



LA ENERGÍA NUCLEAR **NO TIENE FUTURO**

Fundamentos de la oposición del movimiento
ambientalista a la opción núcleo-eléctrica

Rosa Moreno
Sara Larraín

Acuerdo de Chagual

 FUNDACIÓN
HEINRICH
BÖLL

P R O G R A M A
CHILE SUSTENTABLE
Propuesta Ciudadana para el Cambio



I.S.B.N.: 978-956-7889-37-2

Registro de Propiedad Intelectual Nº 165.578

Primera Edición Septiembre 2007

Se imprimieron 1000 ejemplares

Elaboración:

Sara Larraín

Rosa Moreno

Gráficos:

Katherine Navarrete

Diseño de Portada y Diagramación:

Emiliano Méndez

Corrección Ortográfica:

Helmuth Huerta

Impresión:

LOM Ediciones

ESTA PUBLICACION HA SIDO POSIBLE GRACIAS A LA COLABORACION DE LA FUNDACION HEINRICH BÖLL.

Índice

PRESENTACIÓN	5
I. EL CICLO DE VIDA DE LA ENERGÍA NUCLEAR	9
1. PROCESOS PREVIOS A LA GENERACIÓN: DEPENDENCIA DE UN RECURSO NO RENOVABLE	
1.1. Disponibilidad y costos del uranio	11
1.2. Extracción del uranio	15
1.3. Conversión y enriquecimiento y fabricación del combustible	18
1.4. Uso militar del uranio empobrecido	18
2. SUPUESTOS TEÓRICOS Y COSTOS HISTÓRICOS REALES DE LA GENERACIÓN NUCLEAR	
2.1. Costos de inversión y financiamiento	21
2.2. Vida útil de una planta y factor de carga	23
2.3. Costos de Operación	25
2.4. Costos de generación nuclear comparados con otras tecnologías	27
3. LOS COSTOS NO CONSIDERADOS: PROCESOS POSTERIORES A LA GENERACIÓN	
3.1. Procesamiento de desechos	29
3.2. Costos del reprocesamiento de desechos radiactivos	30
3.3. Transporte de materiales radioactivos	32
4. BALANCE AMBIENTAL, ENERGÉTICO Y SOCIAL DE LA OPCIÓN NUCLEAR	
4.1. Balance energético del ciclo de vida	33
4.2. Emisiones de gases con efecto invernadero	36
4.3. La argumentación tecnológica: los reactores “breeder” o reactores reproductores rápidos	39
II. INSUSTENTABILIDAD ECONÓMICA, AMBIENTAL Y POLÍTICA DE LA OPCIÓN NUCLEAR	
1. SUBSIDIOS DIRECTOS E INDIRECTOS DEL ESTADO	41
1.1. Seguros	42
1.2. Seguridad de las instalaciones y del transporte	42
1.3. Inversión científica y tecnológica	42
2. LA GENERACIÓN DE EMPLEOS: COMPARACIÓN CON OTRAS TECNOLOGÍAS	43
3. IMPACTOS Y VULNERABILIDADES AMBIENTALES	44
4. LOS ASPECTOS GEOPOLÍTICOS DEL CICLO DE COMBUSTIBLES	48
5. CONCLUSIONES	51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

Fundamentos de oposición a la núcleo-eléctricidad

Las organizaciones ciudadanas en Chile, y en particular el movimiento ecologista, tienen una larga trayectoria de acción y seguimiento sobre las iniciativas de desarrollo nuclear por parte de gobiernos militares en la región y los impactos generados en el Pacífico Sur por el desarrollo nuclear de otras naciones.

Este trabajo se inició con la campaña binacional de organizaciones chilenas y argentinas contra el proyectado basurero nuclear de Gastre, en la Patagonia argentina, cerca de la frontera con Chile; y el seguimiento a los Tratados de No Proliferación Nuclear (TNP) y de Tlatelolco, en momentos en que Francia insistía en continuar realizando pruebas de armas nucleares en Mururoa, en el Pacífico Sur y los gobiernos militares de Brasil y Argentina desarrollaban aceleradamente programas nucleares, incluyendo enriquecimiento de uranio.

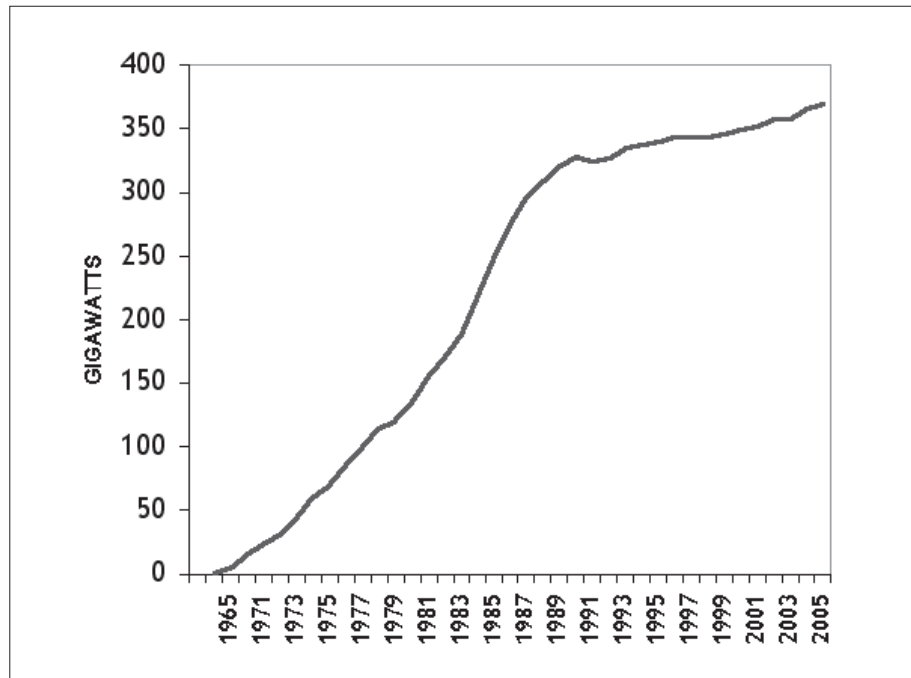
La acción ciudadana también incluyó el seguimiento al programa nuclear militar chileno, desarrollado en el centro nuclear de Lo Aguirre y a los decretos y estudios para el desarrollo del ciclo de combustible y plantas de generación nuclear encargados durante el gobierno militar del general Pinochet.

Dichos intentos, desmantelados durante los gobiernos de transición hacia la democracia, son retomados a fines del gobierno de Ricardo Lagos (2000-2006), el cual, en el contexto de la crisis de abastecimiento eléctrico, anuncia durante su último mensaje al país, el 21 de mayo de 2005, la creación de una comisión de estudio de la opción nuclear.

Este hecho da origen al inmediato rechazo al anuncio por parte del movimiento ecologista, al cual se unen diversas organizaciones y sectores políticos; generándose, durante el período electoral a mediados de 2005, una iniciativa programática que expresa claramente el compromiso de no desarrollar la opción nuclear en la política energética. Esto es refrendado expresamente por los candidatos a la presidencia, lo que particularmente en el caso de Michelle Bachelet, implica no incluir la opción nuclear en su programa de gobierno, y adicionalmente comprometer con el movimiento ecologista el “Acuerdo de Chagual», el cual, en su Número 7, excluye expresamente la opción nuclear de la política energética.

La generación nuclear es una opción energética que no se expande desde fines de la década de los '80 por su incapacidad de resolver el problema de los desechos, la seguridad y los riesgos geopolíticos. Actualmente, luego de treinta años de decadencia de esta forma de generación, se reintentó impulsar el desarrollo núcleo eléctrico como respuesta al calentamiento global generado por los combustibles fósiles, principales emisores de dióxido de carbono.

Capacidad mundial de generación eléctrica
de Plantas de Energía Nuclear, 1960-2005



Fuente: Vital Signs 2006-2007, The Worldwatch Institute en base a datos de la EIA

Este contexto describe un momento de crisis de supervivencia de la industria nuclear, debido a dos razones: la falta de contratos para construir nuevas plantas, y a la inminencia de los plazos para el oneroso desmantelamiento de las centrales que cumplen con su vida útil; los consorcios y gobiernos dedicados a este negocio intentan enérgicamente proponer la opción nuclear como una «alternativa limpia» frente al cambio climático.

Esta alternativa, sin embargo, no ha sido acogida hasta ahora por la comunidad internacional; y en particular la Unión Europea, que lidera las políticas para mitigar el cambio climático, la ha desechado en su estrategia común frente a este desafío, debido a sus impactos ambientales, al rechazo ciudadano y porque no se han resuelto los problemas de seguridad, asociados a la proliferación nuclear y las tensiones geopolíticas.

Los fundamentos de oposición del movimiento ecologista a la opción núcleo-eléctrica en Chile se basan en la insustentabilidad ambiental de esta tecnología, su alto costo económico, los impactos sociales y los riesgos geopolíticos. En el ámbito ambiental, la opción nuclear depende de la extracción del uranio, un recurso no renovable, y genera elementos contaminantes durante todo su ciclo de vida: en la mineración y enriquecimiento del uranio, la generación, el reprocesamiento y la disposición final de desechos altamente radiactivos, los que constituyen pasivos ambientales con requerimiento de resguardo por miles de años. Adicionalmente, esta opción, por generar materiales sensibles que tienen un uso dual para fines civiles y militares, significa un factor de vulnerabilidad geopolítica.

Desde la perspectiva energética, además, su balance es estrecho y se torna en francamente negativo si el uranio utilizado es de baja ley.

En cuanto a los impactos sociales, la opción nuclear genera una atmósfera de inseguridad sólo por el hecho de vivir en la cercanía de instalaciones o transportes de este tipo; también genera depreciación de bienes por los riesgos que implica esta opción y la inexistencia de seguros adecuados. Además, por los requerimientos de seguridad de instalaciones riesgosas, se generan estrictos sistemas de control y un ambiente militarizado. Adicionalmente, en países sísmicos, la amenaza de ocurrencia de estos agrega un riesgo adicional para las poblaciones y el medioambiente cercanos a instalaciones nucleares.

Finalmente, la opción nuclear conlleva riesgos asociados a tensiones políticas entre naciones y mayor vulnerabilidad para la seguridad interna por convertirse en potencial blanco estratégico en caso de conflictos bélicos o acciones terroristas. A ello hay que agregar niveles adicionales de vulnerabilidad económica por potencial contaminación de la cadena alimenticia, la infraestructura y los recursos naturales bases del desarrollo económico.

El debate sobre la opción nuclear se ha reinstalado en Chile en el marco de la actual crisis energética. El país enfrenta actualmente una grave vulnerabilidad energética, particularmente en el sector eléctrico. Esta situación, provocada por una política energética restringida a criterios de mercado y por el abandono del Estado de su rol orientador de la política y desarrollo energético, expresa la urgente necesidad de contar con una política energética consensuada democráticamente y con un plan de desarrollo energético de largo plazo que asegure la seguridad y sustentabilidad ambiental y energética del país.

Chile debe enfrentar integralmente los desafíos de lograr seguridad energética y enfrentar los impactos del cambio climático. La respuesta más eficiente, sinérgica y económica es impulsar fuertemente políticas regulatorias y fiscales para una mayor eficiencia energética y para el aprovechamiento de las fuentes de energías renovables abundantes en Chile. Esta política además contribuirá a enfrentar los actuales problemas de contaminación local y de excesiva dependencia de combustibles importados.

El movimiento ecologista considera urgente y fundamental formular a la brevedad en Chile una política energética y un Plan Maestro de Desarrollo Energético con objetivos de corto, mediano y largo plazo, y en base a criterios de sustentabilidad económica, social y ambiental.

En este contexto, y en respuesta a dirigentes políticos de la Concertación, que utilizando los argumentos de expansión de la demanda energética, escasez de fuentes de energía segura y limpieza de la generación nuclear, han demandado a la presidenta Bachelet la generación de estudios de base para el desarrollo nuclear en Chile, las organizaciones ecologistas, reunidas en el Acuerdo de Chagual, han desarrollado un análisis de la opción nuclear desde un enfoque que incluye el estudio de su ciclo de vida desde la cuna a la tumba; es decir; desde la minería del uranio hasta la disposición final de desechos radiactivos; los costos elevados de inversión; las restricciones en la oferta de uranio; los problemas de seguridad; los impactos ambientales; la evaluación de su balance energético y los riesgos geopolíticos, todos ellos ampliamente reconocidos hoy a nivel mundial.

El análisis realizado, parte importante del cual reproducimos en este libro, nos lleva a la convicción de que la opción núcleo-eléctrica no es una alternativa para el desarrollo energético de Chile y evidentemente tampoco ofrece ninguna solución en la coyuntura de la actual crisis energética.

Dicho trabajo contiene una síntesis de los fundamentos de oposición del movimiento ambientalista a la opción núcleo-eléctrica y fue preparado para ser presentado el 27 de abril de 2007 ante la Comisión de Núcleo-electricidad establecida por la Presidenta Bachelet a fines de 2006, a requerimiento de dirigentes políticos y parlamentarios de la Concertación.

Esta Comisión y su mandato de recomendar estudios para el desarrollo nuclear, vulnera el espíritu de los acuerdos suscritos entre la Presidenta Bachelet y las organizaciones ecologistas, y por ello ha sido fuente de tensiones entre los ecologistas y la Concertación, y también de fuertes diferencias entre parlamentarios al interior del mismo bloque. Sin embargo constituye también un grave error político de la Concertación al no respetar el contenido de su propio programa de gobierno, como asimismo los acuerdos políticos y compromisos programáticos de la Presidenta con los movimientos ciudadanos.

Consideramos que esta Comisión presidencial no debe centrarse en la opción nuclear, sino ofrecer a la Presidenta un estudio comparado de cada una de las opciones de generación eléctrica actualmente disponibles a nivel mundial, en base a su completo ciclo de vida, e incluyendo su balance energético. Este es el único camino, a través del cual el actual y los futuros gobiernos en Chile podrán desechar propuestas provenientes de grupos particulares de interés, como el *lobby* de la industria nuclear en este caso, y optar con fundamento por las mejores alternativas para la seguridad y sustentabilidad del desarrollo energético nacional.

Como aporte a las discusiones sobre el desarrollo energético nacional, y con el objetivo de entregar información actualizada sobre el debate del tema nuclear a nivel internacional, presentamos en este libro, los principales cuestionamientos a la opción núcleo-eléctrica, los cuales constituyen fundamentos ampliamente consensuados por organizaciones científicas y ciudadanas a nivel internacional.

Además de constituir la base de nuestro testimonio ante la Comisión presidencial, esperamos con la difusión de este documento, contribuir a un debate democrático y en profundidad sobre las opciones de desarrollo energético que Chile necesita.

Miembros del Acuerdo de Chagual*
Septiembre de 2007

* Fiscalía del Medio Ambiente, Instituto de Ecología Política, Fundación Terram, Comité de Defensa Flora y Fauna (CODEF), Fundación Sociedades Sustentables, Fundación Bosque Antiguo, Corporación Kairos, Comité de Defensa de Maipú, Consejo Ecológico de Lo Prado, Comité Ecológico La Pintana, Red Nacional de Ecocubles, Movimiento Agroecológico Chileno, Fundación para la Tierra, Defensores del Bosque, Red Nacional de Acción Ecológica, Chadenatur, Programa Chile Sustentable, entre otras.

I.

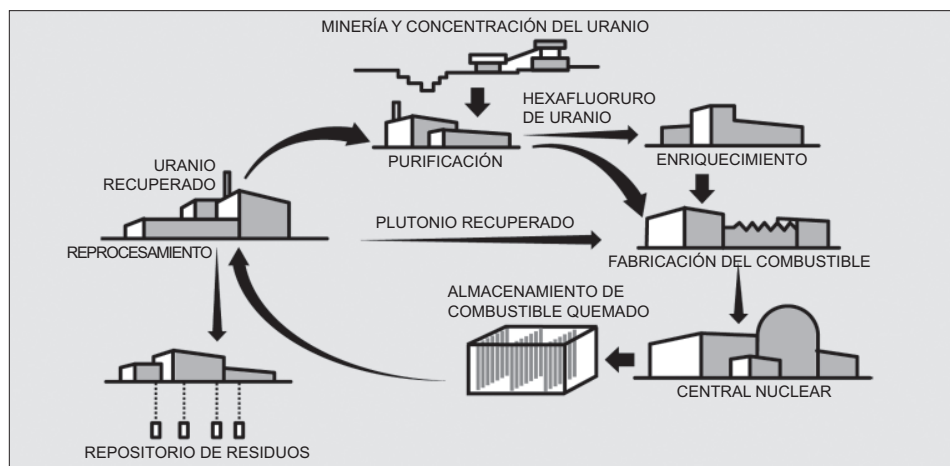
EL CICLO DE VIDA DE LA ENERGÍA NUCLEAR

Una central nuclear, para la mayoría de la población, es una “caja negra”, un gran edificio de concreto que inyecta electricidad a la red, sin utilizar combustibles tradicionales como el petróleo, el gas o el carbón. Sin embargo, técnicamente, una central nuclear no es un sistema aislado, sino parte de una larga cadena de procesos industriales, desde la mineración del uranio (base de su combustible) hasta el desmantelamiento de la central y el tratamiento y disposición final de desechos radiactivos. Muchos de estos procesos no son visibles porque se realizan fuera del lugar de emplazamiento de la central nuclear. Incluso, algunos de estos sólo empiezan a producirse décadas después que el reactor ha dejado de inyectar sus últimos kilovatios a la red.

La generación de electricidad mediante la energía nuclear tiene diversas etapas y cada una de ellas implica diversos procesos industriales:

1. Extracción y minería del uranio.
2. Conversión del mineral en elementos combustibles utilizables por el reactor.
3. Construcción del reactor nuclear.
4. Operación y mantenimiento durante los años de vida útil.
5. Manejo de desechos y el reprocesamiento.
6. Clausura y desmantelamiento del reactor.
7. Confinamiento definitivo de residuos radioactivos en repositorios geológicos.

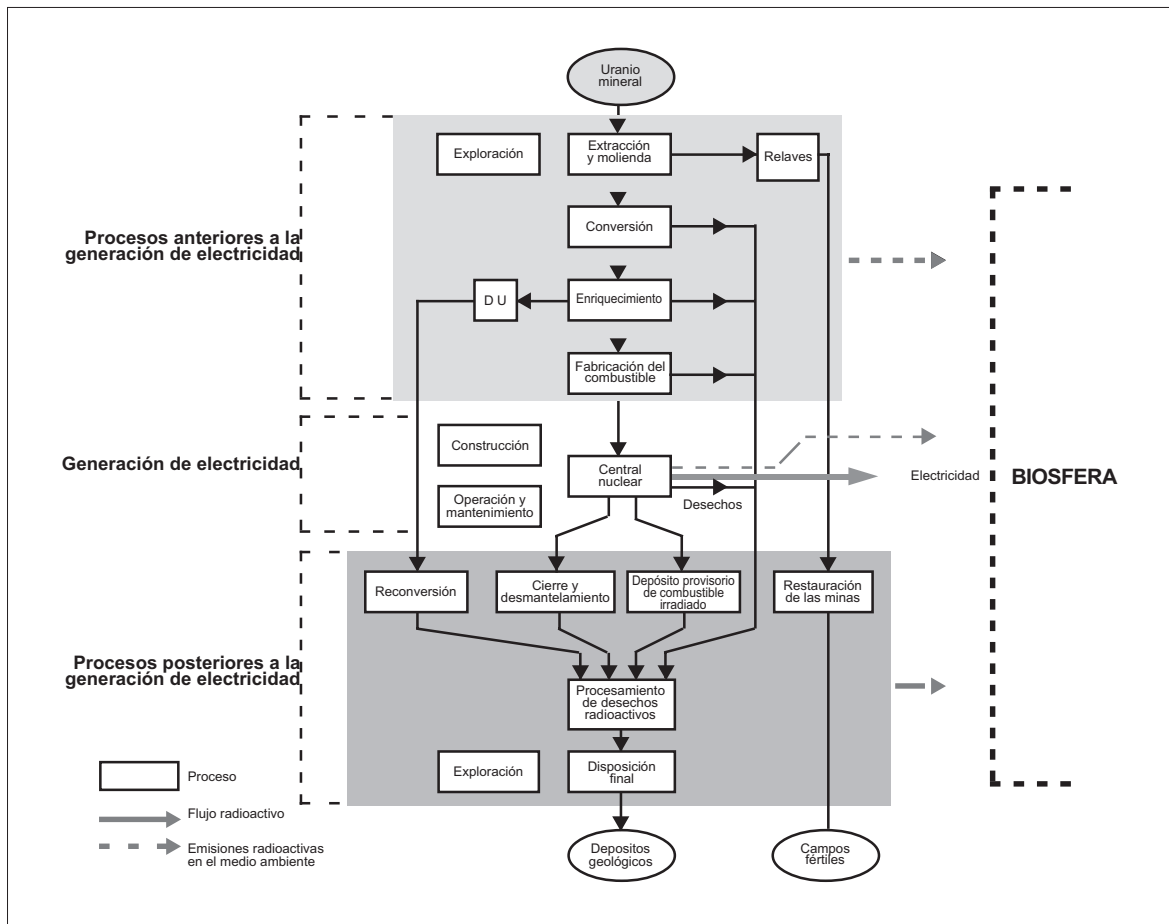
Figura N° 1:
Ciclo de vida simplificado



Fuente: Esquema simplificado del Centro Atómico Ezeiza, Argentina, en http://caebis.cnea.gov.ar/IdEN/CONOC_LA_ENERGIA_NUC/CAPITULO_6_Difusion/CICLO_COMB_NUCL/Ciclo_combustible.htm

El ciclo de vida de la energía nuclear contempla los materiales y los procesos industriales nucleares “desde la cuna a la tumba”; es decir, desde la extracción del uranio hasta la disposición final de los desechos radiactivos en depósitos geológicos. Cada etapa del ciclo de vida nuclear y sus procesos industriales implican costos, insumos energéticos, impactos ambientales y riesgos potenciales que deben ser correctamente evaluados al momento de decidir sobre esta opción. En cada etapa también se producen pérdidas energéticas y desechos radioactivos. En el siguiente gráfico, a modo de ejemplo, se muestran las pérdidas, desechos y emisiones a la biósfera en los procesos anteriores y posteriores a la generación en un reactor de agua a presión (en inglés, Pressurized Water Reactor o PWR).

Figura N° 2:
Ciclo de vida de un Reactor Nuclear PWR (agua presurizada)



Fuente: Diagrama adaptado de Storm van Leeuwen, "Nuclear energy. The energy balance", 2005

1. PROCESOS PREVIOS A LA GENERACIÓN: LA DEPENDENCIA DE UN RECURSO NO RENOVABLE

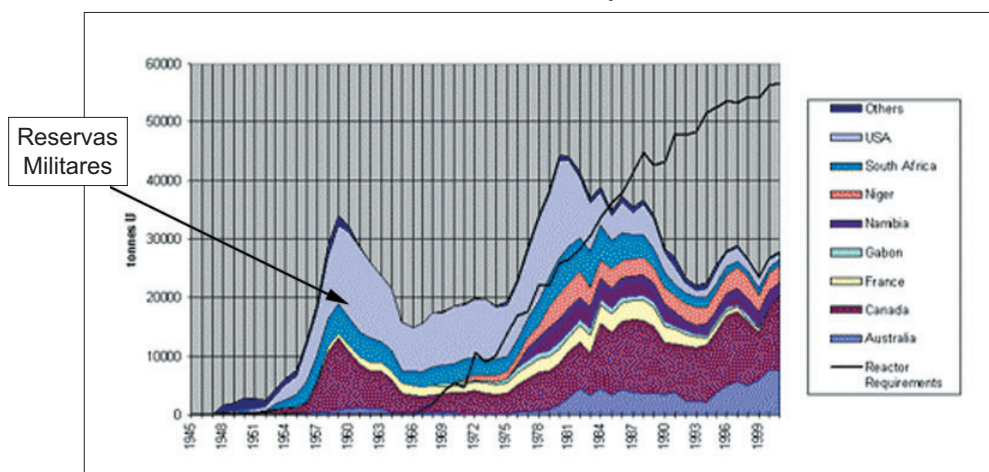
1.1. Disponibilidad y costos del uranio.

La disponibilidad actual de uranio a nivel mundial es limitada; además, como todo mineral, es una reserva de recursos no renovables. Si se considera el escenario actual de reservas de uranio; la tasa de utilización de uranio en las centrales actualmente en funcionamiento; y *sin* que se construyan nuevas centrales nucleares, se estima que el uranio de alta ley se agotará dentro de los próximos 60 años (o de 80 a 100 años, según los más optimistas). La misma Agencia Internacional de Energía (AIE) reconoce reservas probadas de 4,6 millones de toneladas, lo que sólo permitiría abastecer la actual demanda (65.000 toneladas/año) del parque nuclear existente por 85 años¹.

Actualmente, la producción de uranio, según la Asociación Nuclear Mundial, es deficitaria en relación con el requerimiento de los reactores de países industrializados.

El gráfico Nº 1 muestra cómo, a pesar de incrementarse los requerimientos de uranio hasta fines de los '90, el índice de los principales productores de uranio empezó a caer desde inicios de los años '80. La explicación de los expertos ante este déficit es que el abastecimiento de combustible para el parque nuclear de los países industrializados provino de los inventarios militares², los que actualmente se estarían agotando.

Gráfico Nº 1:
Producción de Occidente versus requerimientos de reactores



Fuente: World Nuclear Association año - <http://www.world-nuclear.org/info/inf23.html>

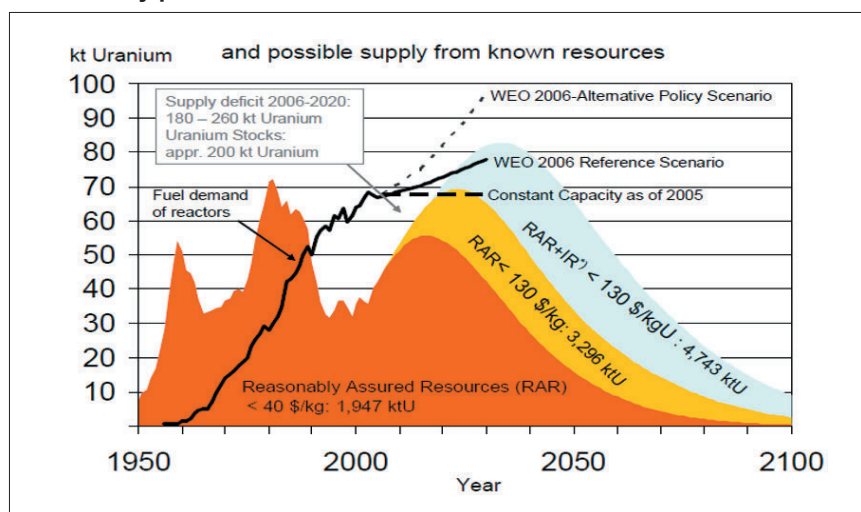
¹ IEA Energy Technology Essentials (marzo 2007)-Nuclear Power <http://www.iea.org/Textbase/techno/essentials4.pdf>

² Uranium Information Center, Australia.

Esta situación explica el alza sostenida en los precios del uranio, debido a que la presión ejercida por la demanda no puede ser cubierta por el nivel de producción actual.

Las proyecciones del Energy Watch Group³ sobre las demandas futuras de uranio, en base al escenario de referencia y al escenario alternativo (con más generación nuclear) de la Agencia Internacional de Energía (AIE), confirman la estrechez entre generación nuclear y reservas aseguradas de uranio. Tal como muestra el gráfico N° 2, sólo existen *recursos razonablemente asegurados* para mantener la capacidad de generación nuclear que existía el año 2005 hasta el año 2030, cuando ya empiezan a declinar.

Gráfico N° 2
Demanda de uranio en base a los escenarios de la Agencia Internacional de Energía y posible abastecimiento desde recursos conocidos.



Fuente: Energy Watch Group, *Uranium Resources and Nuclear Energy, 2006*

En base a escenarios WEO 2006: IEA, *World Energy Outlook 2006*

RAR: Recursos razonablemente asegurados

RAR+IR: Recursos razonablemente asegurados + Recursos teóricos

Datos sobre las reservas provienen de "The Red Book Retrospective" Nuclear Energy Agency, IAEA, 2006

El estudio también muestra que el escenario de incremento de la generación nuclear presentado por la AIE en su «Perspectiva Mundial de la Energía-2006» (World Energy Outlook-WEO-2006) sólo podría alimentarse si a las reservas razonablemente aseguradas se agrega la existencia de recursos teóricos, los cuales, de existir, igual iniciarían su declinación en 2040. Finalmente, el estudio muestra la inexistencia de uranio para sostener el escenario de crecimiento en la generación nuclear presentado como "Escenario de Política Alternativa" en la «Perspectiva Mundial de la Energía-2006».

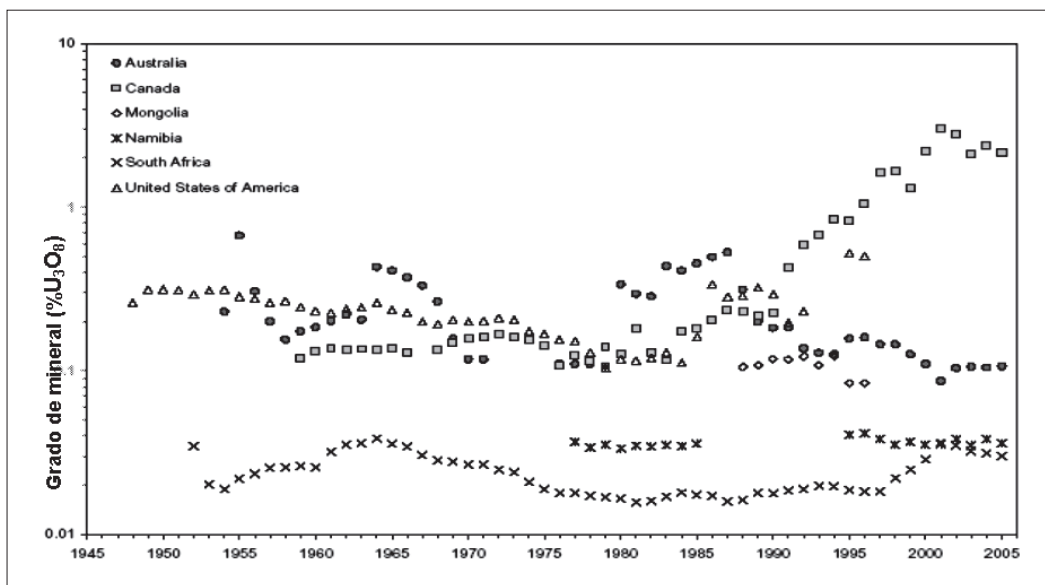
³ Energy Watch Group, *Uranium Resources and Nuclear Energy, 2006*

Otro factor relevante para evaluar la disponibilidad y costos del combustible nuclear es el nivel de concentración de uranio (ley del mineral) en las actuales reservas. Esto determina los costos de extracción, el balance energético final y los impactos ambientales del ciclo de combustible nuclear en los procesos anteriores a la generación núcleo-eléctrica.

Mientras más baja sea la ley del mineral, mayor será el aumento de los costos de producción, puesto que aumentan las necesidades energéticas para extraer el uranio, y el volumen de material removido implica mayores impactos ambientales. Pero estos impactos casi no se consideran en la evaluación de esta alternativa energética; tampoco se incorpora en el actual precio del uranio los costos de restaurar las zonas de explotación minera a su situación original. Se calcula que, de realizarse, este proceso de restauración demandaría 4 veces más energía que la utilizada en la extracción de uranio en cada yacimiento⁴.

El gráfico N° 3 presenta la concentración histórica promedio del uranio extraído en los principales países productores: Canadá, Australia, Namibia, Sudáfrica, Mongolia y Estados Unidos. Se destacan las minas canadienses como las con mejor ley de uranio.

Gráfico N° 3
Concentración histórica promedio de uranio



Fuente: Mudd & Diesendorf, "Sustainability Aspects of Uranium Mining: Towards Accurate Accounting?", 2nd International Conference on Sustainability Engineering & Science, Auckland, New Zealand, 20-23, February, 2007.

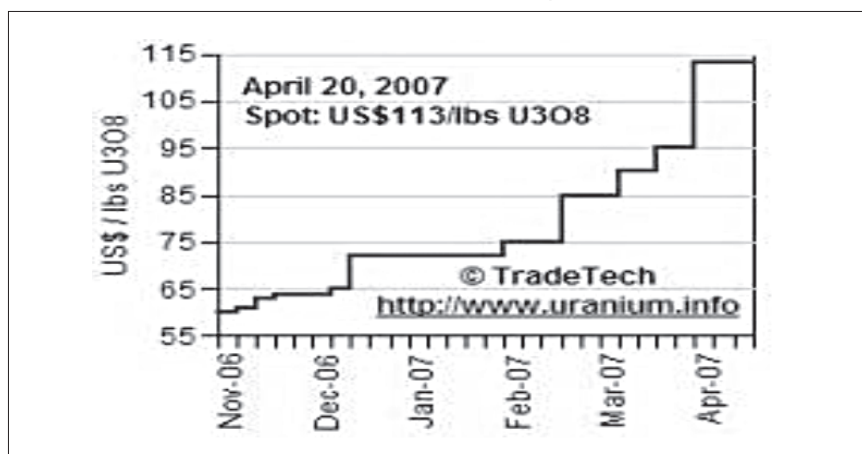
A nivel mundial, durante los recientes 20 años, la extracción de uranio ha disminuido y los reactores nucleares se han abastecido principalmente de las reservas gubernamentales, que están decreciendo aceleradamente. Este hecho explica el incremento del precio de uranio en los años recientes.

⁴ Jan Willem Storm van Leeuwen and Philip Smith, "Nuclear energy. The energy balance", julio de 2005.

Según Thomas Neff, del Centro de Estudios Internacionales del MIT, en la Universidad de Chicago, actualmente, la producción de uranio sólo cubre el 65% de la demanda.⁵ Este desbalance entre producción y demanda de uranio ciertamente mantendrá el mineral en precios muy altos, a causa de la disminución de las reservas militares y la inexistencia de nuevos proyectos de mineración de uranio.

Adicionalmente, el precio del uranio ha tenido un alza violenta en el más reciente período anual. En enero de 2006, el precio del concentrado de uranio en el mercado mundial estaba en US 36.25 dólares la libra, llegando el pasado 20 de abril de 2007 a US 113 dólares la libra.

Gráfico N° 4:
Precios del uranio en el mercado spot mundial (noviembre, 2006/abril, 2007)



Fuente: www.uranium.info

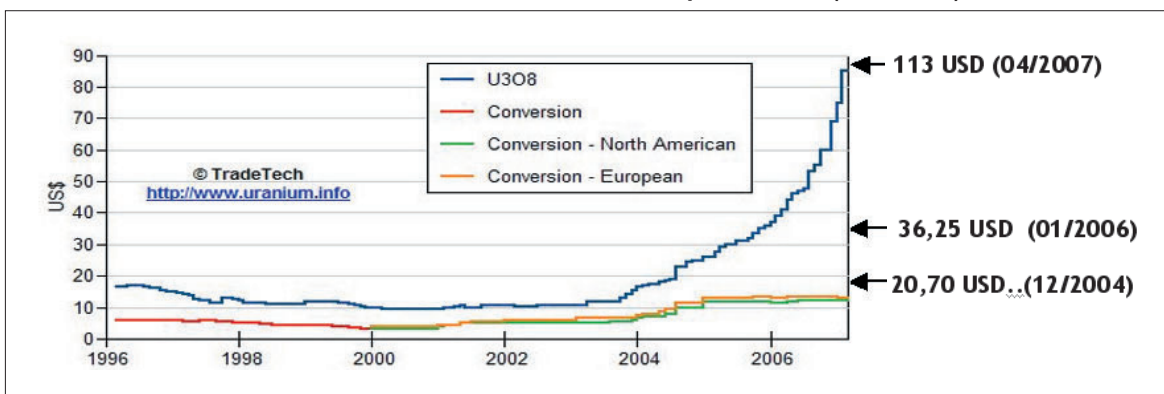
Esta situación, de acuerdo a estimaciones de la publicación *Gold World*, no debería variar en los próximos 20 ó 30 años, por el desbalance entre producción y demanda estimada (ver gráficos 1 y 2). Adicionalmente, el agotamiento de algunas minas de alta ley (principalmente situadas en Canadá) podría agudizar aun más la presión sobre el precio mundial.

En coincidencia con estas proyecciones, la realidad actual es que el precio del uranio ha aumentado en 565% desde diciembre de 2004, y más del 310% en los recientes 15 meses. Actualmente, se estima que la estabilidad de los precios que se verificó entre 1990 y 2003 no se repetirá.

A pesar de esta situación, los estudios que promueven el fomento de la generación nuclear estiman en US 4,3 dólares por MWh el precio del combustible nuclear para los próximos 60 años, lo que no es compatible con la realidad.

⁵ <http://www.engineerlive.com/news/17505/lack-of-fuel-may-limit-us-nuclear-power.shtml>

Gráfico N° 5:
Precios del uranio U-308 en el mercado *spot* mundial (1996-2006)



Fuente: www.uranium.info

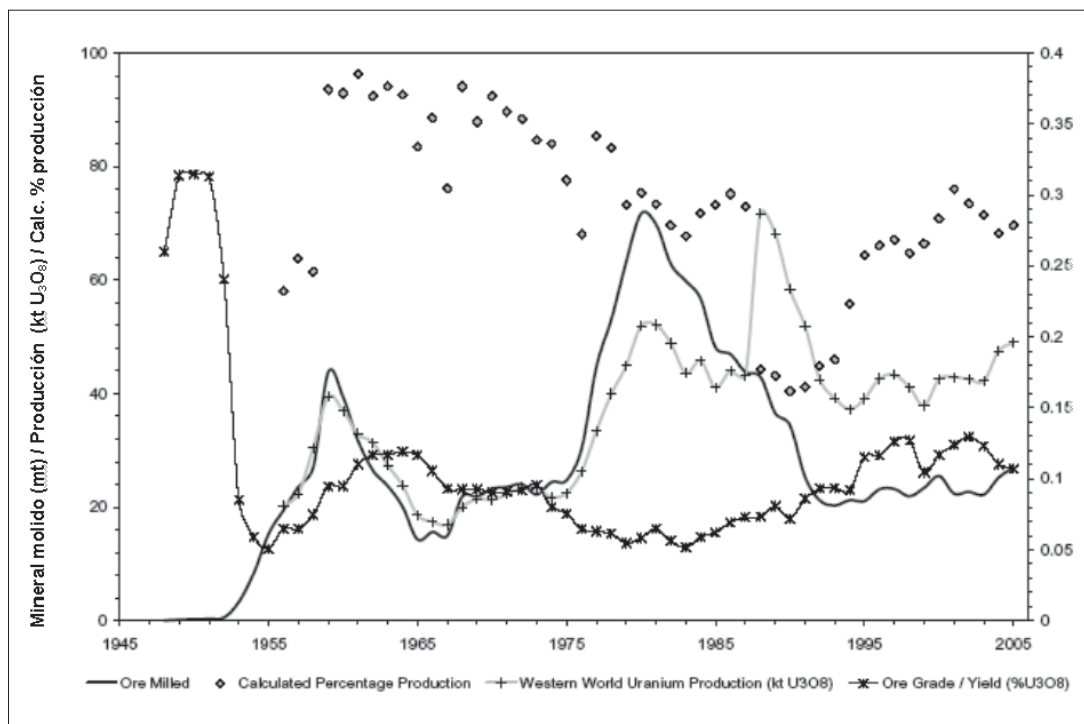
1.2 Extracción del uranio

La producción de uranio en gran escala se inició después de la II Guerra Mundial, para abastecer principalmente la fabricación de armas nucleares. Posteriormente continuó a partir de los años '60. La producción se orientó al abastecimiento de la emergente industria de generación núcleo-eléctrica⁶. Los principales productores de uranio fueron históricamente Canadá, Estados Unidos, Alemania Oriental, Sudáfrica, Australia, Nigeria, Namibia y Francia.

Aunque no existe actualmente un catastro completo de información sobre la totalidad de la producción mundial de uranio, sí es posible acceder a información sobre algunos de los principales países productores. Si se toma como referencia a 3 de los mayores productores: Canadá, Australia y Namibia, es posible extrapolar al menos 2 *peaks* en la producción de uranio: el primero en 1959, para abastecer la fase de desarrollo militar (fabricación de armas nucleares); y el segundo, en 1988, para abastecer el desarrollo de generación eléctrica. Ambos, así como la ley del mineral y el promedio de producción, se muestran en el siguiente gráfico N° 6.

⁶ Mud&Diesendorf, "Sustainability Aspects of Uranium Mining: Towards Accurate Accounting, Second International Conference on Sustainability Engineering & Science, Auckland, New Zealand, 20-23, February, 2007.

Gráfico N° 6
Promedio global estimado de ley del mineral, producción, molienda y porcentaje de producción



Fuente: Mudd & Diesendorf, "Sustainability Aspects of Uranium Mining: Towards Accurate Accounting?" 2nd International Conference on Sustainability Engineering & Science, Auckland, New Zealand - 20-23, February, 2007.

A modo de ilustración sobre la relación entre producción y ley del mineral en el caso del uranio, si tomamos el ejemplo de un reactor nuclear de 1 gigavatio, este necesita utilizar aproximadamente entre 160 y 200 toneladas de dióxido de uranio por año. En una mina de alta ley (con una concentración de uranio natural mayor a 4 gramos de uranio natural por tonelada de granito), es necesario extraer 80.000.000 toneladas de rocas de granito, para obtener las 160 toneladas de dióxido de uranio requeridas cada año para un reactor de esa potencia. Por ello sólo es rentable la explotación de minas cuyas rocas poseen alta concentración de uranio; es decir, al menos en 0.1%.

El material extraído en el proceso de mineración es tratado en plantas químicas, las que mayoritariamente emplean ácido sulfúrico como agente separador. El producto final es un concentrado de óxido de uranio con impurezas, que en inglés es llamado *yellow cake*.

Este proceso genera residuos que contienen importantes cantidades de productos químicos y sustancias radiactivas, tales como radio y torio, que no fueron separados en la operación. Estos desechos mantienen cerca del 85% de la radioactividad respecto del material de base, y generalmente emiten niveles de radiación gama entre 20 y 100 veces mayores que las contenidas por el mineral en los yacimientos, en su estado natural. Sin embargo, los peligros

de radiación son localizados, ya que su nivel disminuye rápidamente a medida que aumenta la distancia respecto de los acopios de desechos.⁷

La mineración y extracción del uranio, además de generar desechos químicos y radiactivos, implica un gran consumo de agua y energía y emisiones de gases de efecto invernadero. Los estudios más recientes de la industria nuclear sobre la mineración de uranio presentan consumos de agua de entre 46,2 y 7.731 kilolitros por tonelada de óxido de uranio (U₃O₈) producida; un consumo energético de entre 172 y 1.389 gigajoules por tonelada de U₃O₈; y emisiones de dióxido de carbono entre 8,4 y 253 toneladas, por tonelada de óxido de uranio producida.⁸

En la tabla siguiente se presentan los niveles de consumo de agua, energía y emisiones de dióxido de carbono en el proceso de extracción minera.

Tabla N° 1
Consumo de energía y agua, y emisiones de dióxido de carbono de las minas de uranio
(promedio y desviación estándar y número de años entre paréntesis)

Uranium Project	Typical Ore Grade %U ₃ O ₈	Annual Prod. t U ₃ O ₈	Consumption		Emissions Carbon Dioxide
			Water *kL/t U ₃ O ₈	Energy **GJ/t U ₃ O ₈	
Ranger	0,28-0,35	5.000	46,2±8,2 (7)	181±18 (9)	13,0±1,8 (9)
Olympic (100%)	0,064-0,114	4.300	2.899±503 (14)	1.389±336 (14)	253±67 (14)
Olympic (20%)			580±101 (14)	278±67 (14)	50,6±13,5 (14)
Rössing	~0,034-0,041	~3.700	863±107 (11)	354±35 (11)	45,3±4,1 (11)
Cluff Lake	2,71	(closed)	365 (1)	194 (1)	12,1 (1)
McLean Lake	1,45-2,29	~2.750	257±62 (4)	202±25 (4) ¹	8,4±1,2 (4)
Beverley	~0,18	~1.000	7.731±802 (5)	172±29 (3) ²	8,9±1,5 (3)
Niger ³	~0,2-0,5	~3.100	No data	~204	No data
Cameco ⁴	~0,9-4,0	~8.500	No data	~178	No data

* Kilo litro por tonelada de U₃O₈ (1 kilo litro= 1.000 litros)

** Giga joule por tonelada de U₃O₈ (1 Giga joule= 1.000.000.000 de Joules).

¹ Data given by (WNA, 2006) is 313 GJ/t U₃O₈.

² Different data for 2004-05 is given by (WNA, 2006) for Beverley as 187 and 221 GJ/t U₃O₈, respectively, compared to data reported by (HR, var.) and use in graphs and table above.

³ Data por 2000, for Areva's (formerly Cogema) two mine/mill complexes (Somair and Cominak) (WNA, 2006).

⁴ Data average over 1992 to 2001 for "Cameco mines" (WNA, 2006).

Fuente: Mudd & Diesendorf, "Sustainability Aspects of Uranium Mining: Towards Accurate Accounting?", 2nd International Conference on Sustainability Engineering & Science, Auckland, New Zealand - 20-23 Feb. 2007.

⁷ Nuclear Fuel Cycle, Nuclear Issues Paper N°3, BY JÜRGEN KREUSCH, WOLFGANG NEUMANN, DETLEF APPEL (Chapters 1 and 3), and PETER DIEHL (Chapter 2).

⁸ Mudd & Diesendorf, "Sustainability Aspects of Uranium Mining: Towards Accurate Accounting?", 2nd International Conference on Sustainability Engineering & Science, New Zealand, 20-23, febrero, 2007.

1.3. Conversión, enriquecimiento y fabricación del combustible.

Antes del proceso de enriquecimiento, el óxido de uranio o concentrado de uranio (U_3O_8), debe ser gasificado en forma de hexafluoruro de uranio (UF_6) en plantas de conversión en Europa, Rusia o América del Norte.

Posteriormente, el uranio debe ser enriquecido para obtener concentraciones del isótopo uranio-235, en las proporciones necesarias para producir la reacción nuclear. Este proceso implica pasar desde las concentraciones encontradas en la naturaleza de 0,71% hasta concentraciones de entre 3 y 5% de mineral.

Una vez que el uranio ha llegado al nivel de enriquecimiento requerido, es trasladado a una planta de fabricación de combustible en donde es convertido en dióxido de uranio (UO_2), que se presenta en forma de polvo negro. Estas partículas son comprimidas en pequeñas tabletas, que se introducen en largos tubos de metal que se cierran herméticamente, dando origen a las barras de combustible utilizadas en los reactores nucleares. Este es el ciclo del combustible nuclear previo a la generación.

Como residuo de este proceso de fabricación de las barras de combustible nuclear, queda gran cantidad de uranio de descarte, el cual es denominado uranio empobrecido o DU por sus siglas en inglés (Depleted uranium) y que contiene principalmente uranio 238 (U-238). El uranio empobrecido tiene una densidad extremadamente alta (19 kg/l), algo mayor que la del uranio natural y mucho mayor que la del plomo. Esta característica lo hace interesante para ciertas aplicaciones civiles y militares.

1.4. Uso militar del uranio empobrecido

Para fines pacíficos el uranio empobrecido se usa como componente en el contrapeso de las aeronaves y como blindaje contra las radiaciones en los aparatos de radioterapia y en los depósitos para el transporte de material radiactivo. Sin embargo, cada vez más es utilizado para reforzar la estructura de los vehículos militares y como componente en la munición para perforar blindajes de tanques, debido a su alta densidad (el doble que la del plomo) y a otras propiedades físicas.

El uranio empobrecido ha reemplazado al tungsteno en el área militar por su alto poder destructivo, pues al impactar el disparo en su objetivo, la munición se fractura y genera fragmentos afilados, que penetran mejor en el blindaje de tanques y vehículos militares. También es pirofórico, es decir, se inflama espontáneamente al contacto con el aire por encima de cierta temperatura (alrededor de 600° C). Así, cuando un obús de uranio empobrecido alcanza un blanco, no sólo penetra el blindaje, sino que además se inflama al llegar al interior del vehículo, incinerando a la tripulación o provocando la explosión del combustible o de las municiones⁹.

⁹ Ver los efectos sobre la salud en: OMS, Uranio empobrecido: origen, exposición y efectos en la salud, Resumen de orientación en http://www.who.int/ionizing_radiation/pub_meet/en/DU_Spanish.pdf

Se estima que entre 17 y 20 países ya han incluido la munición de uranio empobrecido en sus arsenales, aunque su utilización solamente ha sido admitida por los Estados Unidos e Inglaterra, en particular en los conflictos de Bosnia (1995), Kosovo (1998) e Irak (1991 y 2003).

Tabla N° 2
Inventario Mundial del Uranio Empobrecido (1996-2002)

País	Organización	Toneladas almacenadas	Fecha
EE.UU.	DOE	480.000	2002
Rusia	FAEA	460.000	1996
Francia	COGEMA	190.000	2001
Reino Unido	BNFL	30.000	2001
Alemania	URENCO	16.000	1999
Japón	JNFL	10.000	2001
China	CNNC	2.000	2000
Corea del Sur	KAERI	200	2002
Sudáfrica	NECSA	73	2001
TOTAL		1.188.273	2002

Fuente: WISE Uranium Project en base a datos entregados por los países a la OCDE.

Actualmente, la mayor parte del uranio empobrecido ya producido se guarda en forma de hexafluoruro de uranio (UF₆), en cilindros de acero de 12,7 toneladas de capacidad y se almacenan cerca de las plantas de enriquecimiento. El gobierno estadounidense, debido a los riesgos ligados al almacenamiento del UF₆, ha iniciado la transformación de su inventario de UF₆ en uranio metálico, que se estima más seguro y que además tiene otras aplicaciones potenciales.

2. SUPUESTOS TEÓRICOS Y COSTOS HISTÓRICOS DE LA GENERACIÓN NUCLEAR

Tal como la fase previa a la generación nuclear incluye desde la extracción del uranio hasta su enriquecimiento para ser utilizado como combustible; la fase de generación núcleo-eléctrica contempla varios procesos: inversión y desarrollo del proyecto; construcción de la planta nuclear; puesta en marcha; operación y mantenimiento; abastecimiento y reemplazo de combustible; adaptación de los sistemas de control y actualización de los sistemas de seguridad.

A nivel mundial, la mayoría de las nuevas centrales que han iniciado su construcción, o las que se han conectado recientemente a la red, se sitúan en India, China, Corea del Sur, Ucrania, Rusia y Pakistán, donde es más complejo acceder a la información sobre costos de inversión y construcción. Los dos únicos países industrializados que se integran a esta lista son Japón, con la conexión de dos plantas a la red en el año 2005 y una en construcción; y Finlandia, con una planta en construcción.

Tabla N° 3
Centrales en construcción, conectadas y para cierre definitivo (2004-2007)

	Nuevas centrales conectadas a la red	Comienzo construcción	Cierre definitivo
2007	Kaiga 3 (India , 202 MW)	Qinshan II-4 (China 610 MW Severodvinsk (Rusia 60 MW)	
2006	Tarapur 3 (India , 490 MW) Tianwan 1 (China , 1000 MW)	Shin Kori 1 (960 MW, Corea del Sur) Beloyarsk 4 (750 MW, Rusia) Lingao 4 (1000 MW, China) Qinshan II-3 (610 MW, China) Shin Wolsong (960 MW, Corea del Sur)	Bohunice 1 (408 MW Eslovaquia) Kozloduy (2x408 MW, Bulgaria) Dungeness A (2x 225 MW, R.U.) Sizewell A (2x 210 MW, R.U.) Zorita (142 MW, España)
2005	Ulchin 6, (960 MW, Corea del Sur) <u>Higashidori 1 (1067 MW, Japón)</u> Tarapur 4, (490 MW, India) <u>Shika 2, (1304 MW, Japón)</u>	<u>Olkiluoto 3, (1600 MW, Finlandia)</u> Lingao 3 (1000 MW, China) Chasnupp 2, (300 MW, Pakistán)	Obrigheim (340 MW, Alemania) Barsebäck 2 (600 MW, Suecia) ☐
2004	Qinshan 2-2, (610 MW, China) <u>Hamaoka 5, (1325 MW, Japón)</u> Khmelnitski 2, (950 MW, Ucrania) Rovno 4, (950 MW, Ucrania) Kalinin 3, (950 MW, Rusia)	<u>Tomari 3 (866 MW, Japón)</u> PFBR Kalpakkam, (470 MW, India)	Chapelcross (200 MW), R.U.) Ignalina 1 (1185 MW, Lituania)

Fuente: Agencia Internacional de Energía Atómica.

La mayor parte de estos países tienen intereses militares y geopolíticos particulares que motivan sus planes nucleares. Actualmente, al igual que durante la época de la Guerra Fría, no se puede descartar la existencia de subsidios directos de los estados a los programas núcleo-eléctricos y al desarrollo nuclear militar. También es necesario estudiar en profundidad el apoyo directo al financiamiento de las centrales nucleares por parte de las Agencias de Crédito a la Exportación de los países industrializados, las que entregan garantías especiales y créditos

de largo plazo para la exportación de materiales que servirán a la construcción de las plantas nucleares en otros países.

Sin embargo, a pesar de los subsidios, la opción núcleo-eléctrica no se reactiva. Uno de los ejemplos es Estados Unidos, donde el Departamento de Energía de este país estableció en 2002 un «Programa de Energía Nuclear-2010», con apoyos directos para la construcción de nuevas centrales: apoyo a las inversiones, préstamos subsidiados, disminución de impuestos, precios de compra de electricidad garantizados por sobre los precios de mercado. A 5 años de este programa, ninguna central nuclear ha comenzado construirse en EE.UU.¹⁰

Con excepción de Japón, Finlandia es el único país industrializado que ha iniciado la construcción de una central nuclear. Sin embargo, en lo referido al financiamiento, actualmente enfrenta problemas, pues la Comisión Europea ha comenzado una investigación en profundidad para establecer si el préstamo entregado por un grupo de bancos, y garantizado por el Estado francés, por un monto de 570 millones de euros a la compañía finlandesa, para la construcción de la central de Olkilvoto 3, es compatible con las leyes europeas sobre la ayuda estatal.¹¹

2.1. Costos de inversión

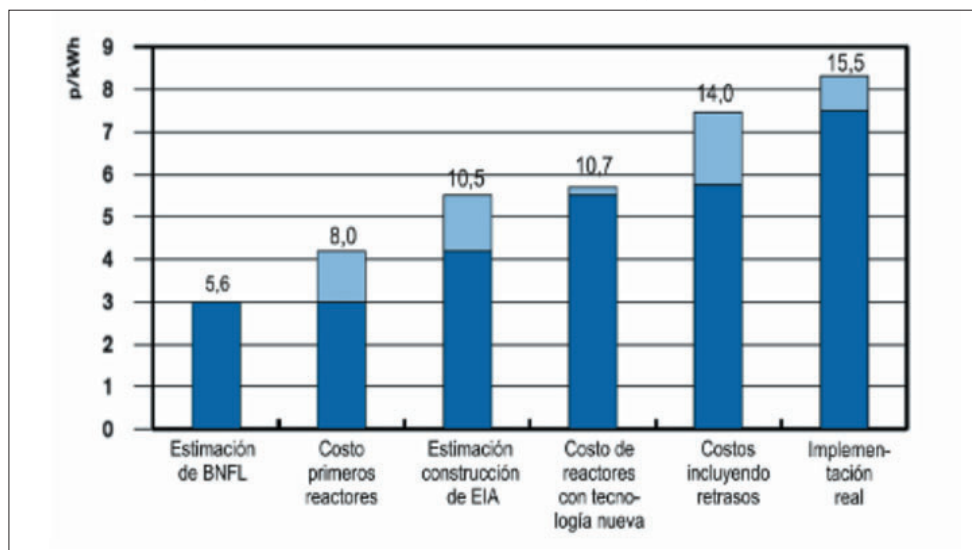
Una de las mayores dificultades para establecer estimaciones sobre los costos reales de la generación nuclear radica en los estudios especializados. Estos sitúan sus previsiones en rangos tan amplios que dificultan la comparación con otras fuentes de energía en las que las estimaciones son más acotadas.

Un informe de la *New Economics Foundation* sobre estimaciones teóricas y costos reales de construcción de plantas nucleares, en base a datos de diversas instituciones gubernamentales (y sin considerar seguros por riesgo de accidente o atentado terrorista), muestra que el costo real puede incluso duplicar algunas estimaciones de la industria nuclear. El gráfico N° 7 muestra costos de electricidad nuclear de US 5,6 centavos de dólar por kilovatio/hora estimados por la Agencia Británica de Energía Nuclear (BNFL); un costo de US 8,0 centavos de dólar en el caso de los reactores ya construidos; uno de US 10,5 centavos de dólar el kilovatio/hora por la Agencia Internacional de Energía; de US 10,7 centavos kilovatio/hora en el caso de reactores con nueva tecnología; y US 14 centavos de dólar kilovatio/hora si se incluye los costos de retraso en la construcción, subiendo a US 15 centavos de dólar los costos de implementación real de este tipo de generadores de acuerdo a la experiencia histórica.

¹⁰ Public Citizen, *Nuclear Power 2010 Unveiled, Bush plan for new nuclear reactors maps out monstrous subsidies*, Marzo del 2004. en <http://www.citizen.org/documents/nuke2010analysis.pdf>

¹¹ Comisión Europea, 26/10/2006, <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/06/1456>

Gráfico N°7
El costo creciente de la energía nuclear
Excluyendo costos de seguros, contaminación y riesgos terroristas



*Valor en libras en el costado del gráfico

**Valor en centavos de dólar sobre las barras

Fuente: The New Economics Foundation, «Mirage and oasis, Energy choices in an age global warming», Junio del 2005. (encima de las barras valor en centavos de dólar)

Estas diferencias no sólo resultan de los costos atribuibles a la elección de tecnologías nucleares distintas, sino que se deben principalmente a las diferencias entre los supuestos de base utilizados y a las diferencia en los costos de los procesos incluidos en el proyecto.

Adicionalmente, la Agencia Internacional de Energía¹² reconoce que en la mayoría de los países, al incluirse mayores exigencias de seguridad y de inspección de las plantas nucleares, los costos de inversión han sido mayores a los aprobados inicialmente¹³. A esto se suma el incremento de costos por las demoras y mayores plazos de construcción.

Por ejemplo, algunos estudios, como el encargado por el Departamento de Energía de Estados Unidos al MIT de la Universidad de Chicago, y que estiman costos de inversión entre US 1200 y 1800 dólares el kilovatio para centrales nucleares, son teóricos.

El hecho de que ni en Estados Unidos ni en Canadá han existido órdenes para construir nuevas centrales nucleares en las recientes tres décadas dificulta realizar una evaluación de los costos de inversión ajustada a la realidad actual.

¹² IEA por sus siglas en inglés.

¹³ IEA Energy Technology Essentials (marzo 2007)-Nuclear Power <http://www.iea.org/Textbase/techno/essentials4.pdf>

La misma Agencia Internacional de Energía, en su «Perspectivas sobre Energía Mundial 2006» (WEO 2006)¹⁴ y en sus boletines técnicos¹⁵, muestra un costo creciente de la energía nuclear, con montos de inversión entre US 1200 y US 2500 dólares por kilovatio.

A objeto de transparentar la diferencia entre los supuestos teóricos y los costos reales de la generación nuclear, tomaremos todos los supuestos del completo estudio del MIT, “The Economic Future of Nuclear Power”, financiado por el Departamento de Energía (DOE) de EE.UU. Dicho informe asume los siguientes supuestos:

- Costos de inversión: entre US 1200 y 1800 dólares por kilovatio.
- Inversión financiada con créditos y capitales propios en un 50%-50% (con tasas de retornos de 10 y 15%, respectivamente).
- Vida útil de la planta: 40-60 años.
- Construcción de la planta: 5-7 años.
- Factor de carga: 85%.
- Costos del combustible: US 4,3 dólares por megavatio/hora.
- Costos de operación y mantenimiento: US 10 dólares por megavatio/hora.
- Costos de desmantelamiento de US 350 dólares por kilovatio.
- Costos de procesamiento de desechos: US 1 dólar por megavatio.

2.2. Vida útil de una planta y factor de carga

Los estudios de la Universidad de Chicago parten del supuesto que las plantas nucleares tendrán una vida útil de 40 a 60 años, con un factor de carga del 85%.

En relación al supuesto de vida útil estimado en 40 a 60 años, y utilizado para calcular los costos de inversión y operación, es necesario señalar que actualmente ninguna central nuclear en operación tiene más de 40 años; por tanto, partir de un supuesto de vida útil de 60 años sigue estando en el terreno de lo estrictamente teórico.

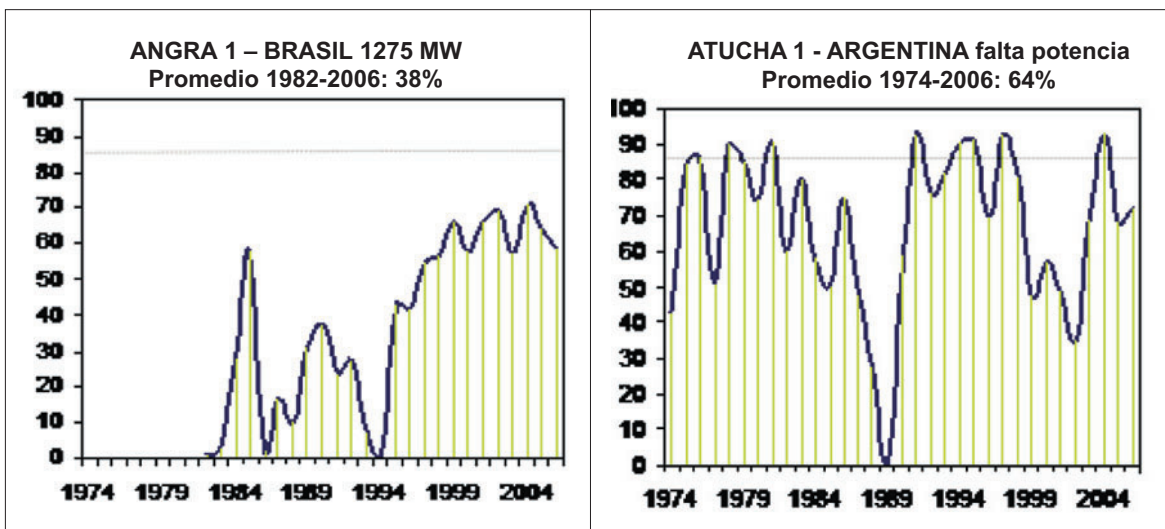
Por otro lado, en relación al supuesto de 85% de factor de planta, es necesario señalar que los análisis sobre generación efectiva de electricidad en los reactores actualmente en operación muestran un factor de carga bastante más bajo. Tal como lo demuestran los gráficos siguientes, de cuatro reactores ubicados en Brasil, Argentina, Estados Unidos y Francia.

Particularmente pobre es el desempeño de las reactores ubicados en América Latina, donde Atucha 1 en Argentina ha tenido un factor de planta de 64% entre 1974 y 2006; mientras Angra 1 en Brasil sólo ha tenido un factor de planta promedio de 38% entre 1982 y 2006.

¹⁴ IEA World Energy Outlook 2006 b) New Economics Foundation “Mirage and Oasis, Energy choices in an age of global warming” junio 2005

¹⁵ IEA Energy Technology Essentials-Nuclear Power <http://www.iea.org/Textbase/techno/essentials4.pdf>

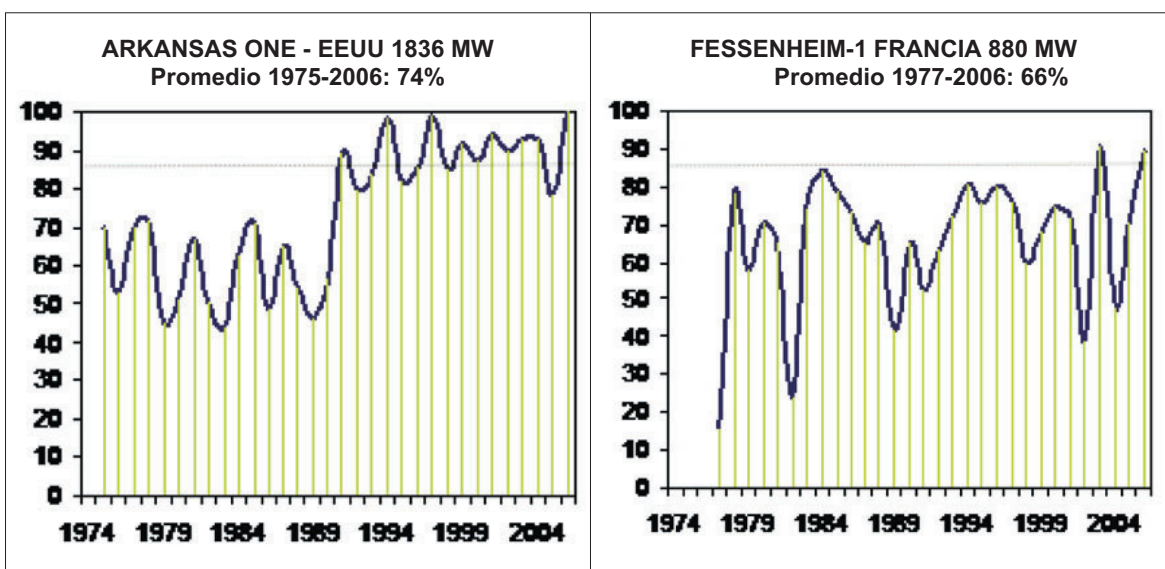
Gráfico N° 8
Factor de carga



Fuente: Elaboración propia en base a datos de IAEA, Power Reactor Information System, <http://www.iaea.org/programmes/a2/>

El supuesto teórico de 85% como factor de carga tampoco se cumple en la mayor parte de las centrales de los países industrializados. Por ejemplo, el factor promedio de Arkansas One, una central representativa del parque nuclear de Estados Unidos, ha sido sólo de 74% entre 1975 y 2006; mientras que la central de Fessenheim-1, en Francia, ha presentado apenas un factor de planta de 66% entre 1977 y 2006.

Gráfico N° 9
Factor de carga



Fuente: Elaboración propia en base a datos de IAEA, Power Reactor Information System, <http://www.iaea.org/programmes/a2/>

Finalmente, en relación con la estimación de cronogramas de construcción de centrales nucleares utilizados para calcular los costos de inversión de la generación nuclear, es necesario señalar que estos muestran retrasos promediados de 40% en relación con los prometidos, lo que también significa costos adicionales.

El promedio de construcción de las plantas nucleares entre 1981 y 2005, de acuerdo a la información publicada en 2006 por la Agencia Internacional de Energía Atómica, fue de 8,6 años¹⁶; y no de 5 a 7 años como estima el estudio del MIT para el Departamento de Energía de Estados Unidos; ni de 5 años como supone la Agencia Internacional de Energía en «Perspectivas de la Energía Mundial 2006»(WEO 2006)¹⁷.

Tabla N° 4
Financiamiento e inversión

	Estudio DOE Universidad de Chicago	IEA World Energy Outlook 2006	Experiencia histórica
Costos de inversión (USD/KWh)	1200-1800	2000-2500	2500 central de Olkiluoto-Finlandia (a)
Tiempo de construcción	5-7 año	5 años	Promedio 8.6 años (b)
Financiamiento inversión	Créditos 50%-Capitales propios 50%	Créditos 50%-Capitales propios	No hay proyectos privados en los últimos 20 años (c)
Vida útil	40-60 años	40 años	No hay centrales mayores de 40 años (d)
Factor de carga	85%	85%	Extremadamente variable (e)

(a) WISE, in <http://www.tegenstroom.nl/node/579>

(b) Promedio entre 1981-2005 según datos de IAEA, "Operating Experience with Nuclear Power Stations in Member States in 2005", Octubre, 2006.

(c) Salvo Finlandia, que ha sido financiada por COFACE, la que está bajo una investigación de la Unión Europea por posibles ayudas estatales indirectas.

(d) IAEA, PRIS.

(e) IAEA, PRIS.

2.3. Costos de Operación

Los costos de operación estimados por algunas potencias nucleares tampoco son consistentes con los costos reales. En general, no consideran el alza en los precios del uranio; los costos de los sistemas de control y seguridad; los subsidios directos entregados por el Estado; ni los seguros asociados a la operación de los reactores.

El estudio base del DOE, Universidad de Chicago, estima costos de operación y mantenimiento de US 10 dólares por megavatio, lo que no es consistente con la experiencia de generación nuclear en dicho país; sobre todo si se aplica la función del factor de carga a una planta nuclear durante todo el curso de su vida útil.

¹⁶ IAEA, "Operating Experience with Nuclear Power Stations in Member States in 2005", octubre, 2006.

¹⁷ IEA, «World Energy Outlook 2006»

Si comparamos las cifras de costos de generación nuclear de 4,7 a 7,1 centavos de dólar por kilovatio-hora entregadas por el estudio del DOE/Universidad de Chicago; la estimación entre 4,9 y 5,7 centavos de dólar por kilovatio/hora del informe «Perspectivas sobre Energía Mundial-2006» (World Energy Outlook, 2006) de la Agencia Internacional de Energía; con los 15,5 centavos de dólar por kilovatio/hora que muestra la experiencia histórica de los costos de generación¹⁸, es claro que los costos reales pueden duplicar o triplicar los costos teóricos.

Si agregamos 1,8 centavos de dólar por kilovatio/hora por concepto de subsidios directos, de acuerdo a la experiencia histórica, consignada en los cálculos del informe «Programa de Energía Nuclear-2010» del DOE-EEUU; y los 5 centavos de dólar el kilovatio/hora por subsidios históricos (entre 1947 y 1961) mencionados en el informe «Federal Energy Subsidies»¹⁹, resulta un costo de operación real de 22,3 centavos de dólar por kilovatio/hora. Esto, sin incluir los costos de los seguros, ni los gastos en seguridad para prevenir riesgos terroristas (tal como presentamos en la tabla N° 5).

Tabla N° 5
Aproximación a los costos reales

En USD/KWh	Estudio DOE Universidad de Chicago	IEA World Energy Outlook 2006	Experiencia histórica
Costos de generación	4.7 - 7.1 ¢ (a)	4.9 - 5.7 ¢ (aa)	15.5 ¢ (c)
Subsidios directos	No incluidos	No incluidos	1.8 ¢ (d)
Subsidios históricos	No incluidos	No incluidos	5 ¢ (e)
Seguros (f)	No incluidos	No incluidos	No incluidos (f)
Gastos en seguridad por riesgos terroristas	No incluidos	No incluidos	No incluidos
Total	4.7 - 7.1 ¢	4.9 - 5.7 ¢	22.3 ¢

(a) *The Economic Future of Nuclear Power, University of Chicago, 2004*

(b) *World Energy Outlook-IEA 2006.*

(c) *New Economic Foundation, 2005*

(d) *Programa de Energía Nuclear 2010, EE.UU. EIA, 2004*

(e) *Goldberg, M., Federal energy subsidies, 2003. EE. UU. Se habría subsidiado entre 1947 y 1961 al desarrollo de la energía nuclear por un monto de 39 mil millones de dólares (USD). Si se considera que EE. UU ha generado 760 TWh nuclear hasta 1999; esto significa 5 ¢ por KWh.*

(f) *Ver Price-Anderson Nuclear Industries Indemnity Act, vigente hasta el año 2026, donde se establece que cualquier incidente nuclear por sobre los 10 mil millones de dólares será financiado por el gobierno federal.*

En 1989, los costos anuales de operación y mantenimiento de una planta de 1000 megavatios se estimaban en US 100 millones de dólares, lo que para 2002 equivalen a US 138 millones de dólares ²⁰. Esto significa US 18,53 dólares por megavatio/hora, si la central mantiene un factor de carga promedio de 85%. Pero este monto aumenta a US 26,25 dólares por megavatio/hora si el factor de carga promedio de la planta disminuye a 60%.

¹⁸ *New Economic Foundation, «Mirage and Oasis: Energy choices in an age of global warming, june, 2005.*

¹⁹ *Goldberg, M., Federal energy subsidies, 2003. EE. UU. Se habría subsidiado entre 1947 y 1961 al desarrollo de la energía nuclear por un monto de 39 mil millones USD. Si se considera que EE. UU ha generado 760 TWh hasta 1999; ello significa 5 ¢ por KWh.*

²⁰ *Jan Willem Storm van Leeuwen and Philip Smith, "Nuclear energy. The energy balance", julio de 2005.*

Este análisis del Oxford Research Group presenta cifras semejantes a los costos reales de operación según la experiencia histórica (tabla N° 6). Es decir, costos bastante más altos que los que presenta el supuesto de base del estudio del DOE Universidad de Chicago y las estimaciones de la Agencia Internacional de Energía.

Finalmente, en los costos de operación hay que calcular los costos del combustible. El costo del uranio proyectado por el estudio del DOE Universidad de Chicago es de US 4,3 dólares por kilovatio/hora, lo que duplica el costo de US 1,79 dólar por kilovatio/hora proyectado por la Agencia Internacional de Energía. Sin embargo, la experiencia histórica muestra un aumento sostenido de los precios del concentrado de uranio a nivel mundial, cuyo precio *spot*, según la UX Consulting Company, ha tenido un alza de 565% entre diciembre de 2004 y abril de 2007, fluctuando entre US 36,25 dólares y US 113 dólares la libra en el mercado *spot*.

Tabla N° 6
Costos de combustible, operación y mantenimiento.

En USD/KWh	Estudio DOE Universidad de Chicago	IEA World Energy Outlook 2006	Experiencia histórica
Costos de generación (USD / kWh)	4,7 - 7,1 €	4,9 - 5,7 €	22,3 €
Costos del combustible	4.3 USD/KWh	1.79 USD/KWh	Aumento de 565% entre 12/2004 y 04/2007 (f) de 36,25 a 113 USD/Kw entre 2004 y 2006
Costos de operación / mantención	10 USD/KWh	10 USD/KWh	18,53 USD con Fact Carga 85% 26,25 USD con Fact Carga 60% (g)

(f) Precios Spot de U_3O_8 , The Ux Consulting Company.

(g) Storm van Leeuwen "Nucleas energy. The energy balance", 2005. En base a costos de operación y mantenimiento de 138 millones de USD en 2002: Con un factor de carga del 85% tenemos 18.53 USD por megavatio/hora, cifra que aumenta 26.25 USD por megavatio/hora cuando el factor de carga disminuye al 60%.

2.4. Costos de generación nuclear comparados con otras tecnologías

Los costos de generación deberían estimarse en base a los costos reales de acuerdo a la experiencia histórica y no en base a supuestos teóricos no comprobados. Adicionalmente, en las decisiones sobre planificación energética, esos costos reales deben ser comparados con los costos de generación de otras tecnologías disponibles en el mercado. Esto, para evaluar el ciclo de vida y balance energético de cada opción tecnológica, a fin de asegurar la introducción de criterios de sustentabilidad ambiental y económica del desarrollo energético.

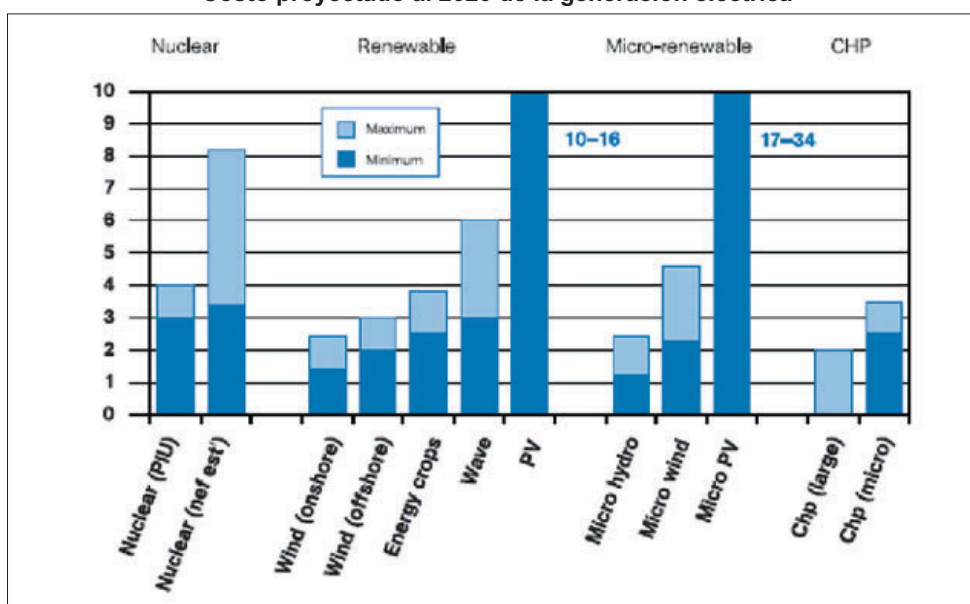
Respecto de los costos proyectados de generación eléctrica, el análisis del PIU Energy Review²¹ y de la New Economics Foundation presenta los costos mínimos y máximos de generación eléctrica proyectados al año 2020 mediante diversas tecnologías; comprobando que los costos

²¹ PIU Energy Review 2002; DTI/Ofgem 2004 -Distributed Coordinating Group, PO2a Working Paper Three: The Economic Value of Micro generation, Technical Steering Group.

mínimos y máximos de la opción núcleo-eléctrica (como ilustra el gráfico N° 10) son mayores que la generación mediante fuentes renovables (como la eólica, en tierra y plataformas marinas; la biomasa, la mareomotriz, la hidráulica y la cogeneración). Sólo la opción de generación eléctrica solar fotovoltaica resulta más cara que la opción nuclear.

Este análisis de costos comparados de generación eléctrica es coincidente con las opciones de inversión que han primado en los años recientes en el sector eléctrico, particularmente en los países de la OECD²², y explican la ausencia de nuevos proyectos nucleares.

Gráfico N° 10
Costo proyectado al 2020 de la generación eléctrica



Fuente: PIU Energy Review 2002; DTI/Ofgem 2004 -Distributed Coordinating Group, PO2a Working Paper Three: The Economic Value of Micro generation, Technical Steering Group.

²² Fuente: Clean Edge 2005, en Poniachik K, Ministra de Minería y Energía de Chile, Seminario Cámara Española de Comercio, Santiago Chile, julio, 2006.

3. LOS COSTOS NO CONSIDERADOS: PROCESOS POSTERIORES A LA GENERACIÓN NUCLEAR

El ciclo nuclear incluye también procesos y costos posteriores a la fase de generación. Estos deben ser evaluados como parte de los costos de la opción nuclear, y también en el balance energético de esta opción.

La fase posterior a la generación y a la vida útil del reactor contempla varios procesos:

- Desmantelamiento del reactor.
- Período de enfriamiento (10-100 años con operación y mantención después del cierre). Esto implica la disposición durante décadas en lugares adecuados del resto del combustible irradiado, para bajar la temperatura y la radioactividad.
- Demolición de las construcciones de la planta nuclear.
- Disposición del combustible y de otros desechos en contenedores adecuados.
- Construcción de depósitos geológicos adecuados.
- Disposición final de desechos radioactivos en depósitos geológicos.

Cada uno de estos procesos requiere insumos de materiales, energía, inversiones y personal técnico adecuado. Los montos en material y energía sólo pueden ser calculados de manera muy aproximada.

3.1. *Procesamiento de desechos*

Dentro de un reactor, la fusión nuclear produce una serie de reacciones nucleares que provocan que parte del combustible de uranio enriquecido se transforme en elementos extremadamente radioactivos. Por eso, el combustible nuclear gastado (también llamado combustible quemado o irradiado) es un material altamente peligroso que emitirá una gran cantidad de radiactividad a lo largo de decenas de miles de años y cuyo simple contacto por parte de cualquier ser vivo, incluidos los humanos, resulta letal.

El combustible quemado o irradiado es considerado como un residuo de alta actividad. En algunos casos se procesa para obtener algunos elementos como plutonio 235, material altamente radioactivo y utilizado para la fabricación de armas nucleares.

El reprocesamiento es una etapa que produce un volumen final de residuos radiactivos entre 160 y 189 veces mayor que el que entra inicialmente a dicho proceso. Las barras de combustible irradiado son cortadas y disueltas en soluciones ácidas. Posteriormente, luego de diversos tratamientos químicos, se separan algunos de los productos radiactivos. De este proceso surgen:

- a) Residuos que pueden ser categorizados en bajo, medio y alto nivel de radioactividad.
- b) Uranio que puede ser reintroducido en el ciclo de fabricación del combustible.

- c) Plutonio, que es utilizado para la fabricación de bombas atómicas y cuya obtención sólo se logra por reprocesamiento de combustible nuclear quemado, pues es un material que no existe en la naturaleza.

Por ejemplo, en Alemania, un reactor PWR de 1300 megavatios produce cada año cerca de 60m³ de residuos de nivel radioactivo bajo y medio, y cerca de 26 mgs. de combustible irradiado de alto nivel radiactivo. Durante su vida útil, considerando el límite actual operacional de 35 años de vida útil cada reactor, produce cerca de 300.000 m.³ de desechos radioactivos que deberán encontrar una disposición final en alguna parte del mundo²³.

3.2. Costos de procesamiento de los desechos radioactivos

De todos los ítemes considerados como supuestos de base, el procesamiento de desechos radioactivos es el que tiene menos fundamentos reales, ya que hasta el momento no hay una solución de largo plazo para el procesamiento y disposición final de los desechos radioactivos, situación que es ampliamente reconocida por la propia industria nuclear.

Por esta razón, el costo real de la disposición final de los desechos radioactivos y del desmantelamiento de las centrales son difíciles de prever. Las primeras experiencias demuestran que estos costos han sido extremadamente subevaluados. Para la Central francesa de Brennilis, por ejemplo, se había estimado que el desmantelamiento podría costar 20 millones de euros, pero la realidad es que actualmente ya se ha gastado 480 millones de euros²⁴. Y estos montos no consideran la gestión a largo plazo de los desechos nucleares en los depósitos geológicos.

Para la central Zorita, en España, cerrada en 2006, se estima un costo de desmantelamiento de 170 millones de euros, y un período de desmantelamiento y demolición que tomará más de 10 años, concluyendo preliminarmente en 2015. Por eso es muy probable que estos costos, al igual que en el caso de Brennilis, resulten en realidad mucho mayores que los proyectados por la Agencia Internacional de Energía (tabla N° 7).

²³ JÜRGEN KREUSCH y al.-*Nuclear Fuel Cycle, Nuclear Issues Paper No. 3, febrero 2006, Heinrich Böll Foundation.*

²⁴ *Cour des comptes du France, « Synthèse du rapport Public particulier. Le démantèlement des installations nucléaires et la gestion des déchets radioactifs », Enero, 2005.*

Tabla N° 7
Costos desmantelamiento y disposición final

En USD por KWh	Estudio DOE Universidad de Chicago (USD/KWh)	IEA World Energy Outlook 2006 (USD/KWh)	Experiencia histórica
Costos de dismantelamiento (USD/KWh)	No se incluye	1	Estimado para Brennilis (Francia) 20 millones €, actual 480 millones (a) Zorita (2006-2015) tendría un costo estimado de 170 millones € (b).
Costos de procesamiento y disposición final desechos (USD/KWh)	1	1-2	El proyecto Yucca Mountain aun sin licencia de la Comisión Reguladora Nuclear ya ha costado 9 mil millones de USD (c).

(a) *Cour des comptes du France*, Enero 2005.

(b) *El Mundo*, 02/05/2006. En el 2009 la propietaria Unión FENOSA traspasará la central a la empresa pública Enresa quien se hará cargo del desmantelamiento.

(c) *Conosur Sustentable*, Greenpeace, "A 20 años de Chernobyl Los Mitos de la Energía Nuclear". 2006.

Lo mismo ocurre para el caso del reprocesamiento y disposición final de desechos altamente radioactivos. En el pasado este tipo de residuos fue depositado en lugares no definitivos o bien se vertieron al mar. Esto último ha quedado estrictamente prohibido por la Convención del Mar, que ha sido ratificada por Chile y los países de América Latina.

Actualmente existen dos proyectos de disposición geológica de desechos relativamente avanzados en Estados Unidos: el Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) en Nuevo México y el de Yucca Mountain en el estado de Nevada. El WIPP es un proyecto piloto para residuos de la fabricación de armas nucleares y no se conoce su costo.

En el caso de Yucca Mountain, el Departamento de Energía (DOE) de Estados Unidos ha estudiado la geología del lugar por más de veinte años, siendo recomendado en 2002 como adecuado para depósito geológico, y ratificado por el Congreso para ese fin. El DOE ahora debe probar que el depósito puede contener en forma razonablemente segura los desechos radiactivos por 10.000 años²⁵ después de cerrarse. Pero la Comisión Reguladora Nuclear (NCR) aún no le concede el licenciamiento para construir el depósito, tampoco se conocen los montos de inversión requeridos para el proyecto, aunque en 2006 se reconocía haber gastado 9 mil millones de dólares hasta esa fecha, aun sin iniciar la construcción del proyecto²⁶.

²⁵ *Office of Civilian Radiactive Waste Management, US Department of Energy, Yucca Mountain Project en www.ocrwm.doe.gov/factsheets/doeymp0026sv.shtml*

²⁶ *Associated Press-2006, declaraciones del director del proyecto Yucca Mountain Project, en "Los mitos de la energía nuclear: a 20 años de Chernobyl" Greenpeace/Cono Sur Sustentable, 2006.*

A pesar de no existir información histórica fehaciente sobre lo que podría significar el costo de depósitos geológicos definitivos, la Universidad de Chicago y la Agencia Internacional de Energía estiman un costo de entre 1 y 2 dólares por kilovatio para el proceso de reprocesamiento y disposición final de desechos radiactivos.

3.3. El transporte de materiales nucleares

Los costos del transporte y las medidas de seguridad para el transporte del combustible y de los desechos radioactivos²⁷, tampoco son incluidos en los costos de operación de una central nuclear. Estos costos, tradicionalmente, en la práctica, han sido cubiertos por las fuerzas armadas o por operativos especiales gubernamentales.

Chile y Argentina se han enfrentado en varias oportunidades a los riesgos que implica el transporte de material radioactivo a través de sus aguas territoriales y de la zona económica exclusiva. Dichos transportes provenían desde reactores de Japón para ser reprocesados en la Hagué, Francia; también desde las instalaciones nucleares entre la costa oeste y la costa este de Estados Unidos. Esta situación ha llevado al Ministerio de Relaciones Exteriores de Chile a definir una política al respecto y al Congreso a modificar la Ley de Seguridad Nuclear, regulando expresamente el transporte de material radioactivo, incluido el paso por el mar presencial chileno²⁸.

Estas modificaciones a la ley se basan en la constatación de que la seguridad absoluta del transporte de material radioactivo, en lo que se refiere a incidentes, accidentes o ataques terroristas, es imposible. Los accidentes graves durante el transporte de desechos altamente radioactivos, combustible irradiado o dióxido de plutonio, pueden causar dosis agudas letales en la vecindad inmediata y dosis mortales a largo plazo y a varios kilómetros en el radio del accidente, además de daños irreversibles al medio ambiente. Esto, en países como Chile, cuya economía depende de recursos naturales, significaría, además de riesgos inaceptables para la salud humana, consecuencias devastadoras para la economía nacional.

²⁷ Storm van Leeuwen, *op. cit.*

²⁸ LEY-18302 de Seguridad Nuclear modificada por la Ley 19825 del 1.10.2002.

4. EL BALANCE AMBIENTAL Y ENERGÉTICO NEGATIVO DE LA OPCIÓN NUCLEAR

El ciclo completo de la cadena nuclear, desde la construcción de una central nuclear hasta la disposición final de los residuos, toma aproximadamente entre 100 y 150 años. El balance energético de toda la cadena nuclear incluye la producción de energía acumulada durante el ciclo de vida y el gasto de energía acumulado durante dicho período.

Actualmente, la mayor parte de los análisis económicos y tecnológicos sólo cubren la fase asociada a la producción de energía: la vida útil operacional de la central nuclear y la producción de electricidad. Sin embargo, se ignora el análisis de energía neta, al no incluir tanto los procesos anteriores a la generación de electricidad como los posteriores a la vida útil de la central nuclear.

4.1. *Balance energético del ciclo de vida*

Estudios recientes a nivel internacional ya han empezado a incluir el análisis del balance energético global del ciclo de vida de cada una de las opciones de generación de energía, incluida la núcleo-eléctrica. Dichos estudios establecen que un correcto balance energético de la cadena nuclear debe considerar:

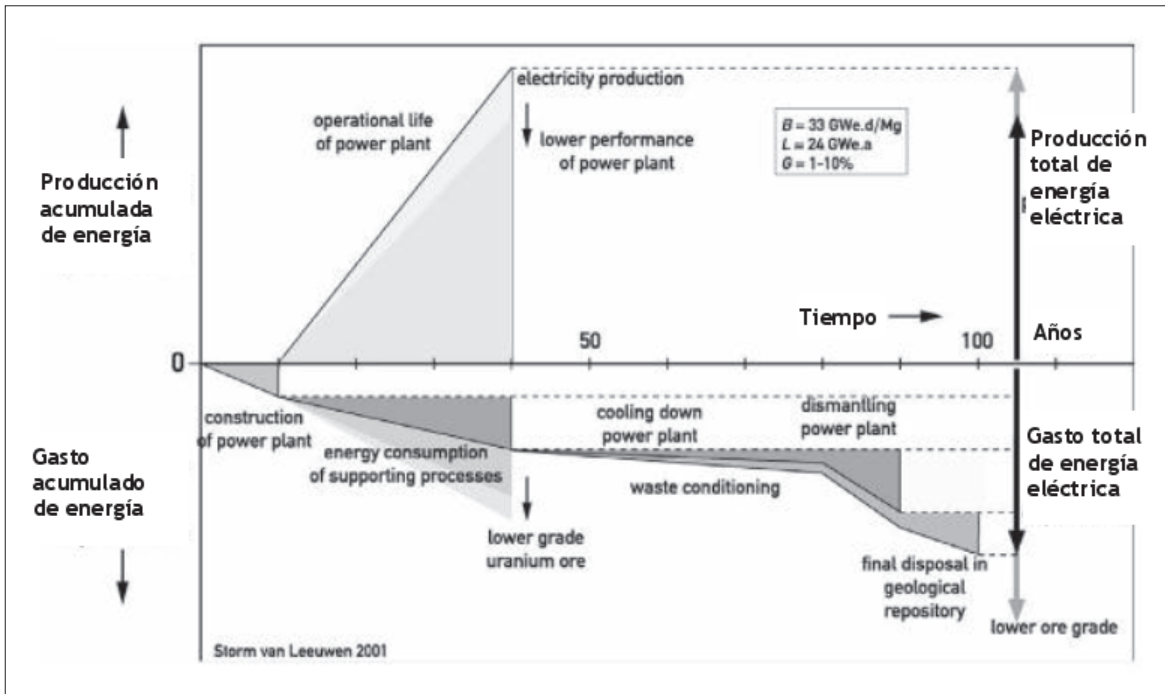
- Los costos energéticos necesarios para producir la energía.
- Los costos energéticos para reparar y restablecer la situación anterior a la producción energética (restauración de impactos mineros, desmantelamiento de la central, tratamiento de desechos radiactivos, confinamiento definitivo, etc.).

El balance energético del ciclo nuclear, como presenta la figura N° 3 en una línea de tiempo, incluye la generación eléctrica de la planta durante su vida útil; es decir, los primeros 30 años después de construida, y un consumo energético de más de 100 años. Este consumo considera la energía para construir la central y sus equipos; la energía para mantener la operación de la central durante los años de funcionamiento, incluyendo la energía gastada para extraer el uranio, concentrarlo y enriquecerlo para obtener el combustible nuclear; la energía para tratar y depositar definitivamente todos los desechos generados durante su funcionamiento; y la energía para desmantelar la planta luego de su vida útil.

Como se aprecia en la evaluación global de la central tras su ciclo completo de 100 años, existe un balance de energía neta muy estrecho (entre energía generada y energía consumida), lo cual se convierte en un balance negativo si la generación se realiza con uranio proveniente de reservas de baja ley, pues ello aumenta los insumos energéticos necesarios para producir el combustible nuclear.

El balance energético de la opción núcleo-eléctrica, también requiere analizar los años que quedan de energía nuclear neta con las actuales tasas de extracción de uranio, ya que la núcleo-electricidad es dependiente de las reservas de uranio existentes.

Figura N° 3
Esquema de producción energética y costos energéticos
en la generación nuclear en función del tiempo



Fuente: Jan Willem Storm van Leeuwen and Philip Smith, "Nuclear energy. The energy balance", Julio 2005.

En base a las estimaciones de reservas razonablemente aseguradas y conservando las tasas de extracción actual de uranio, e igual generación nuclear, Fleming, la Agencia Internacional de Energía Atómica y la industria nuclear estiman respectivamente en 60, 80 y 100 años la disponibilidad de reservas de uranio para mantener la generación actual.

En este contexto y realizando un balance de la generación neta existente en base a dichas reservas, se estima que sólo quedaría disponibilidad de uranio para generación energética neta de 15 años (Fleming), 25 años (AIEA) y 35 años (industria nuclear). Pues se requeriría el combustible equivalente a 15 años de generación para cubrir los procesos previos a la generación; 15 años de generación para tratar los residuos ya generados en los pasados 60 años y 15 más para tratar los desechos futuros. Lo que suman 45 años de generación para cubrir el gasto del ciclo de vida, quedando combustible sólo para generación de energía neta hasta 2025.

Tabla Nº 8:
Generación neta limitada a pocos años
El balance energético de la núcleo-electricidad
(en años de generación)

AÑOS DE GENERACIÓN NUCLEAR NETA. (en base a reservas uranio con ley similar a la usada actualmente)	Fleming	IAEA	Industria Nuclear
1. Años de generación eléctrica posible con las reservas de uranio disponibles, si se mantienen las tasas de extracción actual, y sin una expansión de la capacidad nuclear en el mundo.	60	80	100
2. Años de generación necesarios para cubrir los procesos energéticos previos a la generación eléctrica (25%).	15	20	25
3. Años de generación para tratar los residuos que se generarán en los años futuros de generación eléctrica (25%).	15	20	25
4. Años de generación para tratar residuos que se han generado en los últimos 60 años (25%).	15	15	15
5. Total de años de generación núcleo-eléctrica necesaria para cubrir todos los procesos (2+3+4.)	45	55	65
6. Años disponibles de núcleo-electricidad neta (1-5).	15	25	35
7. Punto de quiebre energético (toda la energía producida se necesita para tratar los desechos generados y futuros): 2010 + punto 6.	2025	2035	2045

Fuente: David Fleming, "The Lean Guide to Nuclear Energy: A Life-Cycle in Trouble", The Lean Economy Connection, febrero de 2007.

El Energy Watch Group, por su parte, estima el balance energético del combustible nuclear, en base a los kilos de roca que se debe extraer para obtener 1 kilo de uranio, según la ley del mineral. Esto permite establecer que, si la ley del mineral es de 1%, se necesita extraer 100 kilos de material para obtener 1 kilo de uranio; y si la ley del mineral es de 0,01%, se necesita extraer 10.000 kilos de material para obtener 1 kilo de uranio. Sobre esta base, concluye que la energía necesaria para cubrir la extracción, conversión, enriquecimiento, fabricación y transporte de combustible presenta un balance energético negativo si se extrae uranio con una ley menor a 0,02%-0,01%. Este hecho agrega un límite adicional en relación con las reservas de uranio actualmente existentes.

Tabla N° 9
Balance Balance negativo en referencia a reservas de Uranio

Ley del mineral [% U ₃ O ₈] (a)	Rendimiento del uranio (teórico) (b)	Rendimiento del uranio (empírico)	Demanda energética (teórica) E ₀ /(a)*(b)
1%	0,98	0,98	E ₀
0,10%	0,91	~0,9	11 veces E ₀
0,05%	0,86	~0,85	23 veces E ₀
0,03%	0,81	~0,75-0,8	41 veces E ₀
0,015%	0,74	~0,5	90 veces E ₀
0,010%	0,70	?? (prob. 0)	143 veces E ₀

Fuente: Energy Watch Group, "Uranium Resources and Nuclear Energy" 12/2006.

4.2. Emisiones de gases con efecto invernadero:

El argumento principal para proponer la reactivación y el desarrollo de la núcleo-electricidad consiste en afirmar que esta no produciría emisiones de carbono y por lo tanto contribuiría a combatir el cambio climático²⁹. Dichas afirmaciones se basan en la comparación de la generación nuclear con la generación a carbón o a gas, y sin incluir un análisis del ciclo completo de cada opción energética.

Desde el punto de vista de la sustentabilidad ambiental, y de las emisiones de carbono en particular, es fundamental evaluar con precisión todo el ciclo de vida de la generación eléctrica. El conocimiento de todos los procesos extractivos y productivos es fundamental para una evaluación a largo plazo de la reducción de gases con efecto invernadero (GEI). En el caso de

²⁹ " IEA Energy Technology Essentials-Nuclear Power, marzo de 2007. "Nuclear energy is a nearly carbon-free source of heat and electricity. When it replaces coal-fired power, the operation of a 1-GW nuclear power plant can avoid about 6-7 million tonnes of CO₂ per year, as well as related airborne pollutants».

la núcleo-electricidad, una proporción significativa de las emisiones de GEI proviene de procesos anteriores a la etapa de generación, pero que son esenciales para hacer posible la generación nuclear. Entre ellos, la extracción del mineral, su conversión, el enriquecimiento del uranio y la fabricación del combustible.

Sin embargo, pese a su importancia, los datos sobre las emisiones de GEI en las minas de uranio son muy escasos, también lo son respecto de la ley del mineral, que influye tanto en los costos como en las emisiones totales de GEI.

También son escasos los estudios sobre las emisiones de GEI en los procesos posteriores a la generación, como el desmantelamiento de las centrales, el tratamiento, reprocesamiento y disposición final de desechos radiactivos.

Uno de los pocos estudios que se hace cargo de calcular las emisiones de GEI durante todo el ciclo de vida de las diversas tecnologías de generación eléctrica, es el *Global Emission Model for Integrated Systems* (GEMIS), desarrollado por el Öko-Institut de Alemania. El modelo GEMIS³⁰ compiló datos sobre las centrales nucleares y la totalidad de sus ciclos de vida útil.

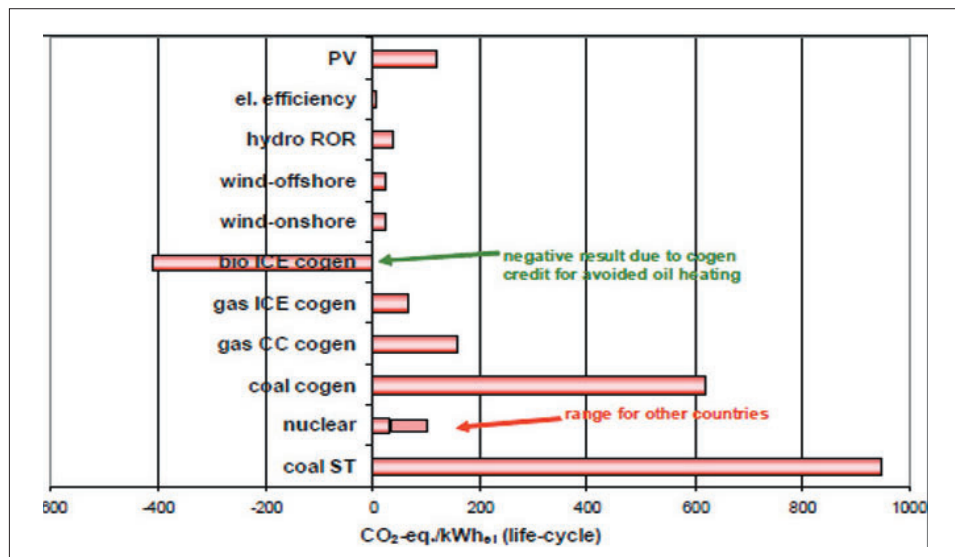
En base a esos datos se realizaron cálculos que permitieron concluir (para el caso de Alemania, donde se aplicó el modelo) que se generaban unos 31 gramos de CO₂ por kilovatio/hora de núcleo-electricidad. Los demás gases con efecto invernadero emitidos a lo largo del ciclo de vida nuclear aportan otros 33 gramos de CO₂-equivalentes por kilovatio/hora.

Para una central nuclear de tamaño estándar (1250 megavatios, 6.500 horas) en Alemania, las emisiones indirectas equivalen a un total aproximado de 250.000 toneladas cada año³¹. El gráfico N° 11, en la siguiente página, muestra los cálculos expresados en toneladas de carbono equivalentes, que fueron obtenidos con el modelo GEMIS para las diversas tecnologías.

³⁰ El modelo GEMIS (*Global Emission Model for Integrated Systems*) elaborado por el Öko-Institut está disponible como software de acceso público, para hacer prospecciones comparativas de los impactos ambientales de las diversas tecnologías utilizadas para la generación de electricidad. Ver: <http://www.oeko.de/service/gemis/en/index.htm>

³¹ Uwe R. Fritsche, *Comparison of Greenhouse-Gas Emissions and Abatement Cost of Nuclear and Alternative Energy Options from a Life-Cycle Perspective*, Öko-Institut e.V., Enero 2006.

Gráfico N° 11
Emisiones de CO₂ por tecnología de generación eléctrica



Fuente: Uwe R. Fritsche, *Comparison of Greenhouse-Gas Emissions and Abatement Cost of Nuclear and Alternative Energy Options from a Life-Cycle Perspective*, Öko-Institut e.V., Enero 2006.

Otros estudios internacionales, muestran cifras semejantes o más elevadas: entre 11 y 22 gramos de CO₂ por kilovatios/hora, según la OECD³²; entre 84 y 122 grs. de CO₂ por kilovatio/hora, Storm y Smith³³; y entre 10 y 130 gramos de CO₂ por kilovatio/hora, el ISA de la Universidad de Sydney³⁴.

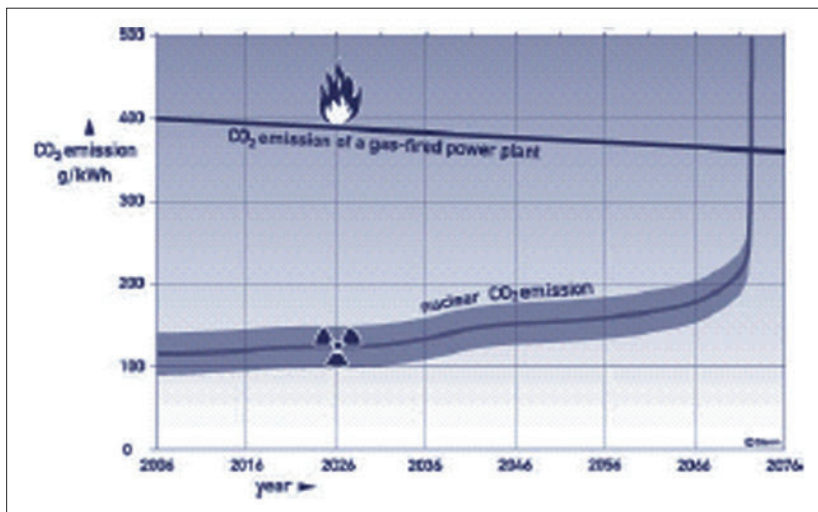
Por ejemplo, Storm y Smith, realizando un análisis del ciclo de vida, demuestran que si se consideran todas las etapas del ciclo, la generación núcleo-eléctrica proveniente de minerales de alta ley emite entre 15% y 40% de CO₂ por kilovatio/hora en relación con las emisiones de una central a gas. Pero si el mineral es de baja ley (menor a 0,1%; es decir, un kilo de uranio por tonelada de granito extraído), las emisiones aumentan rápidamente; y con concentraciones de 0,02 a 0,01% se llega a sobrepasar las emisiones de CO₂ de una central a gas. Es necesario destacar que la mayor parte de las reservas de uranio tienen esta y aun menores concentraciones de uranio (gráfico N° 12).

³² Frank Barnaby & James Kemp «Too hot to handle? The future of civil nuclear power» Oxford Research Group, Julio 2007

³³ Storm van Leeuwen, en Oxford Research Group «Secure Energy». www.oxfordresearchgroup.org.uk/pa/cm200506/cmselect/cmenvaud/584/58402.htm

³⁴ www.pmc.gov.au/umpner/doc/commissioned/isa_report.pdf

Grafico N° 12
Emisiones de CO2 en la generación nuclear³⁵



Fuente: Oxford Research Group »Energy Security and Uranium Reserves« Factsheet 4- Secure energy: options for a safer world- Julio, 2006.

4.3. La argumentación tecnológica: los reactores “breeder” o reactores reproductores rápidos

La argumentación de la industria nuclear, para soslayar el hecho de la escasez de reservas de uranio de alta ley, y mantener la actual generación nuclear o expandirla, es que existe una tecnología de generación núcleo-eléctrica que produce más combustible del que consume. Esta tecnología, denominada “fast breeder”, utiliza un reactor de neutrones rápido, diseñado para reproducir combustible, generando más material fisible del que consume. El objetivo es producir plutonio que, al ser reprocesado, permite obtener combustible MOX que posteriormente será utilizado en los reactores nucleares.

La tecnología de los reactores “fast breeder” ha fracasado en su intento de demostrar que la reproducción es factible, luego de 50 años de intensa investigación, con inversiones que cifran cientos de miles de millones de dólares. El reactor Monju (280 megavatios) de Japón, puesto en operación en 1995, fue cerrado definitivamente a los 4 meses de funcionamiento. Pero el más emblemático de los “fast breeder” es el reactor Superphenix, de Francia, de 1242 megavatios, cuya construcción comenzó en 1976 y se conectó a la red en 1986. Doce años más tarde fue cerrado definitivamente por los costos excesivos que implicaba su funcionamiento.

El Superphenix tuvo apenas en un año, en 1996, un factor de carga de 32%, con un máximo de operación de 5.692 horas, y una generación de apenas 3392 gigavatios. Su mal desempeño durante 9 años (6 operando y 3 parado) y con bajo rendimiento, hicieron inviable su funcionamiento³⁶, como se muestra en la tabla N° 10.

³⁵ El uso de combustible proveniente de un uranio con menor ley, implicara cada vez mas un incremento en las emisiones de CO₂ en el ciclo de la cadena nuclear.

³⁶ :IAEA, Power Reactor Information System, año

Tabla Nº 10
Rendimiento del Superphenix durante sus años de operación comercial

Año	Energía	Capacidad	Factor de disponibilidad energética	Factor de Carga	Operación Anual	Factor de operación
	(GWe.h)	(MWe)	Anual (%)	Anual (%)	(horas)	(%)
1986	929	1200	10,6	9,16	2625	31,1
1987	812	1200	8,4	7,73	1489	17,0
1988	0	1200	0,0			
1989	1.756	1200	17,4	16,71	2202	25,1
1990	588	1200	14,3	5,60	595	6,8
1991	0	1200				
1992	0	1200				
1994	8	1200	0,1	0,07	58	0,7
1996	3.392	1200	32,6	32,18	5692	64,8

Fuente: IAEA, Power Reactor Information System

Pero a pesar de estos hechos, la Agencia Internacional de Energía continúa declarando que “fast breeder reactors” (reactores reproductores rápidos) pueden en principio aumentar 30 veces o más la energía extraída del uranio natural³⁷.

³⁷ " IEA Energy Technology Essentials-Nuclear Power, marzo de 2007. **“Nuclear energy is a nearly carbon-free source of heat and electricity. When it replaces coal-fired power, the operation of a 1-GW nuclear power plant can avoid about 6-7 million tonnes of CO2 per year, as well as related airborne pollutants».**



INSUSTENTABILIDAD ECONÓMICA, AMBIENTAL Y POLÍTICA DE LA OPCIÓN NUCLEAR

El análisis convencional en torno a la núcleo-electricidad no incluye el abordaje de problemas que deben ser estudiados en profundidad, antes de pensar en dicha opción de generación. No considerar estos problemas puede aumentar la vulnerabilidad ambiental y la insustentabilidad económica y política de la matriz eléctrica de los países de America Latina.

1. SUBSIDIOS DIRECTOS E INDIRECTOS DEL ESTADO

Los enormes subsidios estatales a la industria nuclear están ampliamente reconocidos en la literatura especializada. La razón se debe principalmente a que estas tecnologías han estado siempre estrechamente ligadas a las políticas de defensa nacional y al desarrollo de las armas nucleares.

Es solo a partir de los años '80, en los inicios del proceso de liberalización de los sistemas eléctricos en las diversas regiones del mundo, que las ayudas directas gubernamentales se comienzan a transparentar. Este período además se caracterizó por la suspensión de la mayor parte de los proyectos de centrales nucleares en los países industrializados.

Según el estudio de Goldberg³⁸, desde 1947 a 1961 la industria núcleo-eléctrica de los Estados Unidos fue subsidiada por un monto de US 39,4 mil millones de dólares, lo que equivale a US 15,3 dolares por kilovatio/hora generado durante dicho período.

³⁸ Goldberg, M., *Federal energy subsidies: Not all technologies are created Equal*, REPP, Julio 2000 in European Environment Agency, *Energy subsidies in the European Union: A brief overview*, Technical Report, 2004.

1.1. Seguros

Entre los subsidios indirectos que ha tenido esta industria están las leyes nacionales específicas, que ponen un techo a los montos de los seguros ante incidentes o accidentes nucleares, tanto durante el funcionamiento de las plantas como durante el transporte de combustible o de material radioactivo.

Por ejemplo, en Estados Unidos existe una ley con vigencia hasta 2026, llamada Price-Anderson Nuclear Industries Indemnity Act, que establece que cualquier incidente por sobre los US 10 mil millones de dólares será financiado por el gobierno federal. En 2005, en caso de incidente o accidente nuclear en Estados Unidos, el importe máximo de un seguro para una planta nuclear era de US 300 millones de dólares (fuente). Los daños por sobre este monto deben ser financiados por todas las empresas que poseen centrales nucleares, con un tope máximo para cada una de US 95,8 millones de dólares.

Esta ley fue establecida en 1957 como un incentivo a la producción privada de energía nuclear, dado que los inversionistas no estaban dispuestos a aceptar los riesgos que implican estas tecnologías sin que el Estado pusiera un límite a la responsabilidad civil.

1.2. Seguridad de las instalaciones y del transporte nuclear

Como se ha mencionado anteriormente, la seguridad de las instalaciones nucleares debe ser supervisada y fiscalizada por instituciones adecuadas. Además, se debe considerar la posibilidad de sismos, terremotos, tsunamis y ataques terroristas a las instalaciones nucleares, las que generalmente son protegidas por dispositivos de la defensa nacional.

El transporte de materiales radioactivos también debe contar con protección especial, la que en general corre por cuenta de servicios estatales de seguridad pública o defensa nacional con cargo a fondos del Estado, lo cual constituye un subsidio adicional a la generación núcleo-eléctrica.

El Estado también debe disponer de sistemas adecuados para la protección de la salud de la población y del medio ambiente frente a incidentes y accidentes radioactivos.

Finalmente, los estudios sobre posible localización de las centrales, la adaptación de la red eléctrica, la adecuación de rutas y carreteras y otras infraestructuras son áreas del desarrollo nuclear que generalmente han sido realizados con fondos fiscales.

1.3 Inversión científica y formación tecnológica

El manejo de procesos nucleares con niveles de seguridad que prevengan incidentes radioactivos exige una formación científica y tecnológica inexistente en la mayor parte de los países de América Latina. Es más, en opinión del propio sector académico, países como Chile se caracterizan por una cantidad muy reducida de profesionales capacitados y activos en

física experimental, y con capacidad de entregar formación a nivel de doctorado. A modo de comparación, la cantidad de físicos experimentales como fracción de la población es aproximadamente 400 veces menor que en Estados Unidos, o 6 veces menor que en Brasil”.

Para Chile, la opción núcleo-eléctrica implicaría un compromiso e inversión del Estado en una línea de desarrollo científico y tecnológico que distorsiona gravemente los desafíos del país en ciencia, innovación y tecnología; también requeriría la implementación de cátedras nacionales y formación académica en el extranjero de centenares de profesionales altamente calificados, para manejar tecnologías extremadamente complejas y riesgosas, con poco potencial de apropiación nacional.

Entre ellos debería contarse a lo menos con profesionales como físicos experimentales, titulados en Física Nuclear aplicada; físicos experimentales e ingenieros en Ciencias de Materiales; ingenieros en técnicas nucleares; químicos nucleares; constructores civiles especializados; ingenieros en medio ambiente y biólogos especializados en impactos radioactivos y médicos expertos en contaminación radioactiva.

2. LA GENERACIÓN DE EMPLEOS: COMPARACIÓN CON OTRAS TECNOLOGÍAS.

Otra argumentación que no puede ser desestimada es aquella que destaca el potencial de la generación núcleo-eléctrica en la creación de empleos, los aportes a las economías, y el entrenamiento de ingenieros y científicos para otras tecnologías de generación eléctrica.

La electricidad nuclear en todo el mundo es subsidiada por el Estado, con los impuestos de los ciudadanos. Es decir, cada empleo nuclear recibe un subsidio público, el que se suma al subsidio para seguridad y control, transporte de materiales sensibles, seguros por caso de accidentes, etc

Adicionalmente, la generación nuclear presenta uno de los problemas más difíciles de enfrentar y revertir en la economía de muchos países en desarrollo: la dificultad de generación de empleos en sectores económicos intensivos en capital, tales como la minería y la energía. En Chile, por ejemplo, ambos sectores son los mas intensivos en capital y menos intensivos en empleo: en minería, con 33% de la inversión extranjera, sólo genera 2% del empleo, mientras que el sector energía, con 20% de la inversión extranjera, genera solo 1% del empleo.³⁹

Este hecho es particularmente grave en el caso de la núcleo-electricidad, en comparación con otras opciones tecnológicas de generación eléctrica. Un estudio realizado por el brasileño Jose Goldenberg, uno de los especialistas en energía más reconocido a nivel mundial, muestra que la opción nuclear es la de peor desempeño con la creación de apenas 75 empleos por

³⁹ Instituto Nacional de Estadísticas, *Participación económica de sectores en empleo e inversión extranjera total entre 1990-2002, (Comité de Inversiones Extranjeras) Chile*

teravatio/hora, en comparación con 120 empleos por teravatio/hora de la mini-hidro; 250 del gas natural y la gran-hidro; entre 700 y 1000 de la leña: entre 900 y 2400 de la energía eólica, etc. (Tabla N° 11)

Tabla N° 11
Creación de empleos por año y TWh
Incluyendo producción del combustible y generación eléctrica

Nuclear	75
Mini-hidro	120
Gas natural	250
Hidroelectricidad	250
Carbón	370
Bio-masa (leña)	733 - 1067
Energía eólica	918 - 2.400
Bio-masa (caña de azúcar)	3.711 - 5.920
Fotovoltaica	29.580 -107.000

*Fuente: José Goldemberg, "The Case for Renewable Energies"
International Conference for Renewable Energies, Bonn 2004.*

3. IMPACTOS Y VULNERABILIDADES AMBIENTALES

Actualmente existe una vasta literatura sobre los impactos de los elementos y la contaminación radiactiva sobre la salud humana, y estrictas regulaciones para prevenir incidentes o accidentes. Sin embargo, a nivel internacional, existe menos información sobre los impactos ambientales del ciclo de vida de la energía nuclear, particularmente sobre la minería del uranio, los desechos de alta radioactividad y los accidentes de plantas nucleares. De estos, la información más abundante es la sobre los accidentes de Three Mile Island en Estados Unidos en 1979 y de Chernobyl, en Ucrania en 1986. En América Latina destaca como el caso más grave el derrame de cesio 137 en Goiania, Brasil, en 1987.

Posteriormente al grave accidente de Chernobyl han continuado ocurriendo varios incidentes de magnitud en plantas nucleares, significando riesgos graves para la población y los ecosistemas. Muchos de ellos han requerido el cierre de las plantas. Algunos de los accidentes ocurridos después de Chernobyl son los siguientes:

- **Alemania, 4 de mayo de 1986:** el reactor THTR-300 de Hamm-Uentrop sufrió un escape de radiación que se pudo detectar a dos kilómetros del reactor.
- **Ex República Democrática Alemana (RDA), 1989:** fusión parcial del núcleo en la central de Greifswald.
- **España, 19 de octubre de 1989:** la central nuclear de Vandellós, sufrió un incendio en la zona de turbinas.

- **Rusia (Ex Unión Soviética), 6 de abril de 1993:** fallo mecánico explosivo, en un vaso reactor de las instalaciones de reprocesado de plutonio de la Empresa Química Siberiana en Tomsk. La explosión desplazó la cubierta de hormigón del búnquer, y voló una amplia sección del tejado del edificio, permitiendo el escape de aproximadamente 6 gigabequerel (GBq) de 239 plutonio (Pu) y 30 terabequerelio (TBq) de varios otros elementos radiactivos. La contaminación se extendió por 28 kilómetros en dirección noreste.
- **Japón, 30 de septiembre de 1999:** accidente en la central de reprocesado de uranio en Tokaimura. Tres trabajadores fueron expuestos a dosis de radiación neutrónica por encima de lo permitido, y dos de ellos murieron. Otros 116 empleados recibieron dosis de 1 mSv o más.
- **EE.UU., 15 de febrero de 2000:** el reactor número 2 de la central nuclear de Indian Point, descargó una pequeña cantidad de vapor radiactivo tras la rotura de una tubería del generador de vapor.
- **Japón, 9 de febrero de 2002:** incendio en los cimientos del reactor número 3 en la central nuclear de Onagawa.
- **Gran Bretaña, 19 de abril de 2005:** una solución de 20 toneladas de uranio y 160 kgs. de plutonio en 83.000 litros de ácido nítrico se filtró desapercibidamente durante varios meses, por una tubería rota, en la planta de reprocesado de combustible nuclear THORP. El derrame, parcialmente procesado, fue bombeado a tanques en el exterior de la planta.
- **Gran Bretaña, septiembre de 2005:** la central de cimentado de Dounreay fue cerrada después de un vertido de 266 litros de residuos radiactivos de reprocesado.
- **Japón, julio de 2007:** A consecuencia de un sismo de intensidad 6,8 grados Richter, la central Kashiwazaki Kariwa sufrió un incendio parcial, derrames radioactivos al mar y derrame de 40 contenedores con desechos radioactivos sólidos, además de filtraciones de cromo, yodo y cobalto en una de las chimeneas del complejo nuclear.

Sin embargo, el accidente de Chernobyl es el más estudiado en la historia de la industria nuclear. La imagen y tablas a continuación muestran de acuerdo a los estudios de la Organización Mundial de la Salud, el Organismo Internacional de Energía Atómica y otras agencias internacionales, los afectados directos por el accidente y las dosis recibidas por la población local entre 1986 y 2005, en relación a la radiación natural.

Tabla Nº 12
Resumen de dosis medias acumuladas en
las poblaciones afectadas por el accidente de Chernobyl

Categorías de población	Número	dosis media (mSv)
Trabajadores que participaron en la mitigación (1986-1989) llamados liquidadores	600 000	~100
Evacuados de las zonas altamente contaminadas (1986)	116 000	33
Residentes de las zonas de "control estricto" (1986-2005)	270 000	>50
Residentes de otras áreas contaminadas (1986-2005)	5 000 000	10-20
Radiación natural promedio durante todo un año		2,4

Fuente: *The Chernobyl Forum 2003-2005, IAEA, WHO, UNDP et al.*

El mapa (Figura N° 4) presenta la expansión de la nube radioactiva sobre Ucrania. Bielorrusia y los diversos países europeos, seguido de las estimaciones sobre morbilidad y mortalidad de los afectados directos entre 1986 y 2056 (proyección a 70 años) por cánceres a la tiroides, leucemia y otros cánceres tanto en Bielorrusia como en los demás países afectados (Tabla N° 13).

Figura N° 4
Extensión de la nube radioactiva por el accidente de Chernobyl



Fuente: The Chernobyl Forum 2003-2005, "Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine", IAEA, WHO, UNDP y otros asociados.

Tabla N° 13
Estimaciones de la morbilidad y mortalidad en cánceres
a raíz del accidente de Chernobil entre 1986 y 2056 (70 años)

Patología	Morbilidad		Mortalidad	
	Todos los países	Bielorusia	Todos los países	Bielorusia
Cáncer a la tiroides	31.400	137.000	3.140	13.700
Otros cánceres	28.300	123.000	16.400	71.340
Leucemia	2.800	12.000	1.880	8.040
Total	62.500	270.000	21.420	93.080

Fuente: Greenpeace, "The Chernobyl Catastrophe Consequences on Human Health", 2006.

Además de los impactos por probables incidentes o accidentes producidos en plantas de generación núcleo-eléctrica y procesos asociados, se deberá también tener en cuenta la gestión de los desechos a corto y a largo plazo, su disposición definitiva, el desmantelamiento de las plantas nucleares, así como todos los riesgos cuando el material radioactivo es transportado a lo largo de los diversos procesos industriales de la cadena nuclear.

Dentro de los riesgos de la industria nuclear con mayor visibilidad durante 2007 están aquellos provenientes de los eventos sísmicos, como lo ocurrido en la planta nuclear Kashiwazaki Kariwa, en Japón. Las fugas radiactivas provocadas por un terremoto de apenas 6,8 grados Richter, reinstalan la preocupación y alerta internacional ante los riesgos humanos y ambientales que acarrea la opción nuclear. El riesgo sísmico en países como Chile, cuyos más recientes terremotos superaron ampliamente esos niveles, con 9,7 grados Richter (Valdivia) en el año 1960 y 8,5 grados Richter (zona central) el año 1985, implica asumir riesgos inaceptables. El terremoto de Niigata y Kyoto, que afectó la planta nuclear de Kashiwazaki Kariwa, echa por tierra el principal argumento del *lobby* nuclear, en el sentido que Chile podría acceder a una tecnología “de vanguardia”, similar a la nipona, y superar así el peligro latente de los terremotos.

Actualmente, el requerimiento de seguridad sísmica para la construcción de plantas nucleares en EEUU y Japón es de 7,7 grados Richter⁴⁰; y sabemos que Japón lo aplica con el máximo estándar de tecnología antisísmica. Este hecho pone en cuestión los niveles de seguridad que asume la industria nuclear, los que resultan francamente insuficientes. Para el caso de muchos países de América Latina, que frecuentemente sufren sismos de alta intensidad, ello significaría asumir irresponsablemente niveles de vulnerabilidad potencialmente catastróficos.

Un segundo aspecto que queda en evidencia luego de este derrame radiactivo en Japón, es la falta de transparencia de la industria nuclear, hecho que también quedó en evidencia en el caso de Three Miles Island y de Chernobyl. El ocultamiento frecuente de información por parte del sector nuclear ha agravado siempre los impactos de esta tecnología sobre el medio ambiente, la salud y vida de las personas.

En la central de Kashiwazaki Kariwa se comprobaron 50 fallas y derrames tras el terremoto, incluyendo incendios, escapes de agua radiactiva que fueron a parar al océano con consecuencias indeterminadas, además de derrame de desechos radiactivos, tuberías desplazadas y diversos equipos rotos. Esto sólo se conoció luego de que el alcalde de Kashiwazaki ordenó mantener cerrada la planta y presionó a la empresa eléctrica Tokyo Electric Power (TEPCO), a informar a la población.

Luego de ello, en una segunda versión de lo ocurrido, la empresa reconoció que se derramó el doble de agua radioactiva al mar; que los barriles de desechos radioactivos sólidos que se volcaron no eran 100, sino 400 y que 40 de ellos se abrieron derramando desechos radiactivos. Adicionalmente admitió haber detectado emisiones con niveles anormales de isótopos radiactivos de cromo 51, yodo y cobalto 60 en una chimenea de los reactores. Ante estos hechos, el gobierno central ordenó clausurar la central hasta saber de los verdaderos alcances del incidente. Lo acontecido, sin duda obligará al gobierno japonés a evaluar y elevar las exigencias de seguridad a su industria nuclear.

⁴⁰ Nuclear Energy Institute, con sede en Washington.

4. LOS ASPECTOS GEOPOLÍTICOS DEL CICLO DE COMBUSTIBLE

4.1 Vulnerabilidad y tensiones geopolíticas:

Por su doble utilización para generación eléctrica y fabricación de armas nucleares, la tecnología nuclear siempre ha constituido un factor de alta incidencia en la seguridad nacional e internacional. A pesar del Tratado de No Proliferación Nuclear (TNP) de 1970⁴¹ y del fin de la Guerra Fría, el enriquecimiento de uranio y el dominio del ciclo de combustible nuclear han continuado generando tensiones geopolíticas y constituyendo causa y justificación de conflictos bélicos, tales como los de la invasión de Irak y las recientes tensiones entre Estados Unidos y otras potencias nucleares, con Irán y Corea del Norte.

Actualmente, a pesar del TNP y del control que ejerce el sistema de Naciones Unidas sobre la tecnología y los materiales nucleares a través de la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA); la comunidad internacional evalúa que no existen garantías para asegurar un uso exclusivamente pacífico de la tecnología nuclear.

Desde fines de los años 80, la mayor parte de los países de Europa abandonó la opción nuclear de su política energética, por razones de rechazo ciudadano y por los riesgos de esta tecnología para la salud y el ambiente; pero también crecientemente por las tensiones geopolíticas y los riesgos de terrorismo. Esta razón ha sido especialmente sensible para Inglaterra, afectada recientemente por tráfico de polonio, material radioactivo que además de haber provocado muertes e involucrado a agentes de servicios secretos estatales, entre ellos el de la Federación Rusa, evidencia los desafíos a la seguridad que presentan los materiales utilizados en esta tecnología.

El conjunto de riesgos asociados a la proliferación de la tecnología nuclear y a los materiales radioactivos susceptibles de ser utilizados con fines bélicos, ha sido una de las razones por las cuales, políticamente, la Unión Europea no consideró la opción nuclear en su plan energético para enfrentar el cambio climático, a pesar de la insistencia de algunos gobiernos, como el de Francia.

A pesar de que el control de salvaguardias de la AIEA ha sido reforzado recientemente para asegurar que no se desarrollen materiales, ni actividades nucleares no declaradas⁴², ni que se desvíen materiales nucleares de programas civiles hacia desarrollos militares, es claro que los recursos de dicha institución y su régimen de salvaguardias no han sido capaces de asegurar la prevención de la actual proliferación nuclear, y ciertamente tampoco de los futuros.

⁴¹ El Tratado de No Proliferación de Armas Nucleares, de 1970, tiene 187 países miembros, y compromete transferencia tecnológica para uso pacífico de la energía nuclear a los países que no poseen esta tecnología a que no poseen armas nucleares.

⁴² IEA (Agencia Internacional de Energía. AIE en español) IEA Energy Technology Essentials: Nuclear Power, march 2007.

La misma AIEA ha reconocido que convertir plutonio (extraído de combustible nuclear quemado) en bombas sólo requiere entre 7 y 10 días. Institucionalmente, a pesar de ser el brazo operativo del Tratado de No Proliferación Nuclear, la AIEA no tiene recursos ni atribuciones para regular e inspeccionar las instalaciones nucleares a nivel mundial, en rangos que reduzcan el riesgo de actividades militares clandestinas⁴³. Ello ha quedado en evidencia en la evaluación realizada a dicha institución en 2005, la cual demostró que cuatro países: Israel, Corea del Norte, India y Pakistán, han desarrollado armas nucleares a partir de sus programas civiles. La AIEA reconoce que en los próximos 30 a 40 años cerca de treinta países podrían tener, en base a sus programas civiles, materiales y personal técnico capacitado para fabricar armas nucleares.

4.2- Terrorismo e inseguridad:

Es claro que cualquier expansión de los programas nucleares a nivel mundial incrementará la producción, transporte y utilización de materiales sensibles, intensificando aun más los actuales riesgos de terrorismo y de proliferación. Por ello los escenarios futuros refuerzan aun más la preocupación por los aspectos geopolíticos y de seguridad de la tecnología nuclear.

Una nueva fase de generación nuclear enfrentaría un contexto donde muy probablemente los niveles de inseguridad y vulnerabilidad se intensificarán debido a la competencia por recursos naturales como el agua y el petróleo; por los impactos del cambio climático; por el desarrollo y acceso a elementos nucleares y biológicos susceptibles de uso bélico; y en un contexto donde no es claro quien responderá en caso de accidentes o acciones terroristas⁴⁴.

La acción terrorista más simple en base a materiales nucleares es el uso de un arma radiológica. Esto se conoce como “bombas sucias” pues consiste en un explosivo convencional (dinamita, TNT, etc.), algún material incendiario y cierta cantidad de un isótopo radiactivo. Así, aún no existiendo explosión nuclear, se genera una grave contaminación radioactiva. Para este tipo de atentados, lo más probable es la utilización de radioisótopos de fácil acceso, que poseen larga vida media y emiten rayos gamma como el cesio 137, el cobalto 60, el iridio 192, u otros como el estroncio 90, que emite partículas beta y se concentra en los huesos.

Si una bomba sucia se realizara en base a plutonio, el impacto masivo sobre la salud humana sería devastador. También es posible la utilización de desechos radioactivos para fabricación.⁴⁵ El efecto en todos los casos será muertes, altas incidencias de cáncer, pero también pánico, contaminación de la infraestructura y de la cadena alimentaria, con efectos catastróficos sobre la economía.

⁴³ Oxford Research Group "Secure Energy?. Are the risks of new nuclear power too great?", Summer 2007.

⁴⁴ Ibid nota 44

⁴⁵ Barnaby, Frank y Kemp, James "Too hot to handle?: the future of civil nuclear power", Oxford Research Group, London, United Kingdom, Julio, 2007.

Otra de las acciones que se prevé en los análisis de seguridad es el ataque terrorista a centrales nucleares. Se han identificado dos blancos potenciales en este tipo de acciones: el reactor mismo y las piscinas de enfriamiento del combustible quemado ya utilizado. Un ataque al reactor puede provocar un colapso del núcleo del reactor e incendio (como ocurrió en Chernobyl), o provocar pérdida del refrigerante del núcleo del reactor (como ocurrió en Three Miles Island)⁴⁶

Como explicamos en capítulos anteriores, el ciclo del combustible nuclear incluye procesos que se desarrollan en diversos países, desde la extracción del uranio hasta el reprocesamiento y disposición final de desechos. Por ello, anualmente se desarrollan miles de transportes de materiales susceptibles de ser usados para fabricar bombas nucleares o bombas radiológicas o “sucias”⁴⁷.

Por ello, un aumento de estos transportes implicaría mayores costos para los Estados en sistemas y personal de seguridad, inteligencia y prevención de contaminación. Estas condiciones ciertamente no podrán ser asumidas adecuadamente en la mayoría de los países cuyo personal, sistemas regulatorios, fiscalización y de control están menos desarrollados.

Reducir estos riesgos requiere incrementar los niveles de seguridad de los transportes y de las instalaciones nucleares, lo que significará mayores costos para la generación nuclear.

4.3 Dependencia tecnológica y vulnerabilidad

Otro factor de vulnerabilidad que implicaría la opción nuclear para nuestro país, es el incremento de materiales nucleares contaminantes en el territorio nacional, y la adopción de un paquete tecnológico que nos haría más dependientes, no sólo porque el sistema de salvaguardias y controles de esta tecnología impiden acceder a todos los procesos, sino también porque las potencias nucleares no transfieren todo el paquete tecnológico del ciclo de combustible; lo que nos haría depender de muy pocos países que dominan todos los procesos de la cadena nuclear:

- a) Dependeríamos de un reducido número de países que pueden fabricar el combustible nuclear (en particular, Francia, Canadá, Japón, Rusia, Inglaterra, EE.UU., Bélgica, Alemania, Corea del Sur, España y Suecia)
- b) Dependeríamos de un número aún más reducido de países que pueden reprocesar los desechos radioactivos (Francia, Japón, Rusia e Inglaterra.)
- c) Dependeríamos del único país -Rusia- que ha aceptado los desechos radioactivos de otros países en su territorio, en la localidad de Mayak⁴⁸. Salvo que Chile aceptara la disposición geológica de desechos altamente radioactivos en el territorio nacional.

⁴⁶ Ibid nota 46.

⁴⁷ Oxford Research Group “Secure Energy ? Are the risks of new nuclear power too great?”, Summer 2007.

⁴⁸ IAEA, (AIEA en español) “Country Nuclear fuel Profiles”, Technical Report Series n° 425, Vienna 2005.

La opción nuclear también significaría para Chile hacer más rígido su sistema eléctrico, ya que las centrales actualmente más competitivas son de gran potencia, en torno a los 1000 megavatios, lo que resulta inadecuado para el tamaño relativamente pequeño del sistema eléctrico chileno, y para la estabilidad de los sistemas eléctricos del Norte Grande (SING) y el Sistema Interconectado Central (SIC).

Adicionalmente a la vulnerabilidad energética, a la dependencia tecnológica y a los riesgos de seguridad militar, humana y ambiental, optar por la tecnología de generación nuclear significaría para Chile concentrar inversiones de gran escala en una tecnología compleja, riesgosa y rechazada por la ciudadanía, apartando al país de la tendencia mundial que apunta prioritariamente al liderazgo de las energías limpias, renovables y socialmente populares, para enfrentar la seguridad energética y el calentamiento global.

5. CONCLUSIONES

Desmantelamiento de centrales, falta de contratos y “lobby” nuclear.

Los accidentes de Three Mile Island y de Chernobyl entre otros, al igual que la incapacidad de la industria nuclear para atraer las inversiones privadas, detuvieron a partir de los años ‘80 el desarrollo de la núcleo-electricidad en el mundo. Actualmente, la mayoría de las centrales nucleares en funcionamiento están llegando al fin de su vida útil proyectada para 40 años.

Adicionalmente, países como Bélgica, Alemania, Holanda, España y Suecia ya establecieron en los años 90 acuerdos políticos para evitar la construcción de nuevas centrales; o bien establecieron un cronograma con planes de cierre para las que están aún en funcionamiento.

Tabla N° 14
Centrales con Planes de Cierre 2004-2007

País	Nombre Planta	Capacidad Neta MW
Suecia	Barsebäck 2	600
Alemania	Obrigheim	340
España	Zorita	142
Bulgaria	Kosloduy	816
Eslovaquia	Bohunice	408
Lituania	Igualina 1	1.185
Inglaterra	Dungeness A	450
	Sizewell A	420
	Chapelcross	200

Fuente: Agencia Internacional de Energía Atómica.

Además del cierre definitivo de centrales en Eslovaquia, Bulgaria, Inglaterra, España, Alemania, Suecia y Lituania durante el período 2004-2007 (Tabla N° 14), se espera que entre 2007 y 2009 se cierren al menos 13 centrales que cumplen con su vida útil (Tabla 15). Esta situación implica un gran costo para la industria nuclear que tendrá dificultades de enfrentar si no logra contratos para nuevas plantas nucleares.

Tabla N° 15
Cierre previsto de centrales 2007-2009

País	Nombre	Capacidad Neta MW	Comienzo operaciones
Francia	Phenix	233	1974
Alemania	Biblis A	1.167	1974
	Neckarwestheim	785	1976
	Biblis B	1.240	1976
	Brunsbüttel	771	1976
Lituania	Ignalina 2	1,185	1987
	Bohunica 2	408	1980
Inglaterra	Sizewell A1	210	1961
	Sizewell A2	210	1961
	Oldbury A1	230	1962
	Oldbury A2	230	1962
	Wylfa 1	490	1963
	Wylfa 2	490	1963

Fuente: Energy Watch Group, "Uranium Resources and Nuclear Energy", EWG-Series No 1/2006, Diciembre 2006.

Esta situación, junto a las dificultades para resolver aspectos críticos de la tecnología nuclear, tales como el problema de los desechos y los riesgos de terrorismo y proliferación; así como su incapacidad para superar el rechazo ciudadano, coloca a la industria nuclear frente a dificultades estructurales que ciertamente no auspician su desarrollo⁴⁹. Si estos problemas no son resueltos por la industria nuclear, de acuerdo a los organismos internacionales especializados, la generación nuclear no se expandirá, sino tenderá a caer y a desaparecer en el futuro.

Adicionalmente, la reticencia de los privados a asumir los riesgos de inversión de la tecnología nuclear, muy posiblemente reduzca cada vez mas este tipo de generación. Ante esta situación, la decaída industria nuclear ha tratado de introducir cambios en las políticas públicas en diversos países para mantener sus actividades. Entre ellas, se ha esforzado por lograr:

1. Que la vida útil permitida de las centrales (hoy de 30-40 años) sea extendida a 60 años.

⁴⁹ IEA (Agencia Internacional de Energía. AIE en español) IEA Energy Technology Essentials: Nuclear Power, march 2007.

2. Que el desmantelamiento y la disposición geológica de los desechos sea retomado y financiado por organismos estatales separados de la industria nuclear.
3. Encontrar lugares geológicos y países dispuestos a aceptar los desechos radioactivos.
4. Que se establezca un transporte internacional expedito de desechos altamente radioactivos, entre los lugares de generación y los lugares disposición geológica de los desechos.
5. Mantener al menos la actual capacidad de generación núcleo-eléctrica mediante la instalación de centrales en Asia.

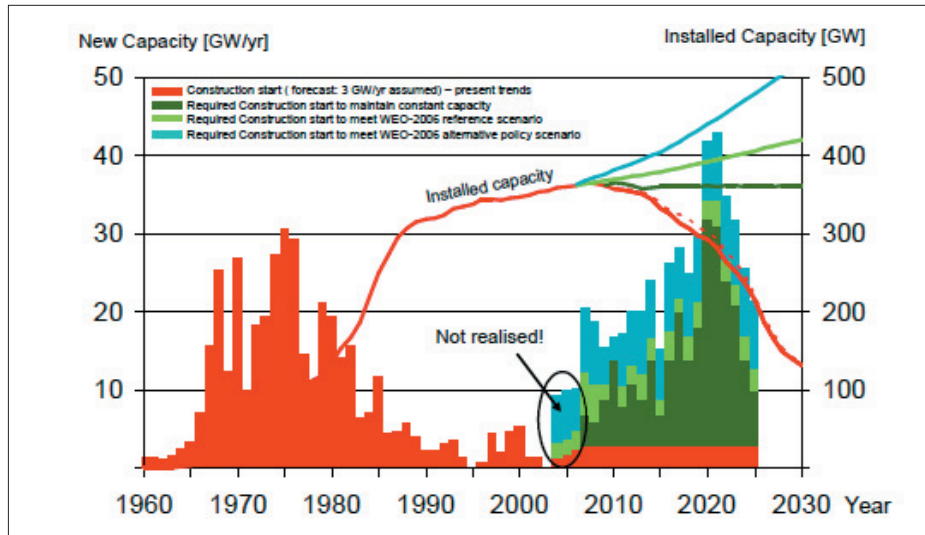
Si la industria nuclear no logra relajar las actuales normativas y traspasar a costo estatal parte de sus procesos, puede enfrentar una bancarrota.

El único fundamento que tiene la industria y el *lobby* nuclear para demandar estos cambios en las políticas públicas a nivel mundial, es el hecho de que la generación núcleo-eléctrica emite menos CO₂ que los combustibles fósiles. Sin embargo dicho fundamento es parcial, pues tal como presentamos en el capítulo 3, si se considera todo el ciclo del combustible nuclear, desde la mineración del uranio hasta la disposición final de desechos, las emisiones de CO₂ de la cadena nuclear puede ser similar a las emisiones de una planta a gas natural, especialmente si el uranio base de su combustible es de baja ley.

La Agencia Internacional de Energía Atómica⁵⁰, ha realizado estudios de proyección del potencial nuclear al año 2030, en base a la capacidad actualmente instalada. De este análisis presenta 4 escenarios: el requerimiento de aumentar la construcción de nuevas centrales nucleares con una generación nueva equivalente a 30 o 40 gigavatios/año, si se quiere alcanzar el **escenario de referencia** (línea verde claro en el gráfico N° 13) o el **escenario alternativo o intensivo en nuclear** (línea celeste) proyectado por la Agencia Internacional de Energía a solicitud de la OECD. El requerimiento de una nueva generación nuclear de 30 gigavatios/año si se pretende mantener el **escenario de capacidad nuclear actualmente instalada** (línea verde oscuro). Finalmente establece que de mantenerse el **escenario actual**, de acuerdo a la tendencia observada, y asumiendo que se aumenta en 3 gigavatios la capacidad anual, la generación nuclear iniciaría una curva de drástica reducción (línea roja).

⁵⁰ Fuente: IAEA, en Energy Watch Group, "Uranium Resources and Nuclear Energy", EWG-Series No 1/2006, Diciembre 2006

Gráfico N° 13
Proyecciones de la capacidad eléctrica nuclear



Fuente: IAEA, en Energy Watch Group, "Uranium Resources and Nuclear Energy", EWG-Series No 1/2006, Diciembre 2006.

En este contexto de evidente decrecimiento en la apuesta internacional por la energía nuclear, y donde parece urgente para la industria nuclear jugarse por sobrevivir, Chile aparece como un país clave, pues su política históricamente ha sido activa en contra de la proliferación nuclear; y durante los últimos años se ha opuesto claramente a los transportes de desechos radioactivos, tanto por la Zona Económica Exclusiva como por el mar presencial.

Existe una estrategia de la industria nuclear, particularmente en el caso de Francia y Rusia, que consiste en la relegitimación de la opción nuclear en Chile. Aunque como industria no tenga perspectivas reales de desarrollo en el ámbito nacional, por sus costos, por las dimensiones de la red eléctrica, por el peso de la empresa privada en la generación eléctrica o por los conocidos impactos ambientales.

Por ello, a pesar de que actualmente es inviable el desarrollo de la opción nuclear en nuestro país, la industria nuclear se empeña en mostrar como políticos chilenos de la coalición de gobierno, y en especial parlamentarios de las comisiones de energía y dirigentes de partidos políticos, concurren a visitar sus programas nucleares y demandan al gobierno utilizar fondos públicos para evaluar la viabilidad de dicha forma de generación.

Chile cuenta con una conciencia ciudadana mayoritariamente crítica a la energía nuclear; por lo tanto será difícil para las autoridades políticas ser funcionales a la estrategia de la industria y el lobby nuclear, que claramente alejarían al país de un desarrollo energético limpio, seguro y sustentable. Como es evidente que cualquier decisión nacional de esta envergadura deberá seguir los cauces de las decisiones políticas, es fundamental que la ciudadanía y sus representantes sepan por qué la energía nuclear está hoy en decadencia y ya no es una alternativa para el desarrollo energético en el futuro.

Referencias Bibliográficas

- BarnabFrank y & James Kemp «Too hot to handle? The future of civil nuclear power» Oxford Research Group, Julio 2007
- Comisión Europea, 26/10/2006, <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/06/1456>
- Cour des comptes du France, « Synthèse du rapport Public particulier. Le démantèlement des installations nucléaires et la gestion des déchets radioactifs », Enero 2005.
- David Fleming, "The Lean Guide to Nuclear Energy, A Life-Cycle in Trouble", The Lean Economy Connection, Febrero 2007.
- Energy Watch Group, "Uranium Resources and Nuclear Energy", EWG-Series No 1/2006, Diciembre 2006.
- Goldberg, M. (2000), Federal energy subsidies: Not all technologies are created, Equal, REPP, Julio 2000.
- Greenpeace, "The Chernobyl Catastrophe Consequences on Human Health", 2006.
- Greenpeace/Cono Sur Sustentable Associated Press-2006, declaraciones del director del proyecto Yuca Mountain Project, en "Los mitos de la energía nuclear: a 20 años de Chernobyl" 2006
- Goldemberg, José. "The Case for Renewable Energies" International Conference for Renewable Energies, Bonn 2004.
- IAEA, "Country Nuclear fuel Profiles", Technical Report Series n° 425, Vienna 2005.
- IAEA, Energy Technology Essentials – Nuclear Power
- The Chernobyl Forum 2003-2005, "Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine", IAEA, WHO, UNDP ..
- IAEA, Power Reactor Information System, en <http://www.iaea.org/programmes/a2/>
- IAEA, "Operating Experience with Nuclear Power Stations in Member States in 2005", octubre, 2006.
- IEA, «World Energy Outlook 2006»
- IEA /OECD, Energy Technology Essentials – Nuclear Power , march 2007. En <http://www.iea.org/Textbase/techno/essentials4.pdf>
- Instituto Nacional de Estadísticas, Participación económica de sectores en empleo e inversión extranjera total entre 1990-2002, (Comité de Inversiones Extranjeras) Chile
- Jürgen Kreusch y al.—Nuclear Fuel Cycle, Nuclear Issues Paper No. 3, febrero 2006, Heinrich Böll Foundation.
- LEY-18302 de Seguridad Nuclear modificada por la Ley 19825 del 1.10.2002.
- Milet, Paz Verónica. Chile-Perú: las dos caras de un espejo. Rev. cienc. polít. (Santiago), 2004, vol.24, no.2, p.228-235.
- Monstrous subsidies, Marzo del 2004, en <http://www.citizen.org/documents/nuke2010analysis.pdf>
- Mudd & Diesendorf, "Sustainability Aspects of Uranium Mining: Towards Accurate Accounting?", 2nd International Conference on Sustainability Engineering & Science, Auckland, New Zealand - 20-23 February 2007.
- NEA, IAEA, "Forty Years of Uranium Resources, Production and Demand in Perspective" The Red Book Retrospective, OECD Publishing, 2006.

- New Economics Foundation “Mirage and Oasis, Energy choices in an age of global warming” junio 2005
- Office of Civilian Radiactive Waste Management, US Department of Energy, Yucca Mountain Project en www.ocrwm.doe.gov/factsheets/doeymp0026sv.shtml
- OMS, Uranio empobrecido: origen, exposición y efectos en la salud, Resumen de orientación. Oxford Research Group “Secure Energy? Are the risks of new nuclear power too great?”, Summer 2007.
- Oxford Research Group “Secure Energy? Are the risks of nuclear power too great?” Briefing Dialogue, Summer 2007.
- PIU Energy Review 2002; DTI/Ofgem 2004 -Distributed Coordinating Group, PO2a Working Paper Three: The Economic Value of Micro generation, Technical Steering Group.
- Public Citizen, Nuclear Power 2010 Unveiled, Bush plan for new nuclear reactors maps out monstrous subsidies, Marzo del 2004. en <http://www.citizen.org/documents/nuke2010analysis.pdf>
- Storm van Leeuwen, Jan Willem and Philip Smith, “Nuclear energy. The energy balance”, Julio 2005.
- Storm van Leeuwen, J.W., “Energy from Uranium”, Oxford Research Group, 2006.
- Storm van Leeuwen, “Greenhouse Gases from Nuclear”, 2006.
- Storm van Leeuwen, J.W., en Oxford Research Group «Secure Energy». www.oxfordresearchgroup.org.uk/pa/cm200506/cmselect/cmenvaud/584/58402.htm.
- Storm van Leeuwen, J. W. «Energy Security and Uranium Reserves» Secure energy: options for a safer world- Factsheet 4- Oxford Research Group .Julio 2006
- The Economic Future of Nuclear Power, University of Chicago, Agosto 2004, en http://www.anl.gov/Special_Reports/NuclEconSumAug04.pdf.
- The New Economics Foundation, “Mirage and oasis, Energy choices in an age of global warming”, Junio del 2005
- Uwe R. Fritsche, Comparison of Greenhouse-Gas Emissions and Abatement Cost of Nuclear and Alternative Energy Options from a Life-Cycle Perspective”, Öko-Institut e.V., Enero 2006.