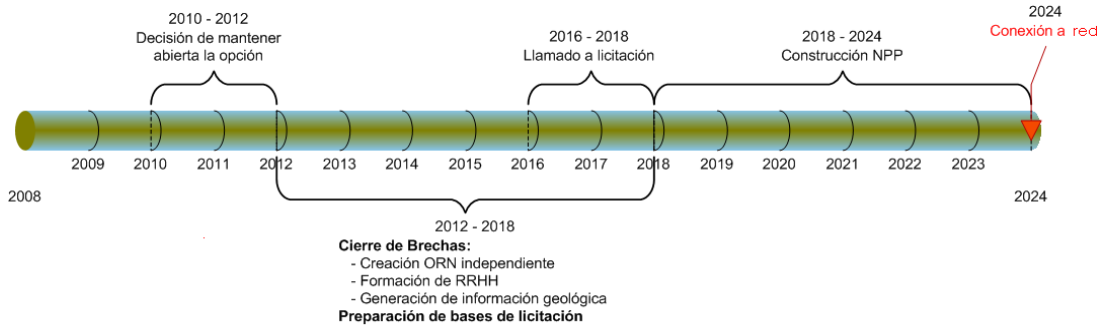


Figura 1 : Cronograma para implementar NE en Chile (M.Tokman)

[2] Informe Factibilidad técnica económica proyecto central 300MW, CNE 1979

[3] Informe La opción Núcleo-eléctrica en Chile ; Grupo de Trabajo en Núcleo-electricidad ("Comisión Zanelli"), 2007

[4] Informes de consultores internacionales y nacionales para CNE:
-Roles de estado y del sector privado en la generación Núcleo-eléctrica: Experiencia Aplicable, UAI& Senes Cons. Ltd, 2008
-Marco Regulador Nuclear. Experiencia internacional, STUK, 2009
-Estudio de opciones del ciclo de combustible nuclear, AMEC-CADE,2008
-Análisis relativo de impactos y riesgos de la generación núcleo-eléctrica, Corporación Núcleo-Eléctrica, 2009

[5] Programa de Desarrollo de Centrales Nucleares en Chile, 2009-2030; A. Covarrubias, L. Jobet, F. Sierpe, 2009

[6] Núcleo-electricidad en Chile, *Posibilidades , brechas y desafíos*; Ministerio de Energía, M. Tokman, 2010

Más tarde, en 2011, un grupo consultivo constituido por el gobierno para analizar el futuro de la situación de energía eléctrica en Chile, CADE, hace mención sobre considerar la opción nuclear por sus ventajas de no emisión de GEI y seguir los estudios acerca de la NE[7].

El Gobierno actual ha iniciado el proceso de elaborar un agenda energética de corto plazo y una visión estratégica al año 2050, que cambia la costumbre cortoplacista, no mayor de 10 años, instalada en Chile para el asunto energético y eléctrico. El hecho es que, inexplicablemente, la NE una vez más está omitida, al menos en las fases iniciales del proceso, lo cual demuestra una situación de juicio previo, más por desinformación que por responder a un examen con alguna profundidad para su omisión.

Lo que correspondería, en consecuencia, es que después de un examen integral de todos los factores incidentes, recién debería estarse en condiciones de llegar a la decisión de su incorporación o no a la matriz energética nacional.

4 EL MARCO JURIDICO INTERNACIONAL Y SUS IMPLICANCIAS

La industria nuclear en el mundo está regida o envuelta por un conjunto de instrumentos jurídicos, acuerdos y compromisos de distinta naturaleza y alcances, los que se resumen en el Anexo I, que los Estados suscriben por adhesión y los que en Chile están vigentes; cabe hacer notar que estos instrumentos se subordinan a la legislación nacional.

4.1 Tratados

i. Tratado para la Prohibición de armas nucleares en la región de América Latina y el Caribe, o más conocido como Tratado de Tlatelolco (1967)

Este instrumento declara a la región de AL y EC libre de armas nucleares, sea de propia fabricación, compra, internación, traspasos, etc. Con esto, AL y EC es la única zona libre de armas nucleares en el mundo.

ii. Tratado de No Proliferación de Armas Nucleares (1968, TNP, o NPT siglas en inglés)

Es el instrumento que distingue a los Estados poseedores de armas nucleares antes del año 1967 (Estados Unidos de NA, Federación Rusa, Francia, Reino Unido y República Popular China) estableciéndose para ellos derechos distintivos respectos de los países no poseedores de armas nucleares. A estos últimos se les prohíbe el acceso a ésas: no proliferación, y sí todo el derecho a hacer uso pacífico de la energía nuclear. De igual manera, se obliga a los Estados a la suscripción de acuerdos de salvaguardias con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Chile suscribió este tratado en 1995. El organismo en el que radica la vigilancia del servicio de este tratado es el Consejo de Seguridad de Naciones Unidas.

[7] Comisión Asesora para el Desarrollo de Sistema Eléctrico, CADE, Nov. 2011

iii. Tratado para la Prohibición completa de ensayos nucleares (siglas en inglés CTBT)

Su objetivo es la prohibición completa en el mundo de realizar ensayos nucleares, es decir, explosiones de artefactos nucleares. Su aplicación en Chile está a cargo de la CCHEN que administra las estaciones de vigilancia instaladas en el territorio nacional.

4.2 Acuerdos de Salvaguardias con el OIEA

Son instrumentos no vinculantes, suscritos por adhesión y se derivan del TNP para las aplicaciones no militares de la energía nuclear que emplean materiales nucleares, como es el caso de la núcleo-electricidad. Le otorgan al OIEA atribuciones para realizar contabilidad y verificación cuantitativa y cualitativa de dichos materiales, léase uranio y plutonio. Esto, se rige en Chile por el instrumento del OIEA denominados INFCIRC 66. Rev2. e INFCIRC 153.

Además, se creó el Protocolo Adicional de Salvaguardias que persigue *asegurar que en el Estado no hay materiales ni instalaciones no declaradas, asegurando que la declaración del país es fiel y completa*. Chile lo firmó en 2005, hasta ahora afectan, exclusivamente a las instalaciones de los centros nucleares a cargo de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN).

4.3 Convenciones con el OIEA

Se trata de instrumentos elaborados por el OIEA referidos a aspectos específicos. Todas ya han sido suscritas por Chile en distintas fechas, y la interlocución con el OIEA es a través del ministerio de Relaciones Exteriores y de la CCHEN.

i. Convención sobre Protección Física de Materiales Nucleares Chile suscribió esta Convención en 1994

ii. Convención conjunta sobre Pronta notificación de accidentes radiactivos y sobre Asistencia en caso de accidente nuclear o emergencia radiológica. Fue suscrita por Chile en 2005.

iii. Convención de Seguridad Nuclear

Este instrumento se deriva del accidente de Chernobyl. En forma periódica bianual, los estados rinden sendos informes respecto de las condiciones de seguridad de sus instalaciones nucleares, los que son sometidos a examen de todos los demás estados, quienes hacen sus observaciones que deben ser respondidas y discutidas en el seno de la reunión bianual, en la sede del OIEA.

Chile suscribió esta convención (1997) no obstante carecer de centrales nucleares de potencia.

iv. Otras Convenciones

Convención de Viena, Convenio de París y enmiendas de la Convención de Bruselas que dicen relación con responsabilidad civil en accidentes y fondos internacionales para indemnización sobre seguros privados y garantías estatales sobre daños nucleares de cualquier tipo, a las que Chile ha suscrito parcialmente (ver referencia Estudio Requerimientos de adecuaciones Marco Legal ante la Eventual Incorporación de la Energía Nuclear de Potencia, Consorcio Fundación de Derecho, U. de Chile / Barros & Errázuriz Abogados, 31 marzo 2010)

v. Grupo de países suministradores de Tecnologías Nucleares (Nuclear Suppliers Group, NSG)

Son 46 estados agrupados con el fin de establecer condiciones para la transferencia de tecnologías y componentes de plantas nucleares entre estados poseedores de tecnologías y países receptores. Chile no es miembro del NSG.

4.4 Acuerdos de Cooperación entre Gobiernos

Como consecuencia de las condicionantes que se derivan de los tratados, de la membresía al NSG, de los acuerdos de salvaguardias con el OIEA, es muy frecuente además, la necesidad de concretar acuerdos entre gobiernos de cooperación en el uso pacífico de campo de la energía que habiliten el intercambio comercial de componentes de reactores, de combustible nuclear y de tecnologías.

5 DEFINICION DEL PAPEL DEL ESTADO

5.1 Evolución Histórica

El desarrollo de la energía nuclear en el mundo la lideró Estados Unidos de América, inicialmente con fines bélicos, y otras potencias como la Unión Soviética siguieron ese camino después que los episodios de Hiroshima y Nagasaki pusieron término a la segunda guerra mundial e iniciaron el periodo histórico denominado guerra fría del siglo XX, con la finalidad de mantener en equilibrio el poder mundial. Posteriormente, el uso de la energía nuclear con fines militares la desarrollaron con éxito Francia, China, India, Pakistán, Israel y también otros países pero con relativo menor éxito.

El uso pacífico de la energía nuclear de potencia para generar electricidad se inició en la década 1960 y, tanto en EE.UU. como en el Reino Unido, Francia, Unión Soviética e India, fue el Estado en esos países los que tuvieron el rol principal en el desarrollo de la tecnología de centrales nucleares de potencia con dicho propósito.

A comienzos de la década 1970 el OIEA promovió el empleo de las centrales núcleo-eléctricas en los países en vías de desarrollo, realizó un estudio de mercado de la energía núcleo-eléctrica en 23 países en desarrollo (Market Survey for Nuclear Power in Developing Countries). Chile fue uno de esos países.

5.2 Desregulación

En la mayoría de los países que iniciaron el desarrollo de sus respectivos programas nucleares en el siglo XX lo hicieron con sus empresas estatales de acuerdo con las condiciones vigentes en cada país donde predominaba el sector eléctrico por parte del Estado, el que se encarga de financiar, gestionar la construcción y la operación de sus centrales de generación eléctrica.

Actualmente, existen países desarrollados que han reestructurado o desregulado su mercado eléctrico, lo que también ha ocurrido en Chile desde la década de los 80. Salvo en Estados Unidos de Norteamérica (EUA), no hay centrales nucleares que hayan sido construidas ni operadas en mercados liberados, sin eludir los requerimientos de costo efectividad, rentabilidad y otras consideraciones económicas y de seguridad que se toman en cuenta rigurosamente en la industria nuclear occidental.

Se encuentran países donde hay propiedad privada sobre centrales nucleares, por ejemplo, Estados Unidos, así como existen varios otros países occidentales que mantienen al sector nuclear de potencia en manos estatales, (Brasil, Argentina, México, por ej.), o a través de empresas del Estado que funcionan en el mundo privado (Francia, España, Italia, por ejemplo), y en Asia (Corea del Sur). Como sea, en todos los países, el tema energético, incluyendo el nuclear, es de direccionamiento gubernamental, independiente de la propiedad de las empresas del sector, las que responden a una política y orientación del Estado, como lo es en Estados Unidos y Canadá, por ejemplo.

5.3 La Situación del Sector Eléctrico en Chile

Desde 1982 la legislación chilena separó las funciones del Estado y del sector privado en el sector eléctrico y limitó a las instituciones del Estado funciones y atribuciones para: (i) licenciar (autorizar) la construcción y operación de las instalaciones de generación, transmisión y distribución de los sistemas eléctricos del país; (ii) regular los precios de la transmisión y distribución de electricidad de los monopolios naturales; (iii) velar por la competencia en la generación de electricidad; (iv) velar por la debida protección del medio ambiente; (v) velar por el cumplimento de las normas de seguridad de las instalaciones por parte de las empresas; y (vi) recurrir al rol subsidiario del Estado cuando el caso lo merezca.

Sin detallar cómo, la ley orgánica de la CCHEN[8] le atribuye a ésta la facultad y responsabilidad de producir energía nuclear, por sí misma o en unión a terceros.

[8] Ley Nº16.319 Crea la Comisión Chilena de Energía Nuclear, 1965

5.4 La Visión de Futuro

Tal como se ha referido, en el ámbito de la NE, todo Estado que la emplea debe asumir a través de su Gobierno importantes responsabilidades relacionadas con el servicio o cumplimientos de los instrumentos jurídicos suscritos, lo que atribuye características políticas y diplomáticas específicas relacionadas con dicho uso.

La responsabilidad del Estado se verifica desde establecer una política nuclear consistente y estable en un horizonte de largo plazo, tomando en cuenta la vida útil esperada de un parque de más de una central, incluyendo la gestión y destino de los desechos nucleares, lo cual implica una apropiada "cultura de seguridad". Esto último es lo que se llama la "gobernabilidad" (governance, en inglés) cuyos indicadores se refieren a violencia política, efectividad del gobierno, calidad regulatoria y control de la corrupción[9].

Por otro lado, el papel regulatorio en seguridad nuclear, implica disponer de un marco legal e institucional que reconoce, clara separación de la empresa u organización a cargo de explotación de una central nuclear del ente regulador nuclear, sea esa empresa de carácter público o privado.

El Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA constituye un relevante soporte en el proceso de analizar desde su etapa más temprana la evaluación de la posible introducción de la NE en un país. Para ello, brinda su apoyo mediante documentos guías, misiones de expertos para asistencia técnica, instancias de formación y capacitación de especialistas locales. La relación del OIEA con un Estado miembro es a través de la Representación Diplomática o Misión Permanente del respectivo ministerio de Relaciones Exteriores del Estado ante el OIEA[10].

Al respecto, el OIEA ha producido una guía de uso amplio que indica un proceso para abordar el análisis de la factibilidad de la opción NE, siguiendo una metodología sistémica[11], cuya aplicación se verifica una vez que el Gobierno haya resuelto analizar la opción nuclear en forma seria y profunda. En este esquema de desarrollo del OIEA, Chile se encuentra, objetivamente, antes del momento de decidir incluir el análisis de la opción núcleo-eléctrica (recuadro en amarillo en figura 5.1). Dicho esquema identifica los temas cuyo análisis debe abordarse en el examen de viabilidad (fase 1) para pasar a la evaluación de factibilidad y decisión de implantar un PNP (hito 2).

Los temas están agrupados inicialmente en 19 materias cuya profundidad y forma de analizarlos deben adaptarse según el grado de desarrollo del proceso. Es decir, se deduce que hay unos temas cuyo análisis es necesario para adoptar una decisión de proseguir o no con el estudio de la opción nuclear (hito 1), y otros que se deben analizar y evaluar para la fase de factibilidad. Las 19 materias se listan a continuación:

---

[9] Worlwide Governance Indicators, World Bank

[10] Para Chile, este medio es conocido en los ámbitos de la CCHEN en reactores nucleares experimentales, así como en las demás aplicaciones en salud, hospitales con medicina nuclear, etc. que se llevan a cabo en el país.

[11] OIEA, Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power, Nº NG-G-3.1

-Posición Nacional
-Seguridad Nuclear
-Gerenciamiento
-Recursos económicos y financiamiento
-Marco legal
-Salvaguardias
-Marco Regulatorio
-Protección radiológica
-Red eléctrica
-Desarrollo de Recursos humanos
-Participación de grupos de interés
-Emplazamiento y servicios de apoyo
-Protección medioambiental
-Planificación de emergencias
-Seguridad y Protección Física
-Ciclo del combustible nuclear
-Residuos radiactivos
-Participación de Industria nacional
-Adquisiciones

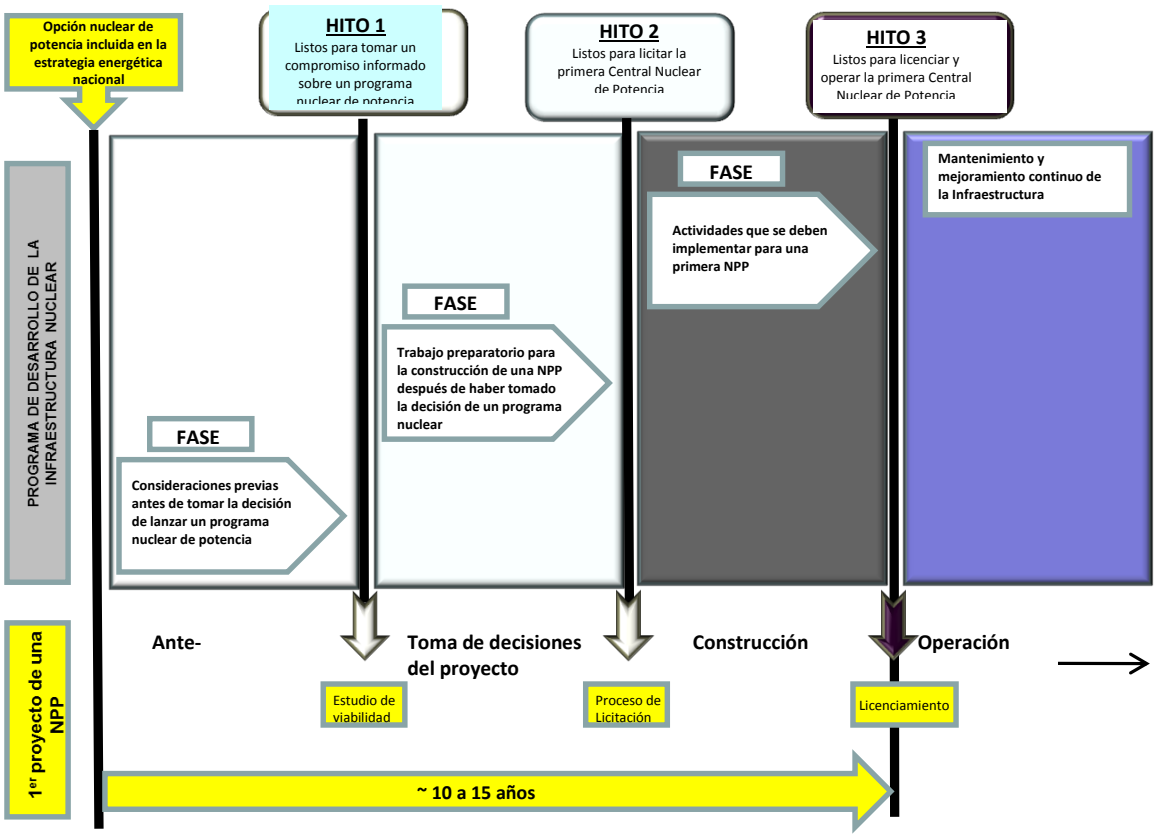


Figura 5.1 Etapas para el desarrollo de un programa nuclear de potencia, según OIEA

Es importante visualizar tempranamente el papel del Estado en cuanto a la implantación de centrales nucleares. Es decir, si será inversionista único, en asociación con privados o dejará la iniciativa sólo a este sector.

De acuerdo con un estudio de un consultor chileno [12], citamos: *"en términos generales, existen cuatro grandes modelos de propiedad y gestión de infraestructura, incluyendo la generación núcleo-eléctrica. El modelo de naturaleza más "estatal" es el establecimiento de un órgano o empresa pública. En el otro extremo, el modelo más "privado" lo constituye la propiedad y gestión privada sujeta a regulación. Dos modelos intermedios son el de joint-venture público-privado (también conocido, en España como "sociedades de economía mixta", y en el mundo angloamericano como "joint-venture PPP")*

Lo anterior conduce a la necesidad de apreciar que el Estado y al Gobierno le cabe un liderazgo ineludible en la conducción del proceso de análisis y de decisión respecto a un programa núcleo-eléctrico. Se visualiza que en una etapa inicial de viabilidad como en la que se encuentra el tema en el país, es decir, para establecer cómo sería posible abordar un programa nuclear de potencia, pasa en lo específico por:

i. Definir una política energética nuclear de largo plazo, en el marco de los compromisos internacionales y de los requerimientos nacionales.

ii. El Estado debe definir su papel en el desarrollo nuclear nacional, la institucionalidad nuclear, la legislación y normativa legal que regirá la implantación de un programa NE (autorización, selección de sitio, construcción y operación de las centrales nucleares, gestión del combustible, etc.) que, obviamente, requieren de la aprobación del Congreso Nacional. Al respecto, el OIEA recomienda que para la fase previa a decidir si lanzar un programa nuclear de potencia, es decir, para llevar adelante la fase de análisis para su factibilidad, constituya una organización del más alto nivel que dirija dicho proceso (el OIEA la denomina Nuclear Energy Programme Implementing Organization, NEPIO) (op.cit. OIEA Milestones)

iii. El Estado debe establecer el órgano regulador nuclear independiente que deberá encargarse de generar la normativa, fiscalizar las materias de seguridad nuclear, de protección radiológica y de seguridad física de las instalaciones y materiales nucleares, sirviendo las convenciones internacionales en estos campos. El órgano regulador deberá dotarse de las capacidades humanas, tecnológicas y de recursos adecuados.

iv. El Estado debe indicar zonas potencialmente aptas para la instalación de centrales nucleares en el país. Se requiere identificar zonas apropiadas para realizar la selección de sitios para la localización de centrales nucleares acordes con requerimientos de acceso a transmisión a centros de consumo, de seguridad

[12] Estudio Requerimientos de Adecuaciones del Marco Legal ante la eventual incorporación de la Energía Nuclear de Potencia, Consorcio Fundación Facultad de Derecho U. De Chile-/ Barros & Errázuriz Abogados, marzo, 2010

sísmica y geológica, de conectividad, y de necesidad de sumidero de calor, entre otros factores.

v. El Estado debe definir su interés en el conocimiento de existencia de recursos de uranio, su destino final y la forma de llevar cabo su extracción y refinamiento como materia prima de combustible nuclear. Hay evidencias de existencia de uranio en importantes minas del país en forma asociada con cobre lo que hace que su extracción sea por lixiviación a bajo costo como un subproducto del cobre, incluyendo el conocimiento de la factibilidad técnica de su extracción[13]. Hoy día, en Chile, la explotación comercial está entregada a la empresa privada, reservándose el Estado el derecho a opción de primera compra, sólo, junto con sancionar las condiciones de las actividades de exploración y explotación minera. Esto, dice relación con las definiciones ineludibles respecto del tipo de **ciclo de combustible** que se adopte, el cual está sujeto a:

   a) Explotabilidad del recurso minero y potencialidad de uso como materia prima; cuantía, costo extracción: revisar la ley de concesibilidad.
   b) Tipo de combustible nuclear a emplearse, en asociación con la tecnología de los reactores: uranio natural o enriquecido.
   c) Acuerdos internacionales para la provisión del combustible nuclear.
   d) Análisis de condiciones y tipo de ciclo de combustible a aplicar en Chile: ciclo abierto, es decir, el combustible gastado se almacena como residuo; o ciclo cerrado, en que el combustible gastado se entrega para ser reprocesado, definiéndose en consecuencia el alcance y condiciones para la gestión de los residuos radiactivos derivados del reprocesamiento (ver capítulo 8).

Como se ha dicho, el Ministerio de Energía contrató anteriormente un conjunto de estudios que dicen relación con dichos temas, lo que permite visualizar alguna secuencia de trabajo que conduzca a profundizar el análisis y proporcionar la información necesaria y suficiente de viabilidad para adoptar la decisión de incluir la opción nuclear de potencia en la matriz eléctrica. En esta condición estarían los siguientes:

♦Posición Nacional: definir el papel del Estado
♦Seguridad Nuclear y Protección medioambiental: análisis de los riesgos sobre sismicidad, gestión de residuos y salvaguardias
♦Marco jurídico y regulatorio: estudios en derecho de compatibilización de normas internacionales con la legislación chilena
♦Recursos económicos y financiamiento: modelo de negocios
♦Desarrollo de Recursos humanos
♦Emplazamiento e infraestructura
♦Tecnologías de reactores y Ciclo del combustible nuclear
♦ Gerenciamiento: definir entidad a cargo de llevar a cabo los estudios mencionados

[13]Hace 5 años en el marco de un convenio entre la CCHEN y CODELCO se instaló una planta piloto en mina R.Tomic obteniendo varios kilos de "yellow cake" (U_3O_8) materia prima para producir el combustible nuclear

6 ASPECTOS ECONÓMICOS Y FINANCIEROS DE LA OPCIÓN NÚCLEO-ELÉCTRICA

6.1 Experiencia internacional en la Economía de Centrales Núcleo-Eléctricas

Desde un punto de vista económico, las centrales núcleo-eléctricas modernas se caracterizan por (figura 6.1):

(a) tener un costo unitario de inversión [US$/MW], mayor que las centrales a carbón o gas natural;
(b) funcionar en forma ininterrumpida con un factor de utilización similar o superior a las centrales a carbón o gas natural (factor de planta del orden del 90%);
(c) tener un costo y volumen de combustible nuclear muy reducido en comparación con el volumen y costo del combustible carbón o gas natural;
(d) la posibilidad de disponer de un volumen de combustible en reserva relativamente pequeño para funcionar a plena potencia por tiempo prolongado, i.e., al menos 4 años;
(e) tener costos de operación y mantenimiento (O&M) del orden de 2 veces los costos de O&M de las centrales a carbón o gas natural.
(f) los costos de O&M agregados a los de combustible (costos variables) resultan de menor impacto en el costo unitario de generación, respecto de C y GN

Es evidente que corresponderá, sea el Estado y/o los inversionistas privados dueños de los proyectos, realizar las evaluaciones de pre-factibilidad y de factibilidad con números propios; por lo tanto, nos remitiremos a mostrar valores provenientes de entidades habilitadas y respetables que sirven para ilustrar órdenes de magnitud y parámetros orientativos económicos.

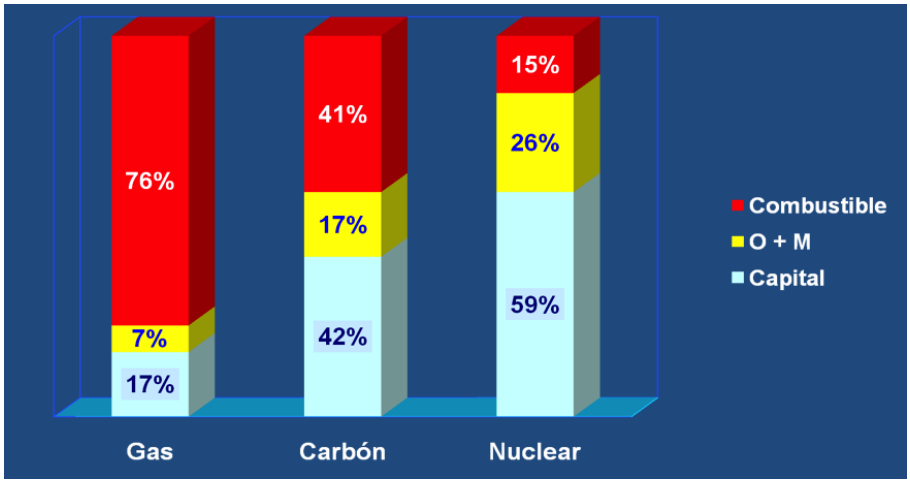


Figura 6.1 Estructura típica de costos de generación

Desde un punto de vista financiero, las centrales núcleo-eléctricas tienen costos financieros porcentualmente mayores que las centrales a carbón o gas debido a su

mayor costo de inversión y porque requieren tiempos de construcción más largos. El costo de inversión total es la suma del costo "overnight" (costos de ingeniería y construcción teórico en un día), más los intereses del capital invertido durante el tiempo de construcción de la central.

La experiencia internacional sobre la economía de las centrales núcleo-eléctricas en los pasados 10 años, y desde luego, existen numerosos análisis y resultados, muestra una tendencia al aumento significativo de los costos de inversión reflejados en un creciente costo de la electricidad generada. No es objeto del presente trabajo realizar una evaluación económica particular para nuestro país, sino que, haremos referencia a estudios de entidades reconocidas para fines ilustrativos de parámetros relevantes provenientes de países que emplean las distintas tecnologías, como pueden ser la OECD, la Universidad de Chicago, o Nuclear Energy Institute.

Las tablas II.1.1 a 3 del Anexo 1 muestran costos overnight o de inversión, así como costos unitarios de generación no sólo para tecnología nuclear, sino para distintas tecnologías. En Chile se deberán realizar las evaluaciones con valores propios, pudiendo diferir de aquellos, pero dentro de los rangos comparativos.

En 2010 el estudio de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, OECD, "*Projected Costs of generating Electricity*" mostró costos nivelados reales de la generación de electricidad con tasas de descuento 10% y 5%, en la OECD con nuclear, a carbón y a gas, como y también eólicas y fotovoltaicas e hidroeléctricas, y su comparación con las de China.

Tabla 6.1 Costos Nivelados de Generación de electricidad [US cents/kWh] (*)

Tecnología	Región o país	A 10% tasa de descuento	A 5% tasa de descuento
Nuclear	OECD Europe	8.3-13.7	5.0-8.2
	China	4.4-5.5	3.0-3.6
Black coal with CCS	OECD Europe	11.0	8.5
Brown coal with CCS	OECD Europe	9.5-14.3	6.8-9.3
CCGT with CCS	OECD Europe	11.8	9.8
Large hydro-electric	OECD Europe	14.0-45.9	7.4-23.1
	China: 3 Gorges	5.2	2.9
	China: other	2.3-3.3	1.2-1.7
Onshore wind	OECD Europe	12.2-23.0	9.0-14.6
	China	7.2-12.6	5.1-8.9
Offshore wind	OECD Europe	18.7-26.1	13.8-18.8
Solar photovoltaic	OECD Europe	38.8-61.6	28.7-41.0
	China	18.7-28.3	12.3-18.6

(*) El costo expresado en US$/MWh es 10 veces el costo expresado en US cents/kWh

Fuente: OECD/IEA-NEA, 2010, Projected Costs of Generating Electricity, Table 3.7. Incluye capital, financiamiento, costos locales del propietario, de combustible y operación durante la vida útil de la central

La OECD, (2010) muestra estimaciones de costos "overnight" de inversión en países para diversas tecnologías que dan cuenta de rangos amplios, tales como, US$/kW eléctrico instalado 1550->5000 para nuclear, 800-5800 para carbón, o de 800- 1747 para GN (ver Anexo II)

En mismo Anexo II se incluyen estudios referenciales de OECD, Universidad de Chicago y de Nuclear Energy Institute que muestran valores reales competitivos de costos de generación núcleo-eléctrica frente a otras tecnologías.

6.2 Eficiencia Económica y Externalidades

Es posible hacer una comparación económica entre centrales núcleo-eléctricas y centrales térmicas a carbón o gas natural que operan en base. Es necesario tomar en cuenta la vida útil de las centrales para cada una de las tecnologías, que para las plantas nucleares se proyectan hoy día en el orden de 60 a 70 años.

Las centrales nucleares modernas, conocidas como Generación III y aquellas más nuevas como Generación III+, están compuestas en general por unidades de potencia mayor que 1000 MW eléctricos (1100 MWe, 1400 MWe y 1600 MWe). No obstante, la industria nuclear trabaja en diseños nuevos más compactos y de menores potencias, del orden de 300 MWe, o incluso modulares de menor capacidad individual, que se aspira sean aptas para sistemas eléctricos de tamaño medio o pequeño.

Figura 6.2 Evolución de tecnologías de reactores 14

Las tecnologías de gestión de sistemas interconectados hacen posible y compatible a una central nuclear comercial con los futuros SIC y SING chilenos, más aún si estos se interconectan para cuándo podría pensarse en la posibilidad de conectar una primera unidad nuclear al sistema chileno (ver cap. 7).

14 Foro Nuclear Español

El costo de oportunidad del dinero (tasa de descuento) y el tiempo de construcción de las centrales eléctricas influyen significativamente en el costo económico de producción del MWh: (i) una tasa de descuento baja favorece a las centrales con bajo costo de combustible y elevada inversión inicial; (ii) una tasa de descuento alta favorece a las centrales con baja inversión y elevado costo de combustible; (iii) los costos de financiamiento de la inversión overnight son mayores mientras más largos son los plazos de construcción de las centrales.

6.3 Efectos sobre el costo unitario de generación, [US$/MWh], por variaciones en los costos de inversión, tasa de descuento, costos del carbón y gas natural y penalización de las emisiones de GEI.

Usando referencias internacionales [15] es posible aproximar información para fundamentar la posibilidad de efectos económicos favorables para el país respecto, en especial, sobre costos estables de generación (baja volatilidad de precios de combustible, aunque altos costos de inversión), eficiencia sistémica (alto factor de planta) y estabilidad de suministro (energía de base y operación estable a potencia nominal).

Se hizo una comparación entre el costo medio anual del MWh en dos escenarios que proveerían un servicio de base equivalente:

Escenario (i): Una central nucleoeléctrica de 1100 MW operando durante 60 años con desmantelamiento al término de su vida útil

Escenario (ii): Una central termoeléctrica compuesta de 3 unidades de 350 MW construidas con intervalos de dos años y reemplazadas del mismo modo al cabo de 30 años para dar servicio durante un total de 60 años.

Tabla 6.2 Comparación del Costo Medio Anual generado por centrales nucleares, a carbón y a gas natural [USD/MWh]

Tasa de descuento÷	**8%**	**10%**
Costo medio anual generación	**[US$/MWh]**	
Escenario (i): Central nuclear PWR de 1100 MW	**85**	**98**
Escenario (ii): Central a carbón de 3x350 MW (3 unidades)	95	90
Penalización de las emisiones de GEI del carbón	12	12
Total	**107**	**102**
Escenario (ii): Central de CCGN de 3x350 MW (3 unidades)	102	96
Penalización de las emisiones de GEI del Gas natural	6	6
Total	**108**	**102**

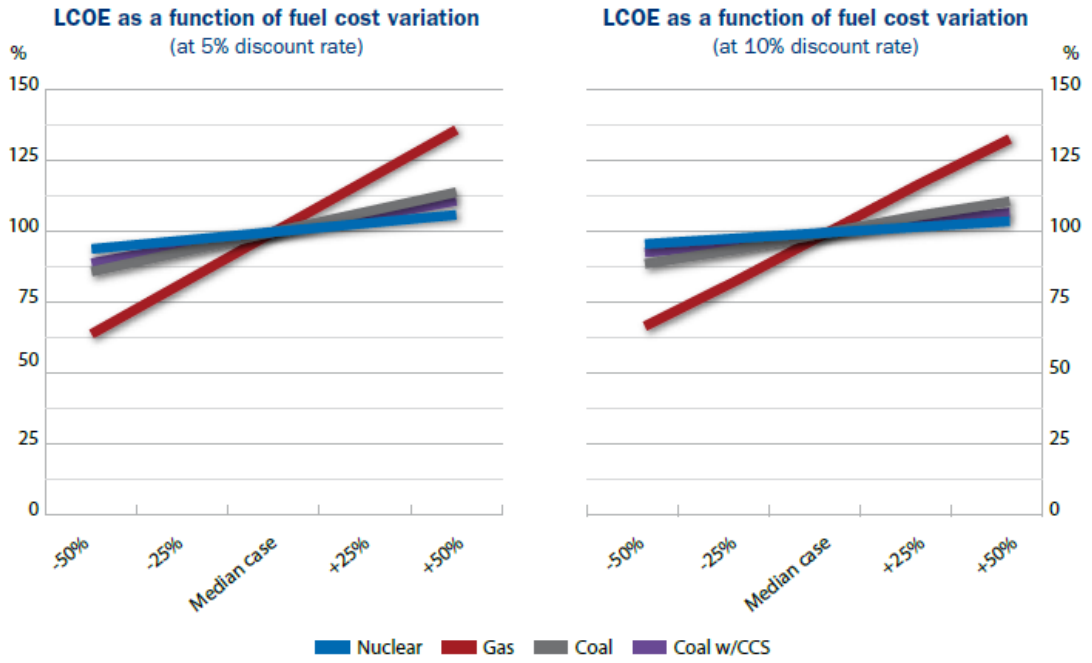
[15] The economics of Nuclear Power, World Nuclear Association, 2014

En la Tabla 6.2 se observa que si la tasa de descuento sube de 8% a 10%, el costo medio del MWh de generación nuclear aumenta de 85 a 98 US$/MWh, mientras que en la generación a carbón disminuye de 95 a 90 US$/MWh y en la generación a gas natural disminuye de 102 a 96 US$/MWh. Esto se debe a que mientras mayor es la tasa de descuento, el valor presente de los elevados costos de los combustibles carbón y gas natural disminuyen fuertemente en relación con el leve aumento de sus costos de inversión. En la generación nuclear ocurre lo contrario, la mayor tasa de descuento hace aumentar su mayor costo de inversión, pero sólo produce una leve disminución del bajísimo costo del combustible nuclear.

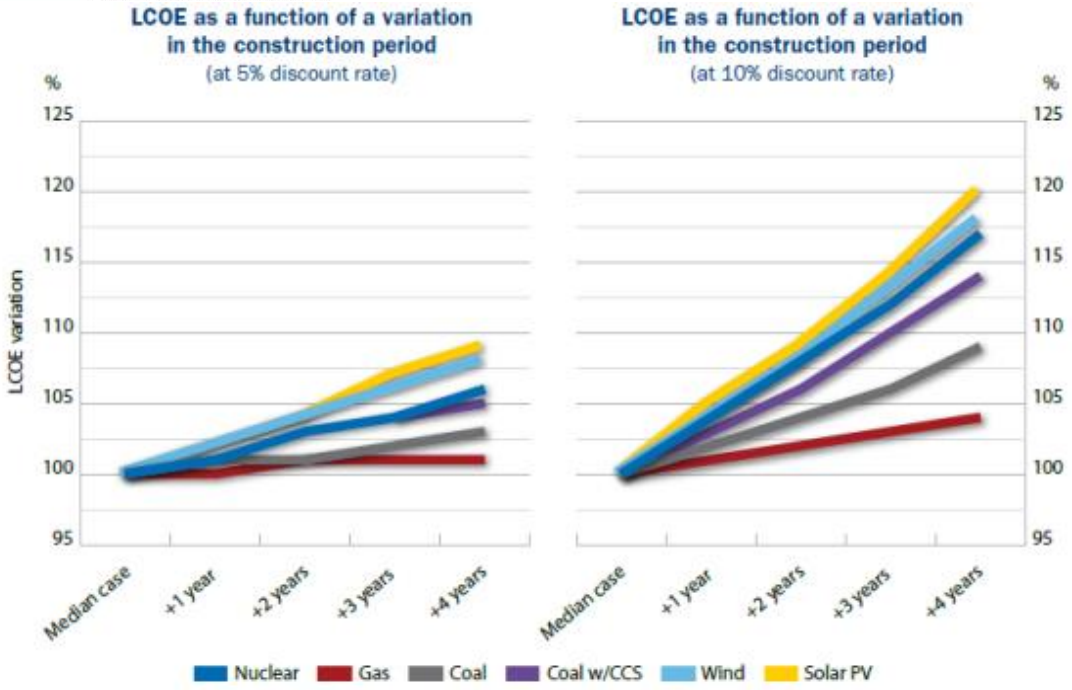
Cuando la tonelada de emisión de GEI equivalente de la generación eléctrica a carbón y gas natural en ciclo combinado se penaliza a razón de 10 US$/ton de CO_2 eq. emitido, resulta que el costo de la generación nuclear es de 4% a 26% menor según si el cálculo se hace con una tasa de descuento 10 % u 8% respectivamente." (ver Anexo II.2)

Desde un punto de vista ambiental, las centrales nucleares no emiten gases de efecto invernadero (GEI) durante su operación y, en teoría, el costo de generación unitario ([US$/MWh] por ejemplo) debería recibir un crédito equivalente al costo de las emisiones de CO_2 que evita la generación núcleo-eléctrica, o bien penalizar el MWh de las centrales térmicas con el costo equivalente de sus emisiones de GEI.

Es importante también advertir la sensibilidad frente al costo unitario de generación la variación de otros factores, tales como del costo del combustible y el período de construcción, tal como se muestra en las figuras siguientes



Fuente: E. Williams IAEA, 2010



Fuente: E. Williams IAEA, 2010

6.4 Factores de Costos del Ciclo de Combustible

Con respecto a costos del combustible nuclear, se deben considerar los correspondientes a cada etapa del ciclo, incluyendo etapas posteriores al empleo en el reactor ("back-end"), distinguiendo si se trata de ciclo abierto o ciclo cerrado, que contempla reprocesamiento del combustible gastado.

En el Capítulo 8 se describen las distintas etapas del ciclo de combustible y en el Anexo III se muestran las magnitudes físicas y costos de las componentes de cada etapa[16].

Los costos estimados para la etapa frontal del ciclo del combustible nuclear son 1.260 (US$/kg) de uranio enriquecido al 3,5% y 1.335 (US$/kg) de uranio enriquecido al 5,0%. Estos valores sólo indican orden de magnitud porque los precios de mercado de las componentes principales, U_3O_8 (*yellow cake*) y separación isotópica (SWU), han tenido alzas y bajas en el pasado, aunque sus influencia o efectos sobre el costo de la parte frontal del ciclo son muy pequeños frente al costo de inversión de una central nuclear, y en consecuencia, tienen un efecto pequeño sobre el costo del kWh generado nuclear.

Respecto del costo de almacenamiento temporal de combustible gastado se agrega como parte de la operación de una central en un valor fijo que se agrega en

[16] El informe de enero 2015 de Ux Consulting Company LLC contiene un detallado estudio del mercado de las distintas etapas del ciclo de combustible y sus precios se usaron como valores referenciales para estimar el costo del ciclo de combustible nuclear enriquecido

el costo. No se abundará sobre el costo de la parte posterior del ciclo cerrado, porque el reprocesamiento del combustible usado no es ni considerado ni posible hacerlo directamente en Chile y en su evaluación habría que considerar los servicios de transporte del combustible gastado, reprocesamiento del combustible en un país poseedor de dicha tecnología (Francia, F. Rusa, Reino Unido, por ejemplo) y, más que seguro, repatriación de los desechos radiactivos de alta radioactividad.

7 ESTRUCTURA Y CARACTERISTICAS DE LA MATRIZ Y RED ELECTRICAS

7.1 Panorama General

En el mundo se tiene una presencia de generación nuclear de electricidad que bordea el 14%, cuya proyección futura ha estado afectada por los accidentes ocurridos en Ucrania y Japón. La figura 7.1 muestra cómo era la situación previa a Fukushima, con el antecedente que Japón planea restituir gradualmente la operación de sus reactores con excepción de los afectados con el tsunami de Fukushima Daiichi.

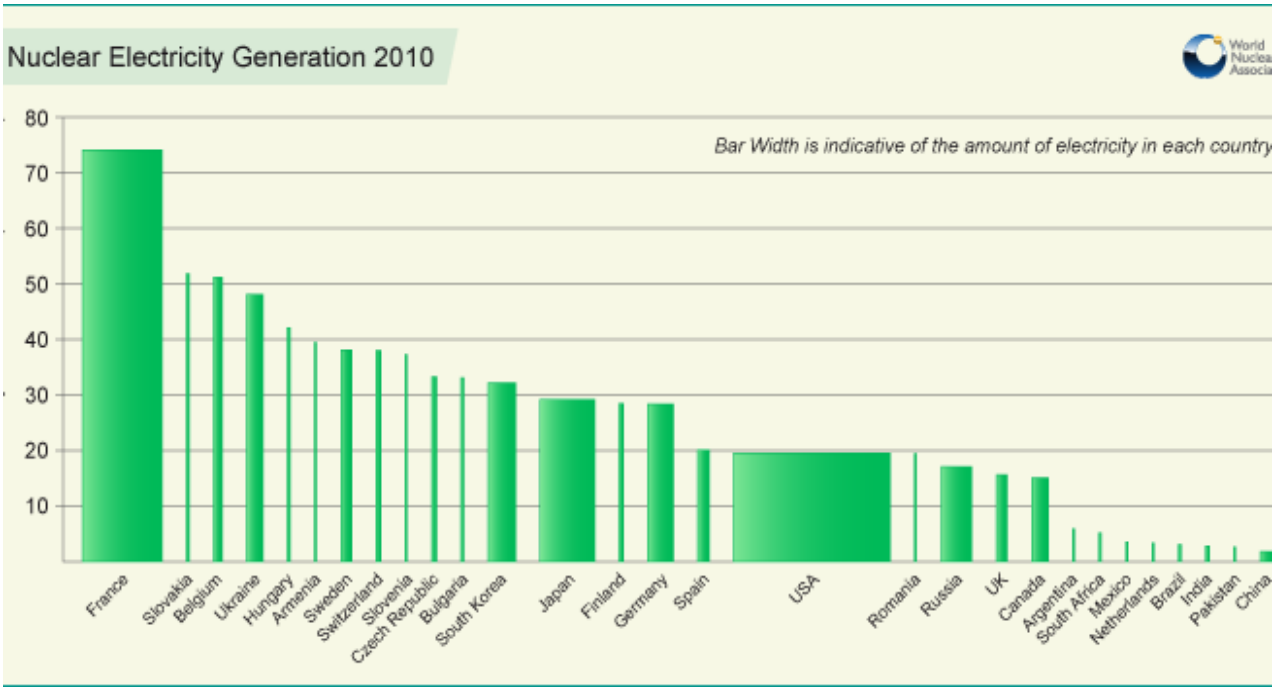


Figura 7.1 Generación núcleo eléctrica en el mundo, 2010

En el examen de los elementos necesarios de abordar para la posibilidad de incorporación de la núcleo-electricidad en Chile debemos revisar el aporte que significaría su incorporación a la matriz energética de forma que apoye al cumplimiento de estándares en niveles de confiabilidad de suministro, limitación de emisiones y reducción del costo global de suministro así como si el sistema de

transmisión nacional es adecuado para su operación, especialmente si consideramos unidades núcleo-eléctricas de un potencia de 1.000 MW o superior.

7.2 Generación Eléctrica Presente y Futura

En una revisión de la condición de operación de los principales sistemas interconectados del país tenemos que durante al año 2014, la generación de energía eléctrica en ellos alcanzó a 69.897 GWh[17] , la que principalmente fue generada por centrales a carbón (40,6 %), centrales hidráulicas (33,6 %) y centrales a gas (14,3 %). Una participación menor tuvo la biomasa (3,9 %), el petróleo diésel (3,6 %), unidades eólicas (2,0%), solares (0,65 %) y otros (1,35 %). Su distribución según tecnología para cada uno de estos dos sistemas interconectados se muestra en Anexo IV.

La demanda máxima durante al año 2014 de cada uno de estos sistemas alcanzó a 7.547,3 MW en el SIC y a 2.372,2 MW en el SING. En cuanto a la potencia instalada en estos dos sistemas interconectados a diciembre de 2014 alcanza a 20.151,2 MW distribuidos en 15.180,8 MW en el Sistema Interconectado Central (SIC) y 4.970,4 MW en el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), respectivamente.

En el caso del SING la distribución de la potencia instalada por tecnología[18] es la siguiente:

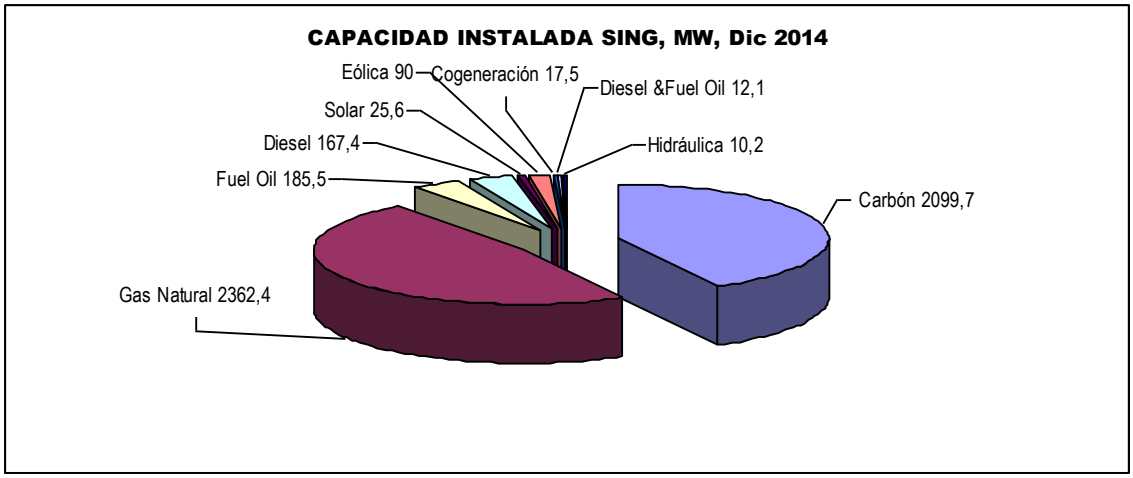


Figura 7.2 Potencia Instalada, MW, SING 2014

[17] Comisión Nacional de Energía
[18] CDEC SING

En el caso del SIC la distribución de capacidad instalada por tecnología[19] es la siguiente:

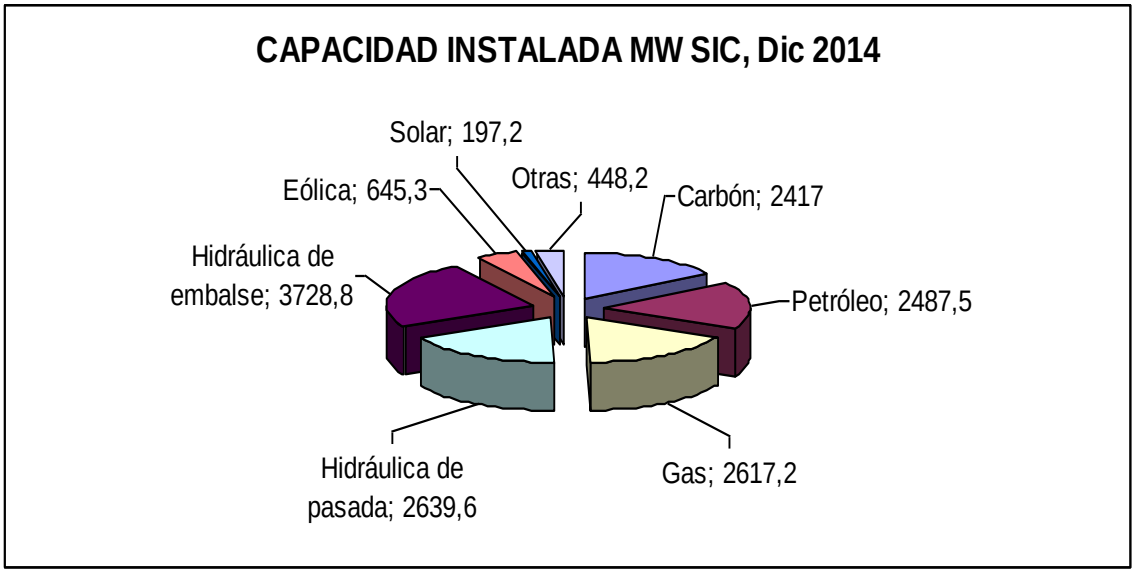


Figura 7.3 Potencia Instalada, MW, SIC 2014

La evolución de la participación de estas y otras tecnologías en la matriz de energía se ha analizado y presentado en varios informes entre los cuales están el informe ya citado Núcleo-electricidad en Chile, *Posibilidades, brechas y desafíos*; Ministerio de Energía, M. Tokman, 2010 y el realizado por la Comisión Asesora para el Desarrollo del Sistema Eléctrico (CADE), presentado en noviembre de 2011 y que proyecta la matriz de energía eléctrica para el periodo 2012 – 2030. (op.cit. capítulo 3).

En el primer informe del ministerio de Energía, que hace un amplio examen de los temas relevantes implicados para un PNP, plantea concretamente incluir centrales nucleares al sistema eléctrico chileno (SIC+SING) del orden de 5000MW con unidades del orden de 1100MW eléctricos c/u de capacidad, a partir de mediados de la década del 2020 al 2035, y que incluye en la conformación de la matriz eléctrica futura a los grandes proyectos hidroeléctricos australes. Este estudio es una buena base para abordar estudios con información más actualizada.

En el segundo informe, se proyectó la matriz de energía eléctrica bajo distintos escenarios de demanda con el objeto de determinar las tendencias de distintas formas de energía en el abastecimiento eléctrico futuro y poder apreciar el efecto que tendrían determinadas políticas que se quisieran implementar en temas como el de la promoción de energías renovables no convencionales (ERNC) y la limitación de tecnologías de generación que emiten CO_2.

[19] CDEC SIC

Si bien este estudio determina la incorporación de energía nuclear en la matriz de energía, producto principalmente, de la necesidad de limitar las emisiones y ante limitaciones en el desarrollo de grandes proyectos hidráulicos; si adicionalmente se limita el desarrollo de centrales a carbón, la incorporación de energía nuclear puede llegar a 3.300 MWe para el periodo analizado.

En esta situación el estudio sugiere la incorporación de 2.200 MWe de energía nuclear a partir del año 2025, dos unidades de 1.100 MWe cada una en los años 2026 y 2028, encontrándose el sistema con niveles de demanda máxima de 20.000 MW.

A continuación se presenta la curva de capacidad instalada resultante del estudio CADE.

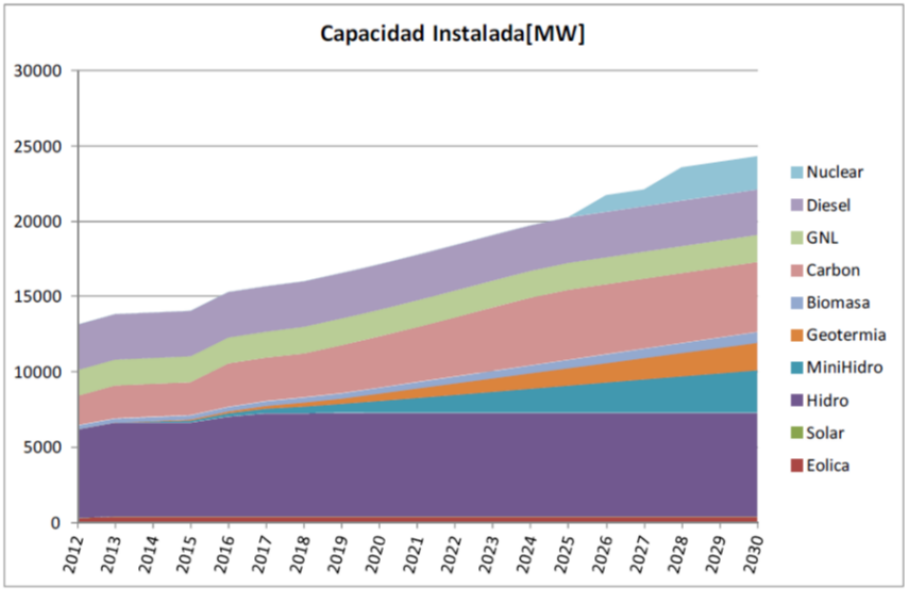


Figura 7.4 Evolución proyectada de la capacidad Instalada Chile

El estudio de CADE, para los primeros años del periodo, basó su proyección de consumos en la información de la CNE para el estudio de precios de nudo de corto plazo de abril de 2011, complementándolas con otras estimaciones para los años siguientes. Con ellos, para el año 2030 se estimó cifras de demanda cercanas a los 110.000 GWh para el SIC y de 28.000 GWh para el SING.

Una actualización de la proyección de esta matriz de generación la hemos estimado incorporando la última información de los consumos proyectados para los próximos años, correspondiente a los valores determinados por la CNE en el estudio de nudo de corto plazo de abril 2015 (ver Anexo IV).

7.3 Sistemas de Transmisión

Un elemento esencial para la incorporación de la energía nuclear en un mercado competitivo de generación, como lo considera el modelo de desarrollo eléctrico aplicado en Chile, es contar con acceso abierto al uso compartido de los sistemas de transmisión y el tener sistemas de transmisión de capacidad suficiente.

El actual desarrollo del sistema eléctrico y las obras planificadas a futuro permiten confirmar que en los años en que se requiera la incorporación de la energía nuclear, el país contará con un robusto sistema de transmisión en 500kV o más, debido a que los volúmenes de energía a transmitir serán mayores, facilitando la ubicación de unidades de energía nuclear de potencias de 1.000 MWe o superior (ver Anexo IV).

Como se puede apreciar de los antecedentes anteriores, ya con seguridad antes del año 2025 se contará con un robusto sistema de transmisión en 500 kV que unirá la parte norte, central y sur del país hasta Puerto Montt, y que ese sistema interconectado estará gestionando una generación superior a 108.000 GWh y una demanda mayor a 15.000 MW, lo que le permitiría incorporar la energía proveniente de centrales nucleares incluso con unidades de 1.000 o 1.400 MW, sin un efecto mayor sobre la estabilidad del sistema.

Para una mayor seguridad sobre la operación de estas unidades, sería conveniente desarrollar estudios que confirmen la adecuada operación del sistema ante la conexión y desconexión de estas unidades.

8 REQUERIMIENTOS DE LAS TECNOLOGÍAS DE CICLO DEL COMBUSTIBLE Y DE REACTORES

8.1 Ciclo del combustible nuclear

Comprende las etapas de:

a. obtención de uranio (minería),
b. conversión a UF_6,
c. enriquecimiento de U,
d. fabricación del combustible,
e. irradiación en el reactor,
f. almacenamiento temporal del combustible gastado,
g. reprocesamiento,
h. tratamiento de residuo radiactivo,
i. disposición del residuo radiactivo

Cabe señalar algunas características, tales como:

i) las tres primeras etapas constituyen lo que se llama la parte frontal, o "front-end", y que para el caso de combustible en base a uranio enriquecido, la etapa de "enriquecimiento"[20] constituye tecnología de sensibilidad "proliferante nuclear" ;

ii) las etapas posteriores al uso del combustible en el reactor, o sea las 4 últimas, son lo que se llama la parte posterior del ciclo, o "back-end"; en éste se distingue el ciclo abierto, que el combustible gastado es dispuesto como residuo; y

iii) En caso que el combustible gastado se reprocesa, es decir, se separa el uranio remanente para su reaprovechamiento, de los productos radiactivos que se transforman en los desechos, que se disponen en almacenamiento definitivo. El reprocesamiento también tiene carácter de tecnología sensible.

Junto a lo anterior, cabe mencionar que los países poseedores de tecnologías sensibles que son, como se ha dicho, las problemáticas de adquirir o desarrollar, entregan los servicios correspondientes, de enriquecimiento, por ejemplo. Con ello, disponer de uranio propio, crea condiciones favorables a un país para la obtención de combustible.

En el "Estudio de opciones del ciclo del combustible nuclear" hecho por AMEC CADE, 2008, figura una descripción amplia de la situación de mercado y tecnologías asociadas con el combustible nuclear. Adicionalmente, cabe indicar que han surgido propuestas nuevas u otras que se están materializando, en cuanto a contar con seguridad de suministro a través de especies de bancos de combustible para abastecer a los países sin capacidades de fabricar el suyo propio.

De lo anterior se desprende la importancia de conocer las disponibilidades de uranio en el país, en asociación con el tipo de combustible y tecnología de reactores que se escoja adoptar. En efecto, los reactores mayormente usados son en base a uranio enriquecido-agua natural, frente a la tecnología de reactores en base a uranio natural-agua pesada. **Esta es una de las primeras decisiones político-tecnológicas a definir,** ya que la experiencia demuestra que para un parque nuclear reducido, como podría ser el chileno, resulta recomendable y conveniente adoptar un solo sistema tecnológico. La respectiva evaluación debe ser hecha a nivel de país, o sea por el Estado, dados los requerimientos y compromisos político-diplomáticos, económicos, de mercado, seguridad de suministro y tecnología de reactores, junto con el interés de desarrollo de industria local especializada, aspecto ineludible.

Es común que, por razones de eficiencia económica y tecnológica, los países optan por usar sólo un sistema tecnológico reactor-combustible, por ejemplo, uranio enriquecido-agua liviana; ejemplos: EEUU, Brasil, Francia, España, Alemania, México, entre otros; con tecnologías en base agua pesada-uranio natural, son

[20] Enriquecimiento de uranio, consiste en realizar por medio de tecnologías especiales, sobre una matriz de uranio natural, un aumento de la proporción del isótopo Uranio 235 desde 0,7% (natural) a 2% a 4% (enriquecido)

Canadá, Argentina, por ejemplo. Pocos países poseen más de un sistema tecnológico de reactores nucleares comercialmente: Rusia, China, India, Corea del Sur.

8.2 Tecnologías de Reactores

Los reactores mayormente usados comercialmente en el mundo occidental son del tipo uranio enriquecido–agua liviana, en particular de agua a presión (Light Water Pressurised Reactors).

La industria está hoy día produciendo distintas mejoras en diseño, análisis de seguridad y condiciones de manejo, como consecuencias y lecciones del accidente provocado, especialmente, por el tsunami en Fukushima, tanto para las tecnologías actualmente en uso, como para los reactores de generaciones futuras. Todo lo cual merece ser seguido con la mayor atención por parte de Chile en los distintos foros internacionales, léase OIEA, OECD, región latinoamericana, etc.

Se presenta una reseña de los reactores nucleares llamados de la generación III+, que se presume dominarán el mercado por los próximos 50 años, cuyo diseño ofrece mejoras significativas en seguridad y economía respecto de los diseños de los reactores avanzados de la generación III, certificados por la Nuclear Regulatory Commission de EE.UU. en la década de 1990.

Reactor CANDU Avanzado (ACR-1000). Canadá
AP1000 — basado en el AP600 con una producción de energía incrementada. USA
Reactor europeo presurizado (EPR) — un descendiente de los reactores Framatome N4 (Francia) y Siemens Power Generation Division (Alemania)
Reactor nuclear económico simplificado de agua en ebullición (en inglés: Economic Simplified Boiling Water Reactor, ESBWR) — basado en el ABWR. USA
APR-1400 — un avanzado diseño PWR evolucionado a partir del System 80+ estadounidense, que es la base para el Reactor de la Siguiente Generación Coreano (Korean Next Generation Reactor, KNGR)
VVER-1200/392M (PWR) — basado en el diseño del AES-2006 con principalmente características de seguridad pasiva. Rusia
VVER-1200/491 (PWR) — basado en el diseño del AES-2006 con principalmente características de seguridad activas, comercializado internacionalmente como el MIR.1200. Rusia
EU-ABWR — basado en el ABWR con producción de energía incrementada y cumpliendo con los estándares de seguridad de la Unión Europea

9 SEGURIDAD NUCLEAR

9.1 Definición de Seguridad Nuclear:

"Conjunto de normas, condiciones y prácticas que tienen por objeto la protección de las personas, los bienes y el medio ambiente contra los riesgos radiológicos derivados del uso de la energía nuclear, de los materiales radiactivos y de otras fuentes de radiaciones ionizantes" (1)

Se entiende habitualmente que la seguridad nuclear y radiológica está referida tanto a las condiciones normales de operación de una instalación, como a la prevención de situaciones de accidentes, desde el diseño de la instalación, así como a la actuación en caso de emergencia y a la mitigación de los efectos nocivos en caso de ocurrencia.

9.2 El sistema de seguridad nuclear

El régimen de seguridad nuclear en el mundo se rige a partir de la Convención de Seguridad Nuclear, CSN, (ver capítulo 4) de la cual Chile es parte.

Por lo tanto es vinculante en sus consideraciones para la legislación y reglamentación que se disponga en el país. Entre los principios básicos está que el Estado posea una institucionalidad política, técnica, normativa y administrativa adecuadas para la autorización, licenciamiento, inspección que garantice la operación segura de las centrales nucleares, independiente de las entidades explotadoras de las centrales. Esta institucionalidad, se compone de un nivel operativo que se denomina genéricamente "organismo regulador", el que soporta a la "Autoridad licenciadora", debe estar separado o "independiente" de la entidad explotadora de la central; sin perjuicio de la connotación que a esta condición pueda dársele, ya que en algún punto de la organización del Estado se produce convergencia entre ambas funciones, de regulador y la de explotador de la central[21].

La CSN establece obligaciones y responsabilidades para el Estado, para la autoridad en seguridad y para el explotador, por lo que todas las partes deben servir adecuadamente la ley, normas y reglamentación aplicables. El alcance de la CSN se complementa con las convenciones sobre el ciclo del combustible de Seguridad en la Gestión del Combustible gastado y la Convención de Seguridad en la Gestión de

[21] En los **Estados Unidos** existe la **Nuclear Regulatory Commission** (NRC), que controla el diseño y la operación de los reactores a través de los reglamentos del Code of Federal Regulations. **En China la Atomic Energy Authority** es responsable de la gestión de la seguridad nuclear, del control del material nuclear y los residuos radioactivos. La **National Nuclear Safety Administration** provee supervisión independiente de todas las instalaciones nucleares civiles. **En Francia l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN)**, es una subsidiaria del Ministerio de Industria y Salud Ambiental, que regula la seguridad nuclear y la protección radiológica. **Rusia: El Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Oversight** nació hace 10 años de la fusión del Federal Inspectorate for Nuclear and Radiation Safety (Gosatomnadzor o GAN) y otros organismos federales.

los Residuos Radiactivos, así como con la Convención conjunta de Pronta Notificación y la de Asistencia en caso de accidente radiológico.

Es relevante que el Estado a través de su Gobierno debe rendir cuentas periódicamente a la comunidad internacional en el seno del OIEA respecto del funcionamiento del sistema de seguridad nuclear en el país. La aplicación de la CSN se complementa con la Convención de Protección Física de Instalaciones y Materiales Nucleares y con los acuerdos de Salvaguardias, hoy Protocolo Adicional, todos suscritos por Chile y por lo tanto, vigentes en el país.

En razón de los accidentes connotados ocurridos en centrales nucleares (Three Mile Island, Estados Unidos; Chernobyl, Ucrania, ex Unión Soviética; Fukushima Daichii, Japón), aparte de los numerosos exámenes nacionales a estos de muchos países, desde el OIEA los países han revisado integralmente las consideraciones en torno a cómo incrementar la seguridad de las centrales en el mundo, desde el diseño, el licenciamiento y la operación de las mismas.

Esto, hace perentorio que Chile esté al tanto de estos desarrollos y en condiciones de procesar la información y de generar las directrices y acciones consecuentes, acorde con su propia realidad. Esto, le corresponde naturalmente asumir al Estado a través de la o las instituciones correspondientes.

9.3 Rol del Estado

La Convención de SN postula la existencia de una institucionalidad regulatoria de alcance estatal que abarque a todas las actividades que se desarrollen en los campos de las irradiaciones o uso de fuentes radiactivas, sea en uso en I&D, clínico o industrial, como frente a instalaciones nucleares, con autoridad, independencia, capacidades profesionales y tecnológicas y recursos para sus funciones, así como un marco legal y normativo efectivo. La intervención de la autoridad regulatoria es desde el diseño hasta el desmantelamiento de una instalación.

La realidad muestra que los países se dan distintas fórmulas de organizar esta institucionalidad, en que se busca que la autoridad licenciadora posea un alto nivel en la administración del Estado, con decisiones de carácter colegiado, es decir, nunca sujeta a decisiones unipersonales, incluso en estados con reinos. Esta autoridad se apoya en una organización ejecutiva del marco legal y reglamentario y autónomo en materias de inspecciones y fiscalización, con facultades sancionadoras y de intervención plena sobre el explotador (órgano regulador).

En nuestro país, la legislación nacional determina la existencia de 3 entidades con funciones licenciadoras o de autorización y regulatorias: el ministerio de Salud a través de ISMA para equipos e instalaciones de 3ª. Categoría, la CCHEN para los de 2ª. Categoría, o sea, aquellos de mayor potencia radiactiva, incluyendo sus propias instalaciones, y el Ministerio de Energía para centrales nucleares y fábricas de combustible para reactores nucleares de potencia. En este último caso, es una designación nominal ya que no se tienen, ni se han necesitado, instrumentos legales

específicos ni reglamentos. De aquí se desprende una situación anómala en dos dimensiones: más de una autoridad regulatoria y con distintos niveles jerárquicos, y la dualidad de la CCHEN como regulador y operador de sus propias instalaciones. Cabe hacer notar también la particularidad en la clasificación de categorías de las fuentes e instalaciones.

La experiencia internacional recomienda que la constitución de una autoridad regulatoria nacional es una decisión temprana frente a la posibilidad de incorporar la núcleo-electricidad, sin perjuicio de los ineludibles arreglos que merece la situación actual en Chile al respecto, como se ha descrito. Es decir, corresponde ahora analizar conformación de una autoridad regulatoria nacional que resolviendo la anormalidad actual, sirva luego como base para dicha función frente a un eventual programa nuclear de potencia.

10 REQUERIMIENTOS DE CAPACIDADES TECNOLOGICAS Y PROFESIONALES

Para enfrentar un programa nuclear de potencia (PNP) un país requiere conformar capacidades profesionales en múltiples disciplinas, dependiendo de la etapa de desarrollo de aquél, es decir, si es en fases de proyecto, léase ingeniería básica, de proyecto y de detalles, o en fase de construcción, y finalmente para la operación u explotación de la(s) planta(s), junto con la formación de capacidades profesionales y tecnológicas en la parte regulatoria de seguridad nuclear.

La viabilidad de un PNP pasa por establecer si el país está en condiciones y dispuesto a afrontar los requerimientos de recursos humanos y capacidades tecnológicas que aquello impone, partiendo de la base que al momento de analizar dicha viabilidad el país, lógicamente, carezca de todas las capacidades requeridas, por su especificidad; es decir, habrá que preparar los cuadros profesionales. El error es que por no tenerlos ya, un PNP se hiciese no analizable.

Para realizar el análisis respectivo será relevante conocer y recibir información comparada de diferentes experiencias de otros países, así como la que el OIEA dispone y que es una fuente importante de información, y así establecer la factibilidad de afrontar este paso.

En lo esencial, demuestra la conveniencia que para etapas previas a la decisión de adoptar un PNP se recomienda una secuencia lógica de fases progresivas de desarrollo para evaluar la adopción de la tecnología nuclear en un país

La evaluación acerca de la provisión de recursos humanos y de infraestructura básica para conducir un PNP debe acometerse en esta etapa para dimensionar el esfuerzo formativo requerido. El OIEA ha editado documentos y estudios relacionados con esta materia[22]

[22] Basic Infrastructure for a Nuclear Power Project, IAEA-TECDOC 1513, 2006

A título informativo, el mismo OIEA reúne información de la cantidad y tipos de profesionales que puede exigir la operación segura de reactores nucleares, proponiendo casos de 1 y de 2 reactores iguales en el mismo emplazamiento, en que el número de profesionales en 43 áreas de trabajo, oscila entre 700 y 1200 personas, respectivamente[23].

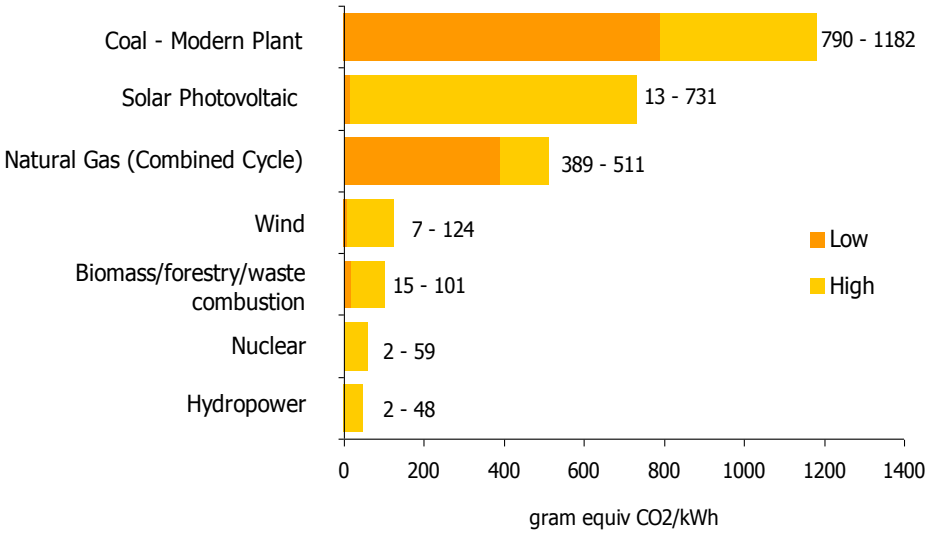
11 IMPACTOS AMBIENTALES

11.1 Enfoque del problema

Los impactos ambientales de una tecnología usada para producción de electricidad deben tomar en cuenta sus efectos desde la obtención del recurso energético hasta la disposición final de sus residuos, e incluso el desmantelamiento de la planta generadora de electricidad, lo cual es llamado el ciclo de desarrollo de la tecnología. En este sentido, es importante establecer en qué etapas cada tecnología provoca sus efectos sobre el medioambiente y sobre las personas, y la efectividad y costo de las medidas de prevención y mitigación.

La evaluación ambiental de un proyecto nuclear se debe someter a la normativa aplicable como a toda industria, además de lo específico relacionado con los materiales radiactivos que emplea o genera.

La figura 11.1 muestra la contribución específica de CO_2 de las tecnologías más usadas para producción de electricidad, en que es posible constatar el bajo valor de la energía nuclear, inferior a 59 [g eq/kWh], similar a la hidroelectricidad, habida cuenta que una central nuclear no produce CO_2 en su operación, por lo que dicho valor viene dado primordialmente de etapas anteriores correspondientes del ciclo del combustible, como de la fabricación del reactor.

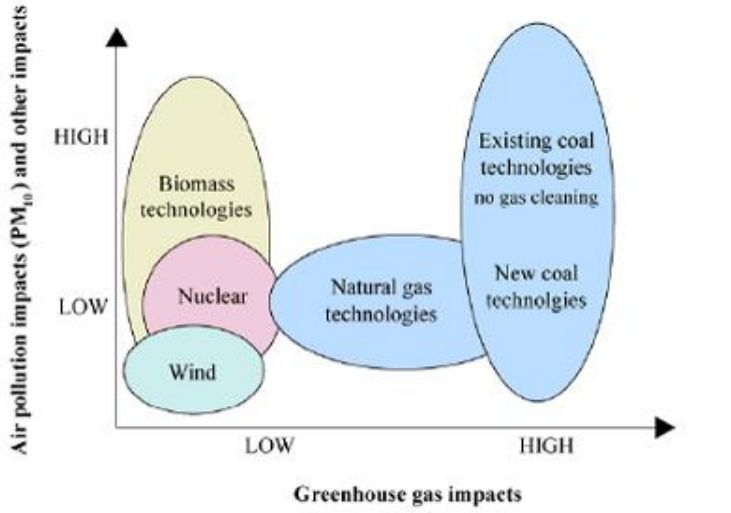


[23] Workforce required for New Nuclear Power Programmes, IAEA Nuclear Energy Series NG-T-3.3

Frans H. Koch. International Energy Agency

Figura 11.1 Generación de CO2 diferentes tecnologías

Lo anterior, conduce a que en una consideración global, la tecnología nuclear es de bajo impacto en la producción de GEI, como se ve en la figura 11.2. Desde luego, ha existido mucha discusión a nivel de Panel Internacional del Cambio Climático (IPCC, siglas en inglés) de si la energía núcleo-eléctrica puede o no ser un "mecanismo de desarrollo limpio", lo que está cuestionado por los accidentes ocurridos en las centrales de Chernobyl y Fukushima. Como sea, en condiciones de funcionamiento normales, la opción nuclear resulta amistosa con el medio ambiente.



Relative environmental impacts from emissions of different electricity generating technologies (European Commission 2003).

Figura 11.2 Impactos de gases efecto invernadero, GEI, distintas tecnologías

11.2 La Gestión de los desechos radiactivos de los reactores nucleares de potencia

En cuanto a los residuos de las plantas nucleares, la principal preocupación se deriva del combustible gastado post empleo en el reactor, para cuya gestión la tecnología está disponible y su disposición final: almacenamiento temporal en piscinas refrigeradas, almacenamiento en seco, encapsulamiento y disposición transitoria en contenedores especiales, tratándose de ciclo abierto del combustible. En caso de ciclo cerrado, el combustible gastado pasa a etapas de reciclado en que se separa el uranio remanente y el plutonio producto de la transformación de parte del uranio, de los productos de la fisión del uranio retenidos en el mismo combustible. Estos últimos dan origen a los desechos de alta actividad que se

inmovilizan en matriz de vidrio, encapsulan y disponen finalmente en repositorios geológicos de profundidad.

Eso, es lo actual, sin embargo la comunidad científica nuclear internacional trabaja en el desarrollo de tecnologías de transmutación de los desechos destruyendo los átomos radiactivos, reduciendo el tiempo de decaimiento radiactivo y abandono de su condición de desecho radiactivo en forma más temprana.

Sin perjuicio de lo anterior, se ha generado en la comunidad nuclear internacional con el apoyo del OIEA, el concepto de "nuclear fuel leasing" (NFL) consiste en que un país A provee combustible nuclear, bajo un contrato de leasing, al país B que inicia un programa de reactores nucleares. El país receptor usa el combustible en su reactor, luego de un decaimiento inicial necesario devuelve el combustible quemado al país A, quien se hace cargo de las etapas del reciclado.

El NFL ofrece ventajas múltiples: de partida, mejora las medidas para evitar la proliferación de materia prima para armas nucleares; las inversiones para almacenar por largo tiempo el combustible usado son menores; aumenta la eficiencia de las reservas mundiales de combustible nuclear, y mejora la aceptación pública de la energía nuclear en los países receptores. La desventaja es el aumento de la tasa de transporte entre naciones de material nuclear.

De allí que, el Estado no puede ser neutral respecto de las tecnologías de los reactores y del ciclo de combustible. Así ha sido y sigue siendo en todos los países nucleares, lo que se explica en que el país deberá ponderar el tipo de ciclo de combustible también en relación con la gestión del combustible gastado, y optimizar el acceso al combustible nuclear no sólo como una cuestión de costo económico, sino de definición política.

Santiago, Septiembre 2015

Anexo I.

Instrumentos Jurídicos relacionados con la Energía Nuclear

2.1 Tratados

i. Tratado para la Prohibición de armas nucleares en la región de América Latina y el Caribe , o más conocido como Tratado de Tlatelolco (1967)

Este instrumento declara a la región de AL y EC libre de armas nucleares, sea de propia fabricación, compra, internación, traspasos, etc. Con esto, AL y EC es la única zona libre de armas nucleares en el mundo (ver fig.1).

El organismo encargado de vigilar el cumplimiento de este tratado es la Organización para prohibición de Armas Nucleares en AL y EC (OPANAL). Chile es parte de este tratado desde 1974.

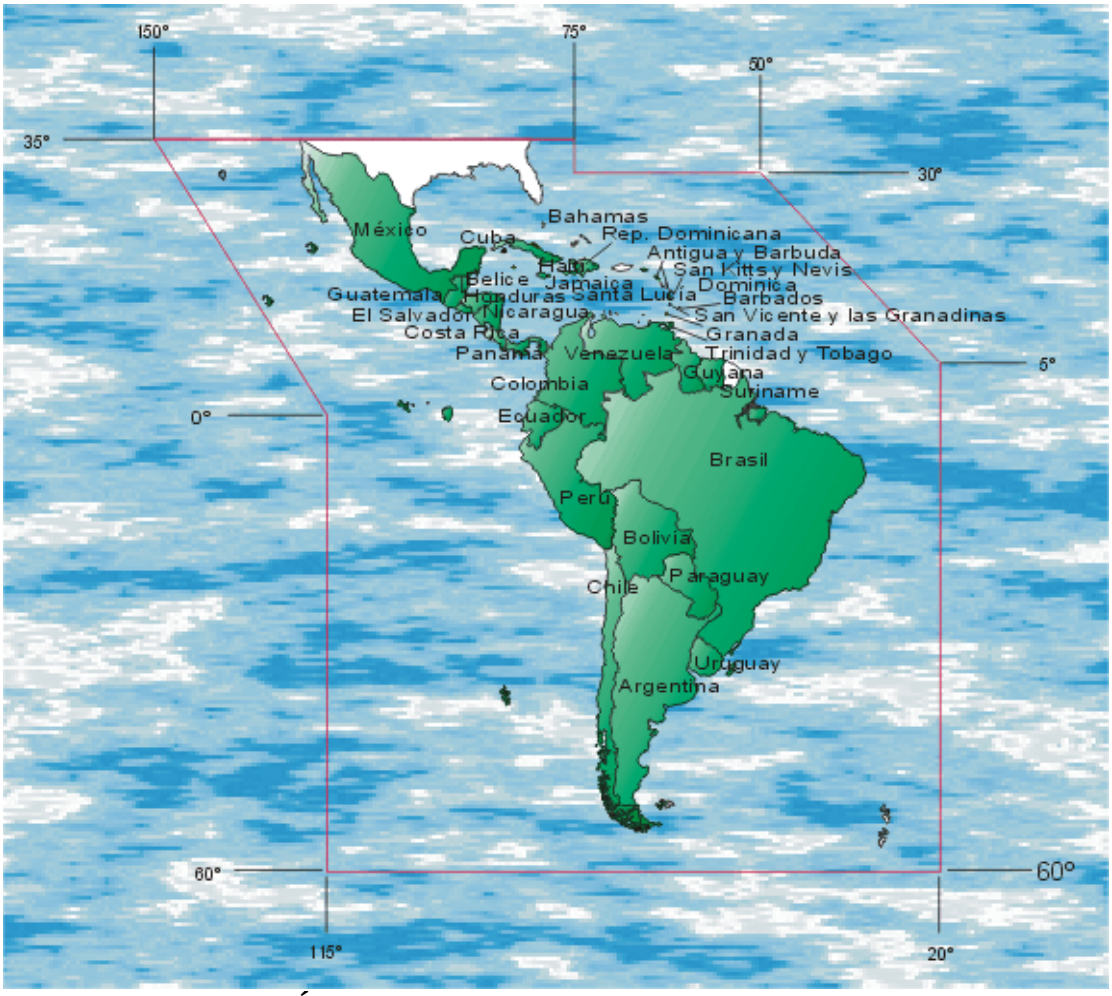


Fig. I.1. Área de aplicación del tratado de Tlatelolco

ii. Tratado de No Proliferación de Armas Nucleares (1968, TNP, o NPT siglas en inglés)

Es el instrumento que distingue a los Estados poseedores de armas nucleares antes del año 1967 (Estados Unidos de NA, Federación Rusa, Francia, Reino Unido y República

Popular China) estableciéndose para ellos derechos distintivos respectos de los países no poseedores de armas nucleares. A estos se les prohíbe el acceso a ésas: no proliferación, y sí todo el derecho a hacer uso pacífico de la energía nuclear. De igual manera, se obliga a los Estados a la suscripción de acuerdos de salvaguardias con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Chile suscribió este tratado en 1995. El organismo en el que radica la vigilancia del servicio de este tratado es el Consejo de Seguridad de Naciones Unidas. Quedan 3 estados sin firmar este TNP: Israel, Corea del Norte y Pakistán, India lo firmó recientemente. En concreto, este instrumento cuida de restringir el acceso de países a tecnologías sensibles como es enriquecimiento de uranio, obtención y manejo de plutonio producido en reactores nucleares, así como del manejo seguro y conocido de estos materiales nucleares en los Estados.

iii. Tratado para la Prohibición completa de ensayos nucleares (siglas en inglés CTBT)

Su objetivo es la prohibición completa en el mundo de realizar ensayos nucleares, es decir, explosiones de artefactos nucleares. Ha establecido redes de vigilancia en distintas tecnologías (infrasonido, sismológicas, hidroacústicas e hidrofónicas y radiactividad ambiental) en diversos países del planeta, entre ellos Chile. Este tratado aún no entra en vigencia, sin embargo, las estaciones de monitoreo han sido instaladas.

2.2 Acuerdos de Salvaguardias con el OIEA

Derivados del TNP, el OIEA ha elaborado estos instrumentos que en lo esencial persiguen asegurar que los Estados realizan sus actividades con fines de uso pacífico y que los materiales nucleares son declarados por el Estado, y el OIEA posee atribuciones de contabilidad y verificación cuantitativa y cualitativa de dichos materiales, léase uranio y plutonio. Para ello, el Estado miembro del OIEA se obliga a facilitar el acceso a los inspectores del OIEA a toda instalación declarada por el Estado. Esto, se rige en Chile por el instrumento del OIEA denominados INFCIRC 66. Rev2. e INFCIRC 153.

A partir de 2001, derivado de situaciones de denuncias de desvío de material nuclear ocurridos en Corea del Norte e Irak, se han extremado estas atribuciones del OIEA, a través del llamado Protocolo Adicional de Salvaguardias que le permite o faculta al OIEA a realizar inspecciones a cualquier instalación, escogida por éste, ubicada en el territorio de un Estado en donde haya actividades nucleares declaradas o se sospeche que exista material nuclear y/o alguna tecnología usable o relacionada con actividades no declaradas de enriquecimiento de uranio o reprocesamiento de combustible gastado y recuperación de plutonio.

El Protocolo Adicional de Salvaguardias persigue *asegurar que en el Estado no hay materiales ni instalaciones no declaradas, asegurando que la declaración del país es fiel y completa*. Chile lo firmó en 2005, hasta ahora afectan, exclusivamente a las instalaciones de los centros nucleares a cargo de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN). En forma amplia implica:

-Declaración sobre actividades presentes y futuras de actividades de I&D no envueltas con materiales nucleares
-Permitir acceso amplio a instalaciones industriales del país
-Información detallada sobre minas de uranio y torio: ubicación, estado operacional, producción actual y futura
-Información sobre ubicación de procesamiento previsto de desechos de media y alta actividad conteniendo plutonio, uranio con alto enriquecimiento en ^{235}U (HEU) y ^{233}U
-Información sobre actividades nucleares planeadas en un horizonte de 10 años, incluyendo I&D en ciclo de combustible
-Acceso complementario a edificios vecinos a instalaciones nucleares o en otros locales o instalaciones, incluso con aviso de sólo 24h

2.3 Convenciones con el OIEA

Se trata de instrumentos elaborados por el OIEA para la adhesión voluntaria de los Estados Miembros (EM), referidos a aspectos específicos y que para el país signatario implica disponer de capacidades tecnológicas, reglamentarias e institucionales adecuadas para su implantación. Todas ya han sido suscritas por Chile en distintas fechas, y la interlocución con el OIEA es a través del ministerio de Relaciones Exteriores y de la CCHEN. Cabe hacer notar que estos instrumentos subordinan a la legislación nacional.

i. Convención sobre Protección Física de Materiales Nucleares

Este instrumento en vigencia desde 1994, regula las medidas que un Estado debe adoptar para asegurar la debida protección en su territorio de materiales nucleares. En el último tiempo, se han actualizado sus medidas después de los atentados terroristas en Estados Unidos y Europa. Obliga a los estados a contar con capacidades institucionales, tecnológicas e instrumentales para cumplir con la vigilancia de los materiales y las instalaciones nucleares. El OIEA junto con dar asistencia a los estados requirentes, verifica estas condiciones en terreno. Chile ha suscrito esta Convención en 1994

ii. Convención conjunta sobre Pronta notificación de accidentes radiactivos y sobre Asistencia en caso de accidente nuclear o emergencia radiológica

Son instrumentos que se derivan del accidente de Chernobyl. La primera, se refiere a la obligación de un Estado miembro del OIEA de avisar al OIEA y a los estados vecinos que puedan verse afectados de todo y cualquier accidente ocurrido en su territorio.

La otra, se refiere a la coordinación de la respuesta y asistencia que el OIEA y otros estados pueden prestar al estado afectado.

En Chile, los efectos directos de la aplicación de estos instrumentos se verificaron con ocasión del accidente radiológico en la planta celulosa CELCO de Nueva Aldea, Ñuble (diciembre 2005). Fue suscrita por Chile en ese mismo año.

iii. Convención de Seguridad Nuclear

Este instrumento también se deriva del accidente de Chernobyl, y su alcance está destinado a establecer un foro internacional de efectivo intercambio de información entre los estados sobre el ejercicio de la seguridad nuclear en los estados con centrales nucleares de potencia. En forma periódica bianual, los Estados rinden sendos informes respecto de las condiciones de seguridad de sus instalaciones nucleares, los que son sometidos a examen de todos los demás estados, quienes hacen sus observaciones que deben ser respondidas y discutidas en el seno de la reunión bianual, en la sede del OIEA.

El Estado debe responder a esta convención sin importar el tipo de propiedad que tengan las instalaciones en su territorio, lo que implica un nivel de subordinación a estos instrumentos por parte de los explotadores de centrales nucleares, y a contar con marcos regulatorios e institucionales y capacidades tecnológicas apropiadas tanto por el explotador como por el regulador nuclear (ver capítulo 10 sobre seguridad nuclear).

Chile que suscribió esta convención (1997) no obstante carecer de centrales nucleares de potencia se hizo por ser vecino de un país con centrales nucleares de potencia (Argentina), lo que nos permite conocer los aspectos de seguridad de los reactores nucleares vecinos

iv. Otras Convenciones

Son instrumentos no asociados al OIEA, pero complementarios a los antes mencionados. Son: Convención de Viena, Convenio de París y enmiendas de la Convención de Bruselas que dicen relación con responsabilidad civil en accidentes y fondos internacionales para indemnización sobre seguros privados y garantías estatales sobre daños nucleares de cualquier tipo, a las que Chile ha suscrito parcialmente (ver referencia Estudio Requerimientos de adecuaciones Marco Legal ante la Eventual Incorporación dela Energía Nuclear de Potencia, Consorcio Fundación de Derecho, U. de Chile / Barros & Errázuriz Abogados, 31 marzo 2010)

v. Grupo de Países suministradores de Tecnologías Nucleares (**Nuclear Suppliers Group, NSG)**

Son 46 estados agrupados con el fin de establecer condiciones para la transferencia de tecnologías y componentes de plantas nucleares entre estados poseedores de tecnologías y países receptores.

El NSG establece condiciones, más bien restricciones, para la transferencia – exportación de equipos y tecnologías sensibles nucleares (*de "doble uso": enriquecimiento y reprocesamiento*), de modo de mantener en cantidad reducida los países con capacidades en estas tecnologías, en el marco del tratado de No Proliferación Nuclear. Por ello, el Estado, su gobierno, de un país nuevo receptor de tecnologías para reactores y combustible nucleares, es inducido a suscribir compromisos explícitos de adhesión a política de no proliferación nuclear; esto es, a no producir en su territorio material nuclear para armas atómicas, sea uranio altamente enriquecido y plutonio.

2.4. Acuerdos de Cooperación entre Gobiernos

Como consecuencia de las condicionantes que se derivan de los tratados, de la membresía al NSG, de los acuerdos de salvaguardias con el OIEA, es muy frecuente además, la necesidad de concertar acuerdos entre gobiernos de cooperación en el uso pacífico de campo de la energía que habiliten el intercambio comercial de componentes de reactores, de combustible nuclear, de tecnologías. El caso más representativo es Estados Unidos, cuyo gobierno requiere además la aprobación del Congreso para hacer efectivo un acuerdo de cooperación con otro Estado. Chile no posee acuerdo con este país. Sí se tienen acuerdos de cooperación con Argentina, Brasil, Uruguay, Corea del Sur, Federación Rusa, España, Francia, entre otros.

Anexo II.

II.1 Estudios comparativos de costos para diferentes opciones tecnológicas usadas en el mundo

Tabla II.1.1 Costos de inversión "overnight" de varias tecnologías en diversos países (OECD 2010).

Tipos de Reactores Nucleares	Costo overnight [US$/kW] (*)
Corea del Sur, APR 1400	1556
Japón, ABWR	3009
Estados Unidos, Gen III+ (**)	3382
Francia, EPR Flamanville	3860
Suiza, EPR	3863
Promedio mundial	**4100**
Bélgica, Holanda, Republica Checa y Hungría	>5000
China	1748 a 2302
F. Rusa, VVER 1150	2933
EPRI	2970
Eurelectric	4724
Carbón	
OECD Carbón tradicional	807 a 2719
OECD Carbón con CC	3223 a 5811
OECD Lignito	1802 a 3485
Otras tecnologías	
OECD Gas natural	635 a 1747
OECD Eólica terrestre	1821 a 3716

Fuente: OECD 2010 (*): Overnight costs were defined here as EPC, owner's costs and contingency, but excluding interest during construction. EPC = Engineering, Procurement, Construction. This shows the levelised cost, which is the average cost of producing electricity including capital, finance, owner's costs on site, fuel and operation over a plant's lifetime.
(**)EPRI (USA) gave US$2970/kW for APWR or ABWR, Eurelectric gave US$4724/kW for EPR.

Tabla II.1.2
OECD electricity generating cost projections for year 2010 on - 5% discount rate, [c/kWh]

Country	Nuclear	Coal	Coal with CCS	Gas CCGT	Onshore wind
Belgium	6.1	8.2	-	9.0	9.6
Czech R	7.0	8.5-9.4	8.8-9.3	9.2	14.6
France	5.6	-	-	-	9.0
Germany	5.0	7.0-7.9	6.8-8.5	8.5	10.6
Hungary	8.2	-	-	-	-
Japan	5.0	8.8	-	10.5	-
Korea	2.9-3.3	6.6-6.8	-	9.1	-
Netherlands	6.3	8.2	-	7.8	8.6
Slovakia	6.3	12.0	-	-	-
Switzerland	5.5-7.8	-	-	9.4	16.3
USA	4.9	7.2-7.5	6.8	7.7	4.8
China*	3.0-3.6	5.5	-	4.9	5.1-8.9
Russia*	4.3	7.5	8.7	7.1	6.3
EPRI (USA)	4.8	7.2	-	7.9	6.2
Eurelectric	6.0	6.3-7.4	7.5	8.6	11.3

* For China and Russia: 2.5c is added to coal and 1.3c to gas as carbon emission cost to enable sensible comparison with other data in those fuel/technology categories, though within those countries coal and gas will in fact be cheaper than the Table above suggests.
Source: OECD/IEA NEA 2010, table 4.1.

B. A 2004 report on *The Economic Future of Nuclear Power* from the University of Chicago, funded by the US Department of Energy, compared the levelised power costs of future nuclear, coal, and gas-fired power generation in the USA. Various nuclear options were covered, and for an initial ABWR or AP1000 they range from 4.3 to 5.0 [c/kWh] on the basis of overnight capital costs of US$1200 to US$1500/kW, 60 year plant life, 5 year construction and 90% capacity. Coal gives 3.5 - 4.1 [c/kWh] and gas (CCGT) 3.5 - 4.5 [c/kWh], depending greatly on fuel price.

The levelised nuclear power cost figures include up to 29% of the overnight capital cost as interest, and the report notes that up to another 24% of the overnight capital cost needs to be added for the initial unit of a first-of-a-kind advanced design such as the AP1000, defining the high end of the range above. For more advanced plants such as the EPR or SWR1000, overnight capital cost of US$1800/kW is assumed and power costs are projected beyond the range above. However, considering a series of eight units of the same kind

and assuming increased efficiency due to experience which lowers overnight capital cost, the levelised power costs drop 20% from those quoted above and where first-of-a-kind engineering costs are amortised (eg the US$1500/kW case above), they drop 32%, making them competitive at about 3.4 [c/kWh].

Tabla II.1.3 Nuclear plant: projected electricity costs [c/kWh]

Overnight capital cost [$/kW]		**1200**	**1500**	**1800**
First unit	7 yr build, 40 yr life	5.3	6.2	7.1
	5 yr build, 60 yr life	4.3	5.0	5.8
4th unit	7 yr build, 40 yr life	4.5	4.5	5.3
	5 yr build, 60 yr life *	3.7	3.7	4.3
8th unit	7 yr build, 40 yr life	4.2	4.2	4.9
	5 yr build, 60 yr life *	3.4	3.4	4.0

* calculated from above data

C. In 2013 the **Nuclear Energy Institute** announced the results of its financial modelling of comparative costs in the USA, based on figures from the US Energy Information Administration's 2013 Annual Energy Outlook. NEI assumed 5% cost of debt, 15% return on equity and a 70/30 debt equity capital structure. The figures are tabulated below. The report went on to show that with nuclear plant licence renewal beyond 60 years, power costs would be $53-60/MWh.

Tabla II.1.4 NEI 2013 Financial Modelling

	EPC cost	**Capacity**	**Electricity cost, [US$/MWh]**
Gas combined cycle, gas @ $3.70/GJ	$1000/kW	90%	44.00
Gas combined cycle, gas @ $5.28/GJ	$1000/kW	90%	54.70
Gas combined cycle, gas @ $6.70/GJ	$1000/kW	90%	61.70
Gas combined cycle, gas @ $6.70/GJ, 50-50 debt-equity	$1000/kW	90%	70
Supercritical pulverised coal, 1300 MWe	$3000/kW	85%	75.70
Integrated gasification combined cycle coal, 1200 MWe	$3800/kW	85%	94.30

Nuclear, 1400 MWe (EIA's EPC figure)	$5500/kW	90%	121.90
Nuclear, 1400 MWe (NEI suggested EPC figure)	$4500-5000/kW	90%	85-90
Wind farm, 100 MWe	$1000/kW	30%	112.90

5% cost of debt, 15% return on equity and a 70-30 debt equity capital structure.

II.2 Efectos ambientales y tecnológicos en Economía de Generación distintas tecnologías

Tabla II.2.1 Comparación del Costo Medio Anual estimado para centrales nucleares y a carbón y gas natural [USD/MWh]

Tasa de descuento (%):	**8**	**10**
Costo medio anual del MWH:	**[US$/MWh]**	
Esc. (i): Central núcleo-eléctrica PWR de 1100 MW	**85**	**98**
Esc. (ii): Central a carbón de 3x350 MW (3 unidades)	95	90
Penalización de las emisiones de GEI del carbón	12	12
Total	**107**	**102**
Esc. (ii): Central de C.C. a gas de 3x350 MW (3 unidades)	102	96
Penalización de las emisiones de GEI del Gas natural	6	6
Total	**108**	**102**

Tabla II.2.2 Parámetros técnicos de centrales núcleo-eléctricas para evaluación económica

Potencia Nominal [MW]	1100	1400	1600
Factor de planta anual (%)	90	90	90
Generación Eléctrica Anual [GWH]	8.678	11.045	12.623
Rendimiento Térmico (%)	32	32	32
Energía térmica de primera carga [GWH térmico]	81.356	103.545	118.341
Energía térmica de cada recarga [GWH térmico]	55.450	34.515	39.447
Periodo de recarga	2 años	2 años	2 años
Duración de la recarga	2 meses	2 meses	2 meses
Energía eléctrica disponible en cada recarga de combustible [GWh]	8.678	11.045	12.623

Tabla II.2.3 Parámetros económicos de centrales nucleares y centrales a carbón y gas

	Nuclear 1100 MW	**Nuclear 1400 MW**	**Nuclear 1600 MW**	**Carbón 350 MW**	**Gas C. C. 350 MW**
Inversión Overnight [US$/kW]	5000 a 6000	5000 a 6000	5000 a 6000	2500	2500
Desmantelamiento [US$ millones]	500	500	500	90	90
O&M anual [US$millón]	84	105	120	42	42
Costo primera carga [US$ millón]	120	152	175	278 (*)	Consumo continuo
Costo de recarga [US$ millón/año]	40	51	59	1.110	240 (**)
Emisión anual de CO_2 Equivalente [ton/MWh]	0	0	0	1,2	0,6
Rendimiento térmico (%)	32	32	32	35	55
Generación eléctrica anual [GWh)	8.678	11.045	12.623	2.761	2.761
Costo del carbón puesto en la central [US$/ton]	--	--	--	80 a 120	--
Poder calorífico del carbón [kCal/kg]	---	---	---	6000	---
Costo del gas natural puesto en la central [US$/$10^6$ BTU]	---	…	---	---	12 a 16
Duración de la construcción [años)	6	6	6	3	3
Vida Útil [años]	60	60	60	30	30
(*) Costo de 3 meses de stock de Carbón a 100 [US$/ton] para una unidad de 350 MW					
(**) Costo del consumo anual de Gas natural a 14 [US$/$10^6$BTU] de una unidad de 350 MW					

Anexo III.
Costos del Ciclo del Combustible Nuclear

Tabla III.1: COSTO DEL COMBUSTIBLE PARA REACTOR PWR

	UO2 al 3,5%	UO2 al 5,0%	Unidades
Parámetros			
U-235 en Uranio Natural	0,71%	0,71%	% en peso
Uranio enriquecido en U-235	3,50%	5,00%	% en atomos
tU-235 en Uranio empobrecido	0,25%	0,25%	% en peso
Trabajo de separación (SWU)	4,73	7,8	SWU/kg de combustible

Uranio Natural	6,955	10,17	kg/kg de combustible
Costos unitarios			
Uranio Natural	80,85	80,85	US$/kg de U
Pasta Amarilla (Yellow Cake)	36,75	36,75	US$/lb U3O8
Conversión U3O8 => UO2	11,75	11,75	US$/kg de U
Enriquecimiento isotópico	88	88	US$/kg de SWU
Costos del combustible			
Materias primas	562,31	822,24	US$/kg de combustible
Unidad de SWU	416,24	1052,95	US$/kg de combustible
Conversión U3O8 => UO2	81,73	81,73	US$/kg de combustible
Fabricación del combustible	200	200	US$/kg de combustible
Costo Total	**1260,28**	**1334,68**	**US$/kg de combustible**

Tabla III.2: Precio de las principales etapas del ciclo de combustible de uranio enriquecido

	1 US$ =	0.88971 €
U_3O_8 Price (lb)	**US$36.75**	**€32.70**
NA Conversion (kgU)	**US$8.00**	**€7.12**
EU Conversion. (kgU)	**US$8.25**	**€7.34**
NA UF_6 Price (kgU)	**U$103.00**	**€91.64**
NA UF_6 Value* (kgU)	**U$104.02**	**€92.55**
EU UF_6 Value* (kgU)	**$104.27**	**€92.77**
SWU (SWU)	**$88.00**	**€78.29**

Fuente: The Ux Consulting Company, LLC, Enero 26, 2015

Anexo IV
Generación Eléctrica en Chile

Tabla IV.1 Tipos de tecnologías usadas en Chile (2014)

Tecnología	SIC [GWh]	SING [GWh]
Biomasa	2.716	0
Carbón	14.287	14.076
Carbón + petcoke	530	0
Cogeneración	0	122
Eólica	1.196	215
Fuel Oil	27	180
Gas Natural	26	1.992
GNL	8.009	0
Hidráulica embalse	13.092	0
Hidráulica pasada	10.350	69
Petróleo diésel	1.605	946
TOTAL	**51.838**	**17.600**

Proyección de Consumo eléctrico

La proyección de la CNE de abril 2015 tiene como base el estudio encargado por ella a Mercados Energéticos Consultores de "Análisis de Consumo Eléctrico en el Corto, Mediano y Largo Plazo", de diciembre de 2014, en que se proyecta la demanda a 30 años.

En éste, junto con proponer modelos de proyección de demanda por sistema eléctrico, de clientes libres y regulados, incorpora efectos de políticas de eficiencia energética, expansiones y nuevos proyectos de grandes usuarios así como nuevas industrias electro intensivas con potencial desarrollo en Chile.

Para el presente análisis hemos considerado la proyección de consumos de la CNE hasta el año 2030 y extendido esa proyección hasta el año 2040, en base al resultado del estudio de Mercados Energéticos Consultores, ajustando sus valores en forma similar a la realizada por CNE para el periodo hasta el 2030.

Los valores (GWh) resultantes son:

Tabla IV.2 Proyección de Consumo eléctrico, [GWh]

AÑO	SIC	SING	SING+SIC
2014	52.207	17.688	69.895
2020	63.895	21.949	87.939
2025	77.582	28.459	107.769
2030	92.093	35.898	128.030
2035	105.977	40.410	146.387
2040	121.187	45.440	166.627

A su vez, la proyección de demanda la estimamos a partir de los factores de carga establecidos por la CNE para cada sistema en la fijación de precios de nudo de abril 2015, los que corresponden a 0,776 para el SIC y 0,87 para el SING. Las demandas proyectadas resultantes (MW) son:

Tabla IV.3 Proyección de Demanda de Potencia.

AÑO	SIC	SING	SING+SIC
2014	7.547	2.372	9.919
2020	9.399	2.880	12.279
2025	11.413	3.734	15.147
2030	13.548	4.710	18.258
2035	15.590	5.302	20.892
2040	17.827	5.962	23.790

Líneas de Transmisión

En el Informe Técnico Definitivo de la Fijación de Precios de Nudo de Corto Plazo de Abril 2015 de la CNE, entre las obras en construcción se incluye:

- Línea Ancoa – Alto Jahuel 2x500 kV, primer circuito a septiembre 2015.
- Línea Ancoa – Alto Jahuel 500 kV, tendido segundo circuito, a enero 2016.
- Nueva Línea Cardones - Maitencillo 2x500 kV, a enero 2018.
- Nueva línea Maitencillo – Pan de Azúcar 2x500kV, a enero 2018.
- Nueva línea Pan de Azúcar – Polpaico 2x500kV, a enero 2018.
- Línea Charrúa – Ancoa 2x500 kV, primer circuito, a febrero 2018.
- Línea 2x500 kV Pichirropulli – Puerto Montt, energizada en 220 kV, a febrero de 2021 (se estima que por los desarrollo de generación en la zona, el cambio a 500 KV de esta línea debería realizarse alrededor del año 2024)

Además, en el plan indicativo se incorpora las obras aprobadas en la Resolución N° 96 de la CNE que corresponde al Plan de Expansión de Obras del Sistema de Transmisión Troncal, periodo 2014 - 2015, el que incluye el proyecto de interconexión entre el Sistema Interconectado Central (SIC) y el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) denominado “Sistema de Transmisión 500kV, Mejillones – Cardones”, entre S/E los Changos y la S/E Nueva Cardones, a partir de enero de 2018.

Asociadas a esta interconexión también considera las siguientes obras asociadas al sistema SING 500 kV, con fechas estimadas de puesta en servicio de enero 2018 y enero 2020:

- Nueva línea 2x500 kV entre S/E Los Changos y S/E Nueva Crucero Encuentro,
- Bancos de Autotransformadores 500/220 kV, SS/EE Nuevo Crucero Encuentro y Los Changos.