



# 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 N° 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

<b>PRESENTACIÓN</b>	5
<b>I. EL CICLO DE VIDA DE LA ENERGÍA NUCLEAR</b>	9
<b>1. PROCESOS PREVIOS A LA GENERACIÓN:     DEPENDENCIA DE UN RECURSO NO RENOVABLE</b>	
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
<b>2. SUPUESTOS TEÓRICOS Y COSTOS HISTÓRICOS REALES DE LA GENERACIÓN NUCLEAR</b>	
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
<b>3. LOS COSTOS NO CONSIDERADOS: PROCESOS POSTERIORES A LA GENERACIÓN</b>	
3.1. Procesamiento de desechos	29
3.2. Costos del reprocesamiento de desechos radiactivos	30
3.3. Transporte de materiales radioactivos	32
<b>4. BALANCE AMBIENTAL, ENERGÉTICO Y SOCIAL DE LA OPCIÓN NUCLEAR</b>	
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
<b>II. INSUSTENTABILIDAD ECONÓMICA, AMBIENTAL Y POLÍTICA DE LA OPCIÓN NUCLEAR</b>	
<b>1. SUBSIDIOS DIRECTOS E INDIRECTOS DEL ESTADO</b>	41
1.1. Seguros	42
1.2. Seguridad de las instalaciones y del transporte	42
1.3. Inversión científica y tecnológica	42
<b>2. LA GENERACIÓN DE EMPLEOS: COMPARACIÓN CON OTRAS TECNOLOGÍAS</b>	43
<b>3. IMPACTOS Y VULNERABILIDADES AMBIENTALES</b>	44
<b>4. LOS ASPECTOS GEOPOLÍTICOS DEL CICLO DE COMBUSTIBLES</b>	48
<b>5. CONCLUSIONES</b>	51
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	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.

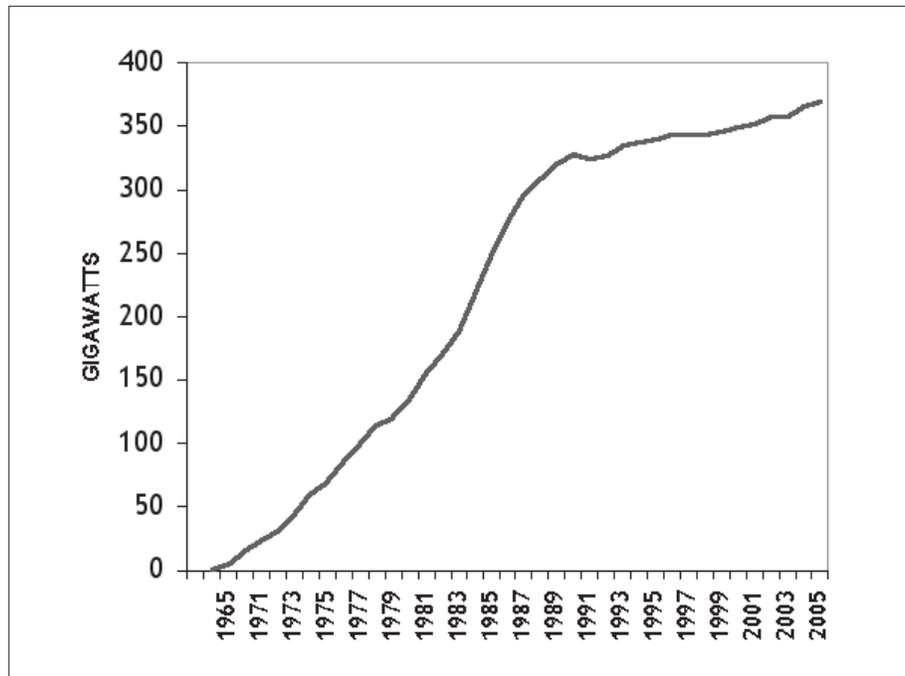
La acción ciudadana también incluyó el seguimiento al programa nuclear militar chileno, desarrollado en el centro nuclear de Lo Aguirre y a los decretos y estudios para el desarrollo del ciclo de combustible y plantas de generación nuclear encargados durante el gobierno militar del general Pinochet.

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.

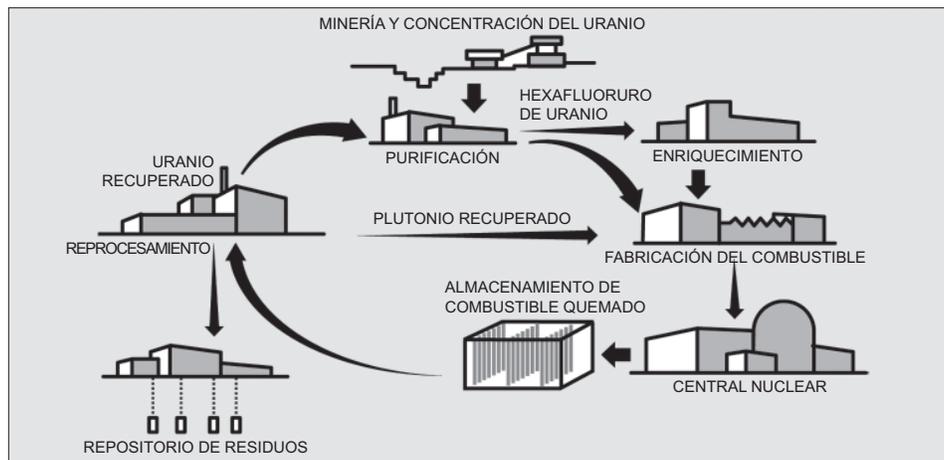
## EL CICLO DE VIDA DE LA ENERGÍA NUCLEAR

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.

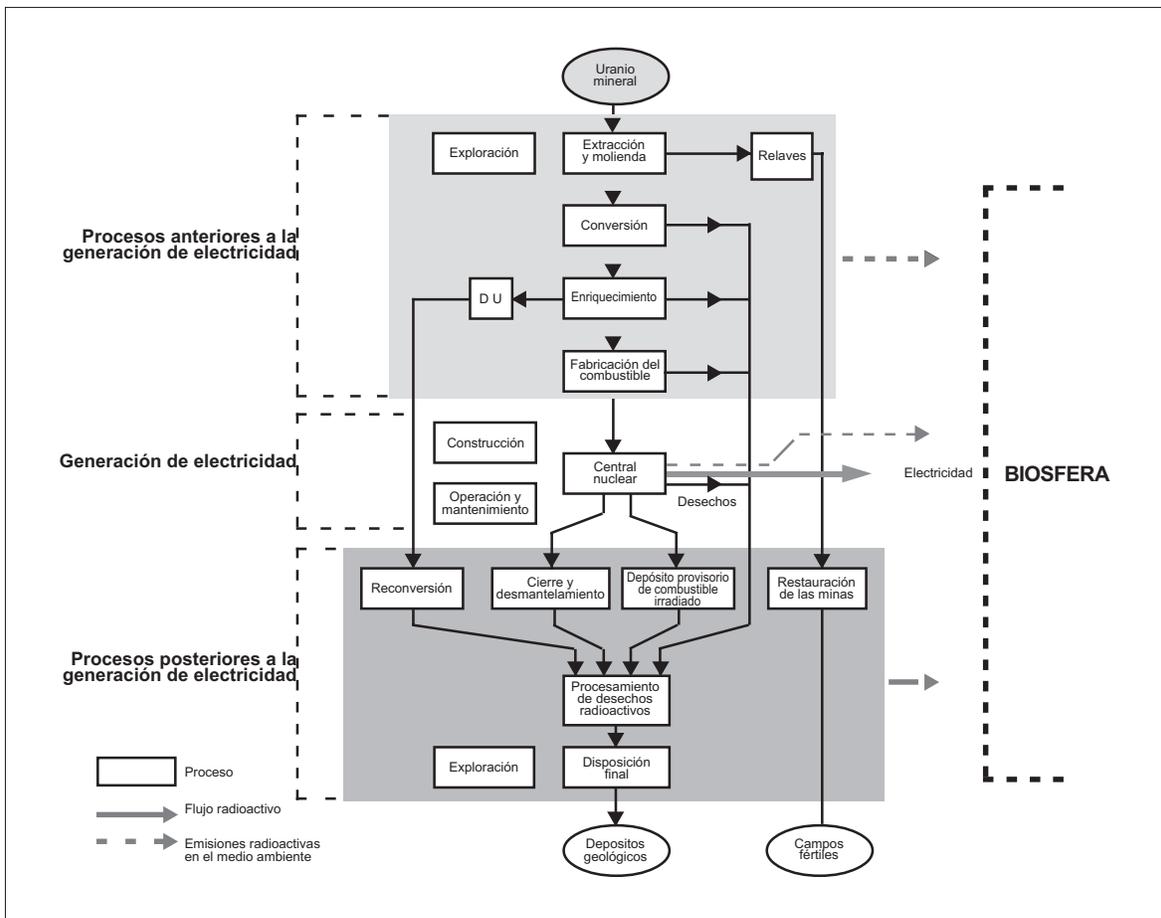
**Figura N° 1:**  
**Ciclo de vida simplificado**



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](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

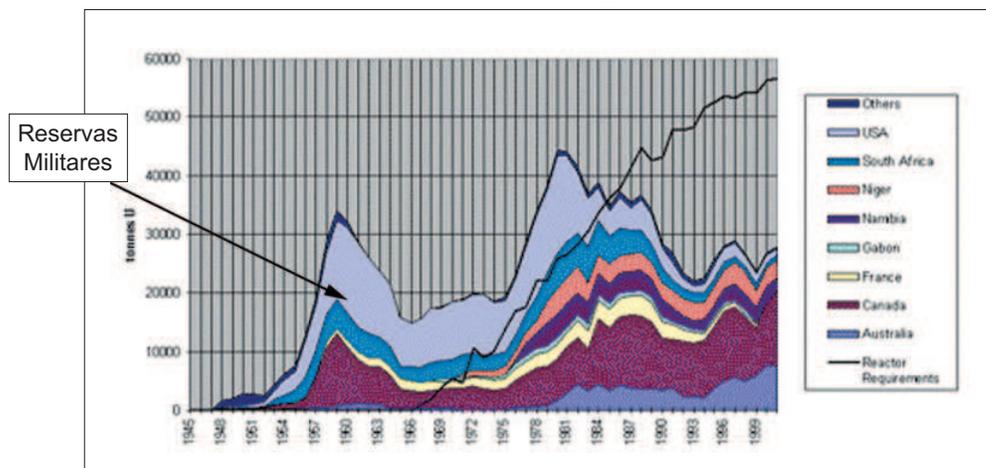
### 1.1. Disponibilidad y costos del uranio.

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 años<sup>1</sup>.

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 N° 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 militares<sup>2</sup>, los que actualmente se estarían agotando.

**Gráfico N° 1:**  
**Producción de Occidente versus requerimientos de reactores**



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

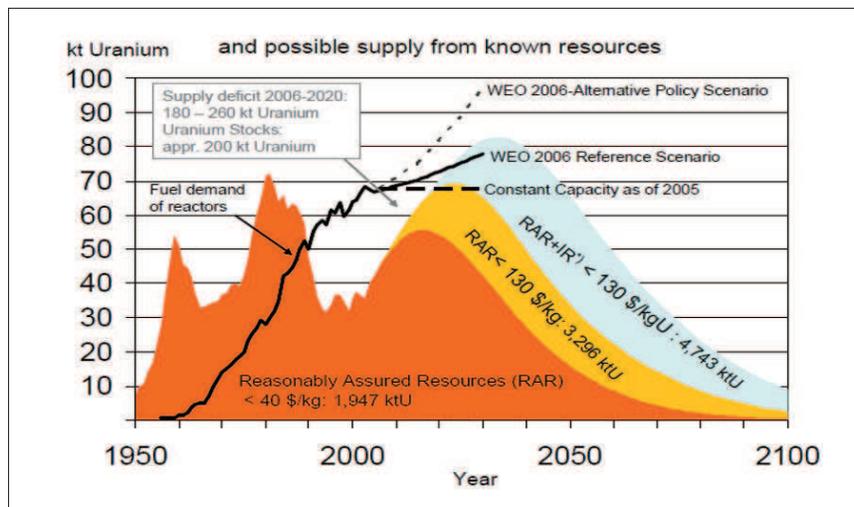
<sup>1</sup> IEA Energy Technology Essentials (marzo 2007)-Nuclear Power <http://www.iea.org/Textbase/techno/essentials4.pdf>

<sup>2</sup> 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 Group<sup>3</sup> 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».

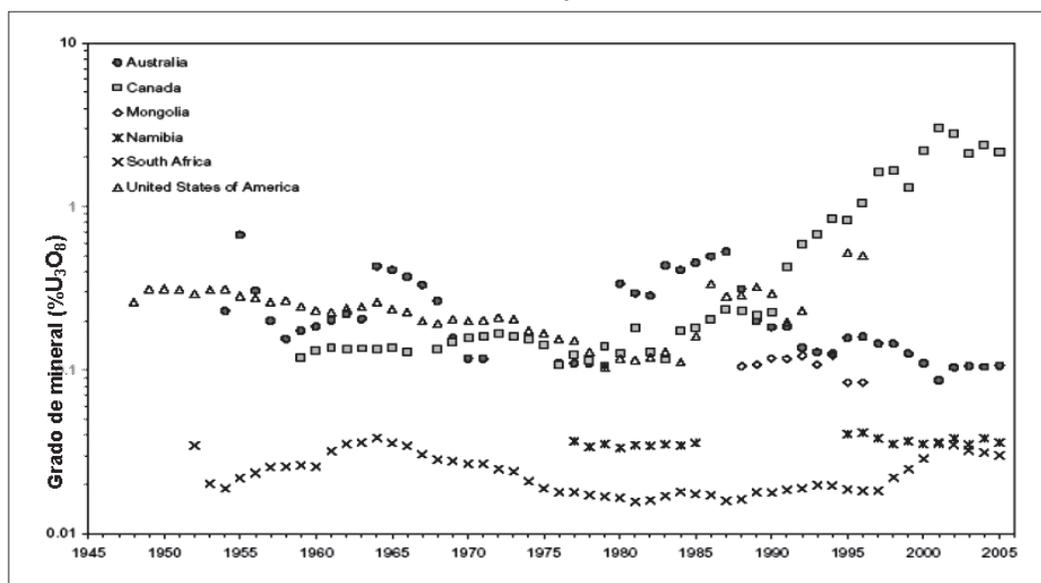
<sup>3</sup> Energy Watch Group, Uranium Resources and Nuclear Energy, 2006

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 yacimiento<sup>4</sup>.

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.

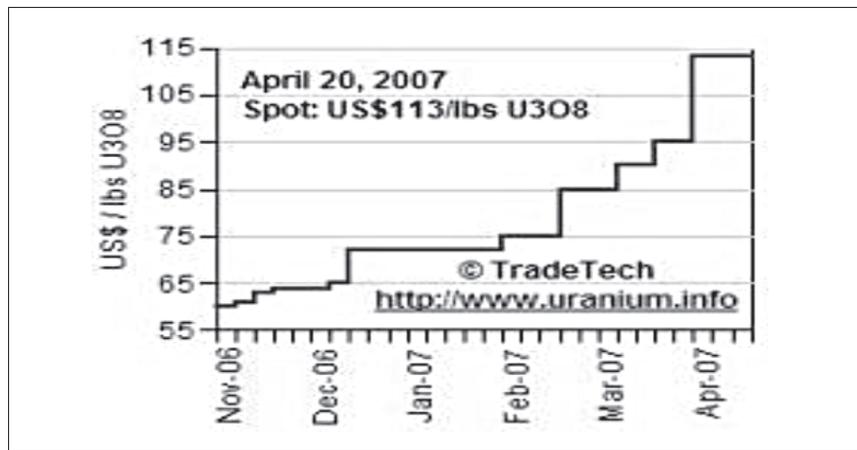
A nivel mundial, durante los recientes 20 años, la extracción de uranio ha disminuido y los reactores nucleares se han abastecido principalmente de las reservas gubernamentales, que están decreciendo aceleradamente. Este hecho explica el incremento del precio de uranio en los años recientes.

<sup>4</sup> 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.<sup>5</sup> 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](http://www.uranium.info)

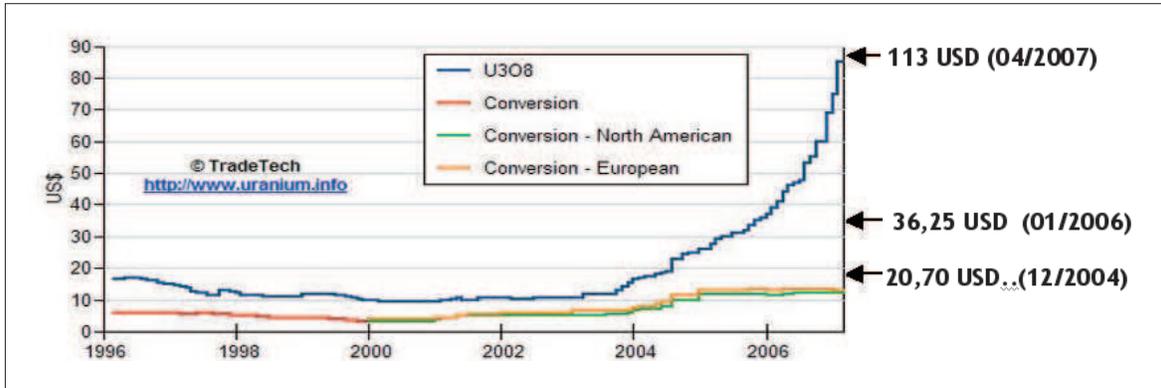
Esta situación, de acuerdo a estimaciones de la publicación *Gold World*, no debería variar en los próximos 20 ó 30 años, por el desbalance entre producción y demanda estimada (ver gráficos 1 y 2). Adicionalmente, el agotamiento de algunas minas de alta ley (principalmente situadas en Canadá) podría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

<sup>5</sup> <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](http://www.uranium.info)

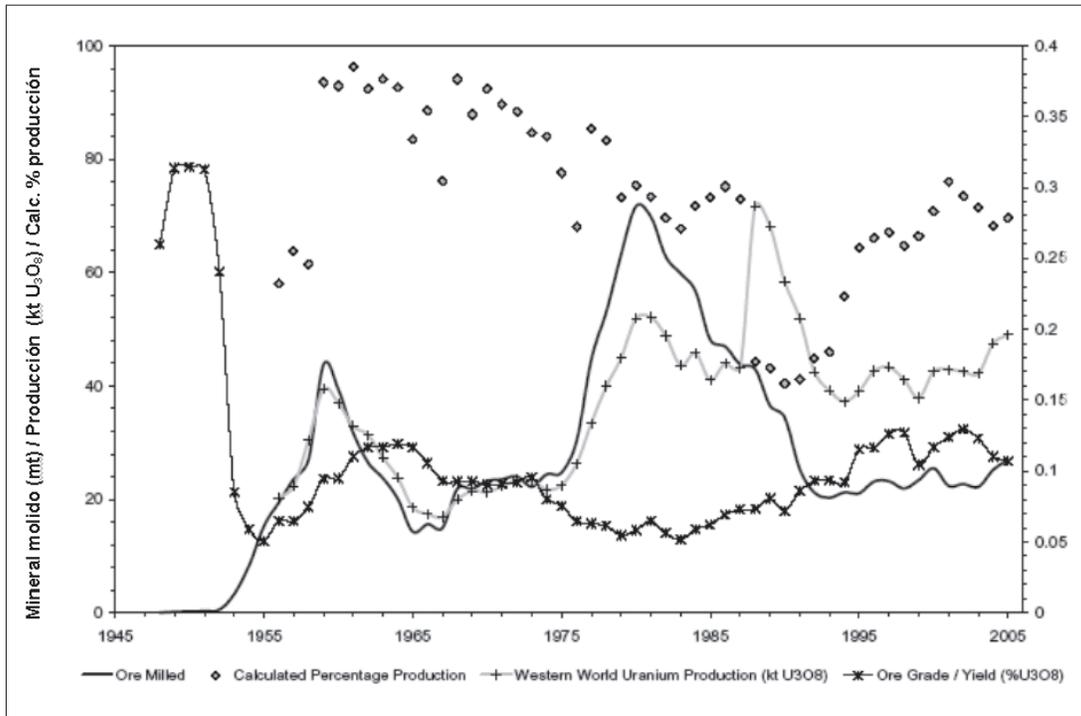
## 1.2 Extracción del uranio

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-eléctrica<sup>6</sup>. 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.

<sup>6</sup> 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.<sup>7</sup>

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 (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) producida; un consumo energético de entre 172 y 1.389 gigajoules por tonelada de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>; y emisiones de dióxido de carbono entre 8,4 y 253 toneladas, por tonelada de óxido de uranio producida.<sup>8</sup>

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 <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Annual Prod. t U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Consumption		Emissions Carbon Dioxide
			Water *kL/t U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Energy **Gj/t U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	
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) <sup>1</sup>	8,4#1,2 (4)
Beverley	~0,18	~1.000	7.731#802 (5)	172#29 (3) <sup>2</sup>	8,9#1,5 (3)
Niger <sup>3</sup>	~0,2-0,5	~3.100	No data	~204	No data
Cameco <sup>4</sup>	~0,9-4,0	~8.500	No data	~178	No data

\* Kilo litro por tonelada de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> (1 kilo litro= 1.000 litros)

\*\* Giga joule por tonelada de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> (1 Giga joule= 1.000.000.000 de Joules).

<sup>1</sup> Data given by (WNA, 2006) is 313 Gj/t U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>.

<sup>2</sup> Different data for 2004-05 is given by (WNA, 2006) for Beverley as 187 and 221 Gj/t U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, respectively, compared to data reported by (HR, var.) and use in graphs and table above.

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

<sup>4</sup> 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.

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

<sup>8</sup> 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 municiones<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup> 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](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
<b>TOTAL</b>		<b>1.188.273</b>	<b>2002</b>

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 (UF<sub>6</sub>), 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 UF<sub>6</sub>, ha iniciado la transformación de su inventario de UF<sub>6</sub> 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)**

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

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