

Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo-Eléctrica

Resumen Ejecutivo



Corporación Nuclear Eléctrica Chile S. A.

Santiago de Chile, Junio de 2009

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

“Cada país debe hacer sus propias opciones energéticas: no hay una medida que valga para todos. Pero para los países interesados en incorporar la energía nucleoelectrica en sus estrategias de desarrollo sostenible es importante mantener abierta y accesible esa opción energética”.

Mohamed ElBaradei¹

¹ Director General del OIEA y Premio Nobel de la Paz 2005 por sus esfuerzos en prevenir que la energía nuclear sea utilizada con propósitos militares y por asegurar su uso pacífico de manera segura.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

1. Introducción	4
2. Orígenes y consideraciones generales del Estudio.....	8
3. Análisis comparativo de impactos.....	10
3.1. Impacto ambiental	10
3.1.1. Comparación de impactos entre las diferentes fuentes de energía consideradas en el estudio	13
3.1.2. Emisiones y contaminación térmica.....	21
3.1.3. Impacto al patrimonio cultural	25
3.1.4. Desechos	26
3.1.4.1. Desechos radioactivos	28
3.1.4.2. Desechos radioactivos producidos por las centrales nucleares.	29
3.1.4.3. Seguridad en la gestión de los desechos radioactivos.....	32
3.1.4.4. Aspectos ambientales y de seguridad del ciclo de combustible nuclear.....	35
3.1.5. Impacto Social.....	41
3.1.6. Impacto económico.....	46
3.1.6.1. Ventajas económicas de la generación nucleoelectrónica	46
3.1.6.2. Inversiones de capital.....	48
3.1.6.3. Costos de la gestión de desechos	50
3.1.6.4. Costos de desmantelamiento	51
3.1.6.4. Otros aspectos económicos	53
3.1.6.4.1. Recursos humanos e influencia en el resto del país	53
3.1.6.4.2. Usos no eléctricos de los reactores nucleares.....	53
4. Riesgos asociados a las diferentes fuentes de energía.....	55
4.1. Consideraciones generales.....	55
4.2. Análisis de los riesgos asociados a las diferentes fuentes de energía.....	58
4.2. Riesgos	58
4.2.1. Riesgos relacionados con las fuentes de energías renovables	58
4.2.2. Riesgos relacionados con las fuentes de energía fósiles	59
4.2.3. Riesgos relacionados con la energía nuclear	60
4.2.3.1. Riesgo de un accidente nuclear severo	62
4.2.3.2. Desechos radioactivos	69
4.2.3.3. No proliferación y seguridad física	69
4.2.3.4. Riesgos de la actividad sísmica.....	70
4.2.3.6. Otros riesgos	75
4.2.3.6.1. Riesgo económico como consecuencia del retardo de la construcción	75
4.2.3.6.2. Riesgos comerciales	77
4.2.3.6.3. Riesgo de la política vigente y de regulación.....	78
4.2.3.6.4. Riesgo por el agotamiento de las reservas de los diferentes tipos de combustibles	78
4.2.3.6.5. Marco Regulatorio.....	80
4.2.3.6.6. La no existencia de los recursos humanos calificados.....	80
4.2.3.6.7. Riesgo geopolítico asociado a la ubicación de los recursos energéticos	81
4.2.3.6.8. Riesgo de suspensión del suministro de combustible nuclear a la central nuclear	82
Conclusiones Generales	83

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

1. Introducción

Nuestra civilización ha alcanzado un grado de complejidad y sofisticación sin precedentes en la historia. El factor clave para lograrlo ha sido el disponer de fuentes de energía suficientes, las que en su momento parecían ilimitadas. Hoy se sabe con ejemplos claros que la realidad dista mucho de eso, no obstante se depende casi por completo de un modelo creado bajo un enfoque mecanicista que descuida las leyes naturales y el equilibrio del medioambiente.

Se está en una encrucijada en el que la energía es esencial para el desarrollo económico y social de los pueblos y un factor clave en la calidad de vida de las personas; al mismo tiempo los recursos que se solían usar para producirla se están agotando y los procesos industriales intensivos en el uso de combustibles de origen fósil son observados por la Comunidad Internacional como un riesgo para la atmósfera por las alteraciones climáticas proyectadas.

El desafío está en lograr sustentabilidad, que este caso viene dada por el hecho de garantizar las necesidades crecientes de energía si generar los efectos colaterales negativos que amenazan el entorno vital de las generaciones futuras y por lo tanto su bienestar. Hasta ahora, la industria y la sociedad se enfocaron durante décadas principalmente a producir y consumir energía abundante a costos razonables sin considerar las consecuencias que esto tendría a largo plazo. El calentamiento global, provocado por la emisión antropogénica de los gases efecto invernadero, y el agotamiento de las fuentes de energía fósiles muestran cuan erróneo resultó este enfoque parcial.

El primer acuerdo internacional, dirigido a la lucha contra el cambio climático mundial y sus consecuencias es la Convención de la ONU sobre Cambio Climático, fue firmado en 1992. Este documento contiene los principios generales y las direcciones fundamentales de la actividad de las partes que lo han firmado (en la actualidad, 191 países de la Comunidad de Naciones Unidas). Cinco años después, en 1997, fue aprobado el Protocolo de Kyoto de esta Convención. En la actualidad el Protocolo de Kyoto está ratificado por 182 países y por la Comunidad Europea.

La Conferencia de Kyoto sobre el cambio climático fue un acontecimiento excepcional porque, por primera vez, los países industrializados aprobaron objetivos de reducción de emisiones que son jurídicamente vinculantes. Su esencia consiste en la reducción total de las contaminaciones de gases invernaderos por un mínimo de 5% durante el período 2008-2012, en comparación con el nivel básico del año 1990.

En este contexto, la energía nuclear aparece como una solución realista, sencilla, eficaz y tanto más atractiva cuanto que no compromete el modo de desarrollo de nuestras sociedades. Ya en 1989, los siete países más ricos del mundo, entre los que figuran los que más utilizan la energía nuclear, confirmaron su interés por esta solución: ***“La energía nuclear cumple un papel decisivo en la reducción de las emisiones de gases con efecto de invernadero”***, reconocieron en una de sus cumbres y así también reconoce dicho rol el Panel

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), ganador del Premio Nobel por su contribución en la materia.

Más de 50 años de experiencia internacional en la operación de las centrales nucleares (mas de 10.000 años reactor, ver Figura 1.1) permiten señalar que ésta garantiza el abastecimiento energético, es una opción competitiva, es operativamente segura, se ha demostrado inocua para la salud y ventajosa en términos medioambientales al no generar emisiones de CO₂ u otros gases de efecto invernadero. El progreso técnico reporta ya soluciones satisfactorias para los desechos, si bien es necesario seguir reforzando la investigación en este terreno.

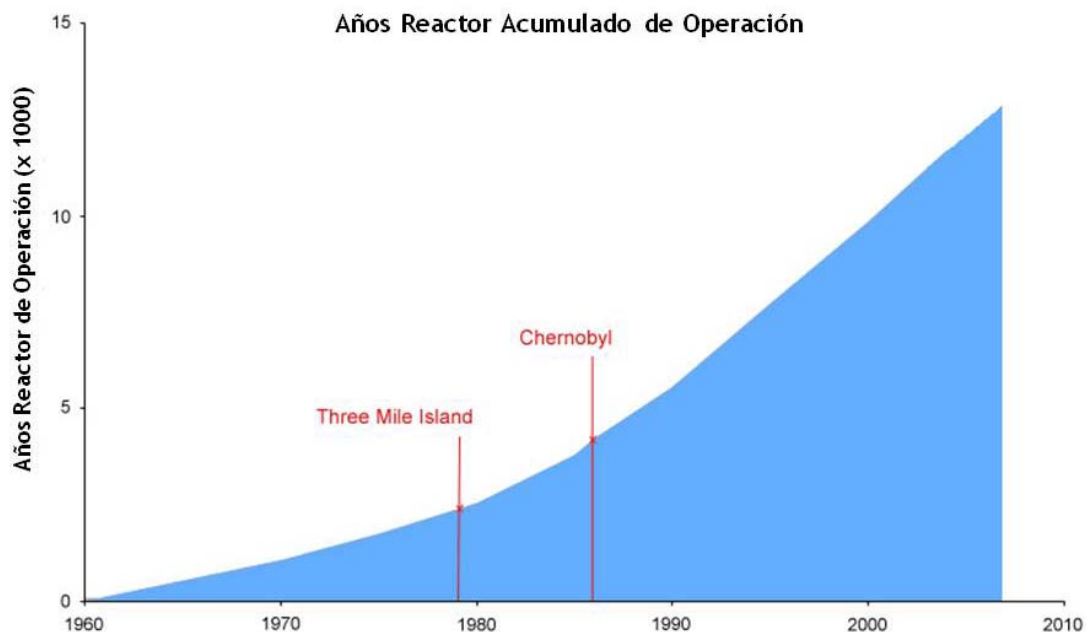


Figura 1.1 - Años Reactor Acumulados de Operación.

El panorama mundial, hacia el 31 diciembre del 2007, indica que se encontraban en operación 439 reactores nucleares distribuidos en 30 países de cinco continentes. La potencia total instalada es de 372.208 MW y una generación de 2608,14 TWh, que representa el 17 % del total de energía eléctrica generada en ese año. Aproximadamente el 57% del total de bloques en operación se encuentran distribuidos entre Estados Unidos (104), Francia (59), Japón (55) y Rusia (31); destacándose el hecho de que en Francia el 77% de su generación eléctrica es de origen nuclear. Otros 24 reactores se encuentran en construcción, con una potencia total instalada de 27.193 MW. Estos nuevos proyectos se encuentran ubicados fundamentalmente en países asiáticos. Las figuras 1.1 y 1.2 grafican estos antecedentes.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

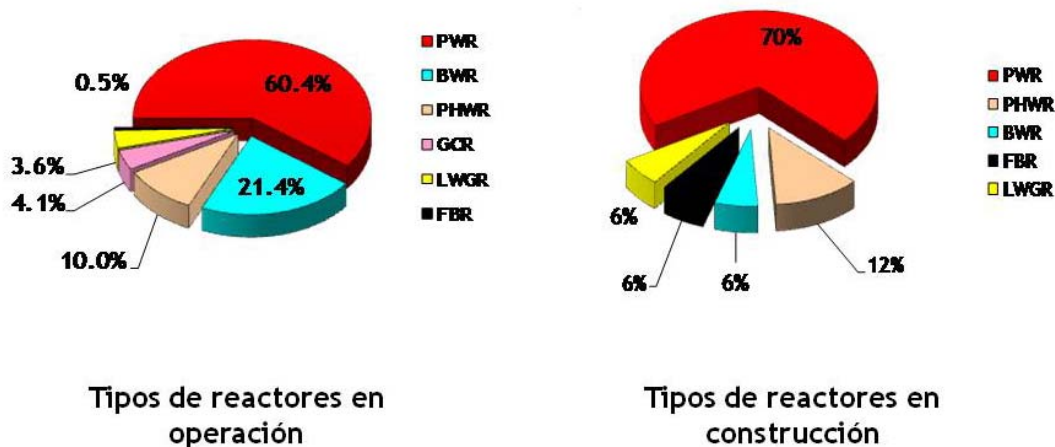


Figura 1.2 - Total de reactores en operación y construcción por tipo, al 31 diciembre 2007.

Chile, al igual que otros países del mundo, deberá enfrentar estos desafíos para satisfacer la demanda energética de todas las ramas de actividad (industria, agro, pesca, servicios, hogares, transporte, etc.) garantizando además su desarrollo sustentable. Pero a estos imperativos se suma otro no menos desafiante, que es contar con estándares de seguridad energética a la altura de los requerimientos. La dependencia de fuentes externas -el país importa casi tres cuartas partes de la energía que consume- lo pone en una situación altamente vulnerable, en un contexto internacional caracterizado por la volatilidad en los precios de los insumos e interrupciones en el suministro. Por ello, el país impulsa diferentes acciones de corto y mediano plazo en el marco de una ambiciosa pero realista política de seguridad energética, con miras a diversificar su matriz, lograr mayores grados de autonomía y promover un uso eficiente de la energía.

De acuerdo con estimaciones realizadas por la Comisión Nacional de Energía, la demanda eléctrica se duplicará hacia el 2023 y triplicará hacia el 2032 en un escenario conservador, con un crecimiento anual de una 4,6%. De mantenerse la tasa de crecimiento histórico (5,6%), estos plazos se reducen al 2021 y 2028, respectivamente.

En este escenario Chile deberá esforzarse para promover el crecimiento que toda la población espera, no obstante, el desafío no es menor. Con las actuales tasas de crecimiento e incluso potenciando al máximo la eficiencia energética, **Chile en 10 a 12 años requerirá construir tantos proyectos eléctricos como todos aquellos que ha hecho en su historia**, ya que energía y desarrollo van de la mano.

En este contexto surge la posibilidad de incluir la energía nuclear dentro del menú de opciones para satisfacer la demanda eléctrica como una decisión estratégica de promover la diversificación de fuentes (lección duramente aprendida durante los últimos años), incrementar la seguridad de la matriz, reducir la volatilidad de precios que enfrenta el

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

sector eléctrico, reducir el crecimiento exponencial de emisiones de CO₂ producto de los actuales planes de obras con fuerte desarrollo en base a tecnologías fósiles y como una opción real de ofrecer los amplios módulo para asegurar el abastecimiento de energía necesario para impulsar el desarrollo.

La introducción de la energía nucleoelectrica no se limita sólo a adquirir una central, sino que implica la puesta en marcha de todo un programa nuclear civil y buena parte de él debe estar funcionando antes de la adquisición de la central. Por ello, si Chile quiere cubrir parte de la demanda señalada con energía nuclear, el país debe prever que es necesario desde ya comenzar a ejecutar un programa de manera tal que llegado el momento de requerirla no exista alguna dificultad para su desarrollo.

2. Orígenes y consideraciones generales del Estudio.

La primera evaluación sobre la posibilidad de introducir en Chile la Opción Nuclear para generar electricidad fue encomendada por el Gobierno al Grupo de Trabajo en Núcleo- Electricidad presidida por el Dr. Jorge Zanelli Iglesias. A solicitud de la Presidenta de la República Dra. Michelle Bachelet Jeria, este grupo presento en Septiembre del 2007 sus conclusiones y recomendaciones sobre el tema. Entre sus conclusiones estableció:

- Chile debe mantener abiertas todas las opciones energéticas. La energía nuclear no es una opción a descartar, y podría cooperar a la seguridad del suministro eléctrico;
- La energía nuclear es una opción confiable, por los niveles de seguridad que ha alcanzado su industria, pero exige preocupación, disciplina y rigor permanentes; y
- La experiencia internacional muestra a la energía nuclear como una opción competitiva, especialmente ante los actuales precios de los combustibles fósiles en los mercados internacionales.

Este grupo además recomendó la realización de diferentes estudios encaminados a definir la viabilidad institucional, técnica y económica de la generación núcleo-eléctrica, así como dimensionar los requerimientos y el impacto global de la incorporación de este tipo de generación eléctrica.

Dentro de los estudios recomendados se encuentra: “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo-Eléctrica”. El estudio presentado a la Comisión Nacional de Energía en su contenido, desarrolla diversos temas que se consideran la base necesaria para comprender el análisis y formarse una opinión objetiva, fundamentada en argumentos técnicos y científicos largamente probados por la industria nuclear, de ahí lo extenso del mismo.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Nucleo Eléctrica”

Para efectos de este resumen ejecutivo se recogen los aspectos esenciales que proporciona información relevante y resumida sobre los impactos y riesgos que están presentes en el desarrollo de un programa nacional para la introducción de la energía nuclear para generación de electricidad. Asimismo, se realiza una comparación con las fuentes tradicionales de energía utilizados para la generación eléctrica, incluyendo las energías renovables.

Para los efectos de estudio se ha considerado que:

- **Impacto:** técnicamente, es la alteración de la línea de base (medioambiente), como consecuencia de la acción antrópica o de eventos naturales.
- **Riesgo:** es la contingencia de un daño. A su vez contingencia significa que el daño en cualquier momento puede materializarse o no hacerlo nunca.

La comparación se hará sobre la base de unidades o bloques energéticos que sumen una potencia instalada de 1.000 MW eléctricos y las fuentes energéticas con las que se compara la generación nuclear son las fósiles (carbón, petróleo, gas), la hidráulica (solo embalse) y las energías renovables no convencionales (solar y eólica). Ya que existen diferentes tipos de reactores nucleares vinculados con la generación eléctrica en este caso, la referencia se hará en base a un reactor agua ligera (PWR/VVER) ya que son los más difundidos internacionalmente (70% como se señaló anteriormente).

3. Análisis comparativo de impactos

3.1. Impacto ambiental

Chile cuenta con una normativa que regula los aspectos relacionados con el impacto sobre el medioambiente de las diversas actividades productivas: la Ley de Bases del Medioambiente, que incluye instrumentos de gestión destinados a garantizar tanto la calidad de vida de las personas como la biodiversidad.

Lo cierto es que estos instrumentos están en pleno proceso de perfeccionamiento, ya que algunos son normas previamente existentes que se han adecuando a las necesidades actuales, mientras que otros nuevos se van diseñando e incorporando constantemente, en directa sintonía con lo que ocurre en Chile y el mundo. Dichos instrumentos pueden servir tanto para fijar condiciones ambientales, prevenir o corregir determinadas situaciones, cumplir dictámenes, normar factores económicos, promover la educación e investigación, la participación ciudadana y generación de información.

En este contexto se inserta el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), cuyo objetivo es prevenir el deterioro ambiental por la vía de evaluar sistemáticamente los

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

proyectos de inversión que impliquen cierto impacto sobre el medioambiente. La ley y el reglamento establecen los diferentes tipos de proyectos que deben cumplimentar los requerimientos de este sistema, así como los criterios y parámetros que deben ser considerados para la presentación a la institución correspondientes (CONAMA) del Estudio o Declaración de Impacto Ambiental del proyecto y el proceso de tramitación para la obtención de la Resolución de la Calificación Ambiental del Proyecto.

Los proyectos relacionados con nuevos objetivos para la generación eléctrica, con independencia de la fuente de energía que utilicen, deberán ser sometidos a este sistema de evaluación para obtener la aceptación del inicio de sus actividades. En el caso particular de un proyecto vinculado con la generación nucleoelectrica deberá además obtener las diferentes licencias para cada una de las etapas del desarrollo del proyecto (emplazamiento, construcción, operación y desmantelamiento), de acuerdo a la experiencia internacional y a la Ley de la República de Chile No. 18.302 “Sobre Seguridad Nuclear” del 2 de Mayo de 1984 y a los requerimientos que se establezcan por la Autoridad Reguladora Nuclear en el Reglamento correspondiente al proceso de licenciamiento de las instalaciones nucleares.

A la hora de evaluar y de comparar las distintas fuentes energéticas que pueden ser utilizadas para la producción de electricidad, cada vez cobran mayor importancia las consideraciones referidas a su impacto ambiental. Estas consideraciones son tan importantes que están afectando decisivamente la configuración del futuro energético de muchos países.

Los daños ambientales derivados de la producción, transporte y consumo de las distintas fuentes de energía pueden ser asociados con:

- **El agotamiento progresivo de los recursos naturales no renovables.** La mayoría de las fuentes actuales de energía son recursos que corresponde a esta categoría y enfrentan un serio riesgo de agotamiento, con el consiguiente impacto en las generaciones futuras.
- **Las emisiones a la atmósfera.** Todo el proceso que implica la producción, transporte y consumo de energía es fuente de emisiones atmosféricas: a los ya mencionados dióxido de carbono, óxidos de azufre y de nitrógeno, hay que sumar el gas metano, el monóxido de carbono, una amplia gama de partículas de metales pesados, las partículas en suspensión y los clorofluorocarbonos, que dañan la capa de ozono.
- **La contaminación del agua y de los suelos.** Se producen asimismo vertidos que contaminan el agua y los suelos (eutrofización, por ejemplo) con graves consecuencias para la salud humana y los ecosistemas.
- **La utilización del suelo.** Los distintos procesos industriales, el transporte y el consumo de energía en todas sus formas, suponen una importante ocupación de suelos y desplazan a otros usos que se le puede dar a la corteza terrestre. Esto también

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

implica la modificación sustancial de los ecosistemas que ocasiona por ejemplo, la construcción de un embalse para generación hidroeléctrica.

- **La generación de ruidos.** La polución acústica es particularmente importante en el caso de algunas fuentes energéticas.
- **Los impactos visuales sobre el paisaje.** En ocasiones, las instalaciones energéticas dañan el paisaje y representan un impacto visual negativo.
- **La generación de residuos.** La producción y consumo de energía produce residuos sólidos, que a menudo son de difícil y costoso tratamiento para evitar impactos ambientales significativos.

En relación al último punto, cabe señalar que los desechos radioactivos representan un tema importante en el caso de la energía nuclear, en particular por el desconocimiento acerca de los riesgos del manejo de combustible gastado, más conocido como “desechos nucleares”. Se puede afirmar que la ingeniería ha alcanzado niveles altos de desarrollo que permiten garantizar un manejo seguro de los desechos nucleares de manera tal, que impide el traspaso de sustancias radioactivas al entorno. Años de gestión de los desechos nucleares demuestran que la tecnología es eficiente y segura, no obstante, siempre entraña la eventualidad de un derrame accidental, y aunque sea esta una amenaza muy pequeña, la industria debe estar preparada para ello y debe operar permanentemente con los más altos estándares de seguridad. Este tema en particular se aborda en la sección 3.1.4 de este resumen.

Además de los elementos señalados anteriormente, en el análisis también se debe tener en cuenta otros factores que se han incorporado como consecuencia de las diferentes investigaciones realizadas en torno a los cambios del medioambiente como consecuencias de las acciones antropogénicas del hombre a lo largo del desarrollo de la humanidad y que hasta hace poco pasaban inadvertidos. Son aquellos que dicen relación con el equilibrio global del planeta y en los que incide de manera determinante toda actividad industrial, incluido el sector energético, independientemente del punto geográfico donde se desarrollen:

- **El cambio climático.** Existe consenso internacional sobre el hecho de que el clima de la Tierra está cambiando como consecuencia de la actividad humana, concretamente la emisión de gases de efecto invernadero. Las consecuencias se están dejando sentir de manera global y entre los riesgos más amenazantes se cuenta la posible subida del nivel del mar, el aumento de la aridización en las zonas tropicales y subtropicales, fenómenos meteorológicos descontrolados y violentos (temperaturas extremas, huracanes y tormentas, etc.) así como la proliferación y difusión de diversas enfermedades. Por las características geográficas de Chile, dada su angosta y larga

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

faja de terreno, está considerado como uno de los países que más sufrirá ante los posibles cambios climáticos que se avecinan.

- **La disminución de la capa de ozono estratosférico.** Conlleva posibles consecuencias para la salud humana (mayores incidencias de cánceres a la piel y enfermedades de la visión, por ejemplo).
- **La lluvia ácida.** Tiene consecuencias nefastas tanto para los ecosistemas, principalmente la capa vegetal, como para las infraestructuras humanas.
- **Los efectos negativos sobre la biodiversidad.** La disminución de la biodiversidad es un grave problema no sólo estético y cultural, sino también, y sobre todo, por la extinción definitiva de ciertas especies y la pérdida irreparable de información genética que se necesita para producir nuevos fármacos y nuevos materiales.

3.1.1. Comparación de impactos entre las diferentes fuentes de energía consideradas en el estudio

Las diferentes fuentes y tecnologías energéticas utilizadas para la generación eléctrica tienen impactos ambientales muy distintos. Por ello, en esta etapa del estudio se tratara de realizar una comparación entre la producción de energía eléctrica con energía nuclear, combustibles fósiles y energías renovables (en particular, hidráulica, solar y eólica).

Las cuestiones referentes a la protección ambiental ocupan hoy una parte significativa de las inversiones y los esfuerzos administrativos en todos los segmentos de la actividad económica. Es natural, entonces, que esa nueva dinámica tenga influencia en el sector energético, dado que la producción de energía, insumo inductor del desarrollo y factor clave para la calidad de vida de las personas, tenga como contrapartida interferencias, muchas veces profundas, en los medios físicos, biológicos, socio económicos y culturales en las localidades y regiones en que sus actividades tienen lugar. El aspecto ambiental, por tanto, es una variable que tiene un peso considerable en el proceso de decisión entre las opciones a ser adoptadas para garantizar la oferta de energía en un país o región.

El carbón, el petróleo y en menor grado el gas, son los mayores responsables de la generación de emisiones del sector eléctrico. De acuerdo con los resultados del estudio, el carbón provee actualmente en el mundo el 40% de la energía eléctrica y las fuentes fósiles en su conjunto el 66%.

En el caso de Chile, de acuerdo con la información estadística de la Comisión Nacional de Energía, el carbón provee energía en un 15,4%, totalizando las fuentes fósiles un 62,7%. Este sucinto análisis justifica el debate que existe en cuanto al compromiso que deben tomar los

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

países a través de acuerdos internacionales para restringir las emisiones de gases de efecto invernadero, con énfasis en la disminución del anhídrido carbónico (CO₂), por ejemplo la Agenda 21 adoptada en la Reunión de la Tierra en Río de Janeiro (junio 1992) y especialmente el Protocolo de Kyoto (1997).

Para lograr este propósito, es necesario que la evaluación rigurosa de las diferentes fuentes energéticas se haga analizando la cadena completa de energía, de tal manera que los elementos detrás de la etapa directa de generación de potencia sean también considerados, ya que hay una amplia variedad de eventos significativos e impactos ligados a las diferentes opciones.

A grandes rasgos, los impactos ambientales están dados por la densidad de energía usada para la generación y por el uso o no de tecnologías de mitigación. En términos generales, a menor densidad mayores impactos ambientales y a su vez, como los combustibles influyen en las actividades de extracción, serán mayores los requerimientos de transporte, y en la cantidad de emisiones al medioambiente y los desechos generados.

Desde el punto de vista del área ocupada por una central generadora de energía, esta es diferente en dependencia de la fuente de energía. Así, en la tabla 3.1 se recoge la información para el uso del terreno de una central de 1.000 MW para diferentes fuentes de energía.

FUENTE 1.000 MW	AREA(aproximada) [Ha]
Petróleo	100 - 400
Gas	100 - 400
Carbón	100 - 400
Nuclear	100 - 400
Hídrica	10.000 - 10.500
Solar	2.000 - 5.000

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

Eólica	5.000 - 15.000
--------	----------------

Tabla 3.1 - Comparación entre fuentes de energía por superficie de terreno².

En la Tabla 3.2³ se recoge el consumo de combustible y los residuos producidos en centrales térmicas (carbón, fuel oil y nuclear), donde se releja la influencia escala de recursos y de impactos asociados de los combustibles considerados.

Tabla 3.2 - Consumo y residuos de centrales nucleares, a carbón y fuel oil para una central tipo de 1.000 MW.

	Carbón	Fuel Oil	Nuclear
Consumo medio por KW/h	380 g	230 g	4,12 mg
Consumo anual, millones de toneladas	2,5	1,52	27,2
Transporte anual	66 barcos de 35.000 toneladas o 23.000 vagones de 100 toneladas	5 petroleros de 300.000 toneladas + oleoductos	3 ó 4 camiones
CO ₂ , millones de toneladas	7,8	4,7	Cero
SO ₂ , toneladas	39.800	91.000	Cero
NO ₂ , toneladas	9.450	6.400	Cero
Cenizas de filtros, toneladas	6.000	1.650	Cero

² Elaboración propia a partir de información suministrada por documentos del Foro Nuclear Español y el OIEA (Sustainable Development Nuclear Power, 1997: <http://www.iaea.org/Publications/Booklets/Development/index.html>). En el caso particular de la hídrica se tomaron los valores central hidroeléctrica Rio Cuervo, Chile y la de Itaipu, Brasil.

³ Nucleonor, España.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

Escorias, toneladas	69.000	Mínimo	Cero
Cenizas volantes, toneladas	377.000	Cero	Cero
Radiación: gases, Curíes/año	0,026	0,001	1,85
Radiación: líquido, Curíes/año	Cero	Cero	0,1
Desechos radioactivos sólidos	Mínimo	Cero	13,5 m ³ (alta) 493 m ³ (media)

Acercando lo anterior a situaciones concretas se puede decir que la Central Nuclear de Kashiwazaki-Kariwa⁴, en Japón (ver Imagen 7.1), tiene una potencia total instalada de 8.272 MW, similar a la que actualmente posee el Sistema Interconectado Central (SIC) de Chile, y ocupa aproximadamente unas 420 Ha.

Por contrapartida, la producción de energía por unidad de terreno proveniente de fuentes renovables, requiere terrenos significativamente mayores y está condicionada por los requerimientos locales y las condiciones climáticas. Un ejemplo de esto se aprecia en la Imagen 3.2.



Imagen 3.1 - Vista área de la Central Nuclear Kashiwazaki-Kariwa en Japón con 8.212 MW de potencia instalada.

⁴ 5 Bloques de 1.100 MW BWR (Reactor de Agua Hirviente) y 2 de 1.386 MW ABWR (Reactor Avanzado de Agua Hirviente).

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”



Imagen 3.2 - Central Solar de Cuenca (España), compuesta por 90 mil paneles solares que cubren 80 hectáreas, equivalente a 100 canchas de fútbol, para producir 18 MW.

Los combustibles fósiles producen, adicionalmente al CO₂, gases nocivos y una amplia gama de contaminantes tóxicos que son fuente de contaminación atmosférica, cuyo nivel depende del material no aprovechable que contiene el combustible (en orden creciente, gas natural, petróleo y carbón). Su volumen depende también de la tecnología de combustión y de los controles de emisiones usados. Las magnitudes de estas emisiones se recogen en las Tablas 3.2 y 3.3.

El carbón produce siempre óxidos nitrosos gaseosos (NO_x), las impurezas del azufre se emiten como dióxido de azufre gaseoso (SO₂), y las inorgánicas como una amplia gama de metales, incluyendo elementos radiactivos. Los metales pesados volátiles, por ejemplo el mercurio, se proyectan en forma de vapor, mientras otros como el cadmio y el plomo, permanecen en su mayor parte en las cenizas residuales. El quemado incompleto produce partículas de carbón y de hidrocarburos, junto con monóxido de carbono y una amplia diversidad de componentes inorgánicos y también material radioactivo.

La contaminación depende del nivel de impureza de los combustibles, siendo el gas natural más limpio que el petróleo y éste, más limpio que el carbón. Las plantas de combustibles fósiles que usan tecnologías modernas de control pueden abatir la emisión de gases nocivos, pero producen significativas cantidades de desechos sólidos en el proceso.

En el caso de la energía hidráulica, el impacto sobre el medioambiente es consecuencia de la inundación de gran cantidad de superficie de terreno para asegurar el adecuado depósito de agua que permita generar los volúmenes de electricidad proyectados. El impacto se resume en la alteración del ecosistema de la zona, del caudal de los ríos y problemas en los ecosistemas acuáticos y de ribera, cuando las poblaciones de animales y vegetales son incapaces de adaptarse a los cambios bruscos ejercidos artificialmente.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

Los embalses suponen la creación de nuevos ecosistemas acuáticos, crean grandes masas de agua de movimiento lento, lo que puede provocar déficit de oxígeno en las capas profundas y problemas de sobre-crecimiento de la materia orgánica (eutrofización), ocasionando la detención del flujo natural de materiales en el curso del río, llenándolos poco a poco de sedimentos, en un fenómeno conocido como aterramiento. Causan también importantes alteraciones en el paisaje, modifican el microclima de la zona en que están construidos y provocan el desplazamiento forzado de pueblos enteros cuyas casas y cultivos se encuentran en la zona a sumergir.

Otro ejemplo, en particular en Chile, del impacto que tiene sobre el terreno la instalación de un parque eólico lo constituye el proyecto que el grupo español Enhol (Eólica Navarra) en asociación con la compañía chilena Eólica Talinay que construirán en la ciudad de Ovalle, a 411 Km al norte de Santiago, y que se anuncia como el mayor de su tipo en Latinoamérica. Tendrá una potencia de 500 MW con 243 aerogeneradores de entre 2 y 3 MW cada uno y ocupará aproximadamente 10.000 hectáreas (8.000 campos de futbol), **recuerde que la central nuclear japonesa tiene 8.212 MW y sólo ocupa 420 Ha.**



Imagen 3.3 - Represa Hidroeléctrica de Itaipú. El lago artificial tiene 29 millones de m³ de agua, con unos 200 Km de extensión en línea recta y un área aproximada de 1.400 Km². La potencia instalada es 12.900 MW, con 18 turbinas generadoras de 700 MW cada una.

En la Tabla 3.3⁵ se presenta la comparación de emisiones al medioambiente por diferentes fuentes de energía y a partir de ella se harán los análisis correspondientes.

Tabla 3.3 - Comparación del impacto ambiental de las diferentes formas de producir electricidad (en toneladas por GWh producido). (TR - Trazas)

⁵ US Department of Energy, Council for Renewables Energy Education and Worldwatch Institute.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

Fuente de Energía	CO ₂	NO ₂	SO ₂	Partículas	CO	Hidrocarburos	Desechos Nucleares	Total
Carbón	1058,2	2986	2,971	1,626	0,267	0,102	-	1066,1
Gas Natural (ciclo combinado)	824	0,251	0,336	1,176	TR	TR	-	825,8
Nuclear	8,6	0,034	0,029	0,003	0,018	0,001	3,641	12,3
Fotovoltaica	5,9	0,008	0,023	0,017	0,003	0,002	-	5,9
Biomasa	0	0,614	0,154	0,512	11,361	0,768	-	13,4
Geotérmica	56,8	TR	TR	TR	TR	TR	-	56,8
Eólica	7,4	TR	TR	TR	TR	TR	-	7,4
Solar Térmica	3,6	TR	TR	TR	TR	TR	-	3,6
Hidráulica	6,6	TR	TR	TR	TR	TR	-	6,6

Es conveniente señalar, que las centrales nucleares, en el aspecto de desechos radiactivos, han alcanzado reducciones significativas en el volumen de desechos de bajo actividad al ser gestionados éstos mediante compactación. En particular este tema, por la importancia que reviste y el impacto que tiene en la opinión pública, es abordado de manera independiente.

En cambio, las grandes cantidades de desechos de combustibles fósiles que contienen sustancias tóxicas, en especial provenientes de la combustión de carbón, plantean un serio problema en relación con la calidad del agua y la contaminación de las cadenas alimenticias, siendo cada vez más común clasificar tales desechos como peligrosos. Por ejemplo, una central a carbón de 1.000 MW produce aproximadamente 300.000 toneladas de ceniza al año (ver Tabla 7.2), así como 400 toneladas de metales pesados tóxicos. La tecnología para mitigar la contaminación por azufre produce 500.000 toneladas adicionales de desechos con sustancias tóxicas.

En lo que respecta a los gases de efecto de invernadero, que provoca el calentamiento global y cambios regionales en el clima, ha habido poco avance en la reducción de emisiones aunque

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

dentro de tales gases se encuentran el metano (CH₄) y los óxidos de nitrógeno (NO_x); el principal causante de dicho efecto es el dióxido de carbono (CO₂). De acuerdo con la Tabla 3.3, una planta de carbón de 1.000 MW emite 1058,2 toneladas de CO₂ por GWh generado, y no se aprecia en el horizonte alguna tecnología económicamente viable para mitigar o controlar esas grandes cantidades.

En 1997, un estudio del Departamento de Energía de los Estados Unidos pronosticó que para el 2015 las emisiones de CO₂ estarían 61% por encima del nivel de 1990, siendo las dos terceras partes del incremento producto de los países en desarrollo por el uso de combustibles fósiles para solventar sus necesidades de energía. En términos de gramos equivalentes de carbón por KWh, algunas cadenas de producción del gas natural podrían tener emisiones similares. Si se incluye el gas metano emitido por la descomposición del material orgánico inundado en el fondo de las represas hidroeléctricas, las emisiones podrían alcanzar los valores del gas natural.

Cálculos teóricos indican que si la electricidad producida por centrales nucleares en todo el mundo (17%) fuese generada por modernas y eficientes centrales térmicas alimentadas con carbón, serían lanzados adicionalmente al medioambiente aproximadamente 2.600 millones de toneladas de dióxido de carbono por año o 1.600 millones de toneladas si esa energía fuese generada por una combinación de centrales térmicas a base de petróleo, carbón y gas⁶.

En cuanto a las emisiones de celdas solares fotovoltaicas, éstas no son nulas. Como se aprecia de la Tabla 7.3 y estas son menores que la eólica. En ambos casos esta emisión de gases de efecto invernadero está relacionada a la cadena completa en particular en la manufactura del equipamiento y en el proceso de construcción de este tipo de centrales. Adicionalmente, en el caso de la fotovoltaica durante la manufactura de circuitos integrados de silicio se producen desechos químicos y metales pesados.

Por su parte los generadores eólicos tienen una incidencia de CO₂ similar a los de origen hidráulico; el impacto ambiental se centra en la baja producción de energía por unidad de superficie de terreno. Entre sus efectos perjudiciales, además de la modificación del entorno natural del emplazamiento, se cuentan altos niveles de ruido y generación de campos electromagnéticos cuyos efectos para la salud de las personas están en estudio, pero su presencia y efecto nocivo se ha documentado respecto a notorios cambios de conducta en las aves propias de esos hábitats. Los requerimientos de espacio en una instalación aerogeneradora son importantes por las necesidades de separación entre aerogeneradores, que revierte en mayores longitudes de accesos y canalizaciones, y por las dimensiones de los mismos, que supone la construcción de una serie de elementos auxiliares para su anclaje al

⁶ La opción de la nucleoelectricidad en la Región de América Latina y el Caribe, Proyecto “Cooperación en la Gerencia de Programas de Potencia Nuclear” RLA/4/012, OIEA, 1999.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

terreno (superficie de cimentaciones) y para su montaje (plataformas de apoyo de la maquinaria).



(a)



(b)

Imagen 3.4 - *Apreciación (a) del gran impacto visual que suponen los trazados de acceso a dos parques eólicos de California (EE.UU); (b) así como se evidencia la enorme influencia que presentan los factores de densidad y el número de aerogeneradores sobre el impacto paisajístico. Fuente: www.pbase.com*

A partir del análisis comparativo realizado anteriormente, la energía nuclear puede ser considerada como una opción válida para cubrir parte de la demanda creciente de energía dentro de la matriz energética para la generación de energía eléctrica por ser capaz de brindar módulos con un potencia de generación alta sin ocupar grandes extensiones de suelo, no generar durante la operación gases nocivos y de efecto invernadero y tener más de 50 años de experiencia de operación.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

3.1.2. Emisiones y contaminación térmica

Las emisiones de sustancias nocivas contienen un componente constante, correspondiente a la operación regular, y un componente casual que depende de la probabilidad de ocurrencia de averías, o sea del nivel de la seguridad del objetivo que se examina.

Los efluentes que se producen en las centrales nucleares, tanto gaseosos como líquidos, se someten a tratamiento con el fin de conseguir que los niveles de radiactividad disminuyan hasta niveles inferiores a los restrictivos límites establecidos, siendo descargados posteriormente de modo controlado cuando se tiene la certeza de que estos límites no se superan. Por su parte, los residuos sólidos se someten a procesos de compactación y mezcla en matrices de cemento estables y posteriormente se embidonan para su almacenamiento controlado.

En relación con la dosis recibida por la presencia de centrales nucleares, una persona que permaneciera todo el año a una distancia inferior a 2 Km de la central, recibiría una dosis adicional de 0,005 mSv/año⁷; la dosis disminuiría a medida que la persona se alejara de la central, de tal modo que si se mantuviera a una distancia superior a los 10 Km no recibiría dosis adicional alguna. Conviene recordar aquí que la reglamentación establece zonas de acceso prohibido o restringido en el entorno de una central nuclear, por lo que puede considerarse que es nula la dosis que por esta causa recibe el público en general. Por esta situación en particular, como se muestra en la Figura 3.1 a la central nuclear se le asignan diferentes zonas de control conocidas como sanitarias que definen las áreas donde deben realizarse el monitoreo de diferentes parámetros del medioambiente, incluyendo la radioactividad, y comparando sus resultados con los que se establecieron como línea base en el proceso de selección del emplazamiento de la central nuclear.

⁷ Sv, Sievert. Unidad de medida de radiación absorbida por la materia orgánica. 1 SV equivale a 1 Joule/Kg de radiación absorbida.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Nucleo Eléctrica”

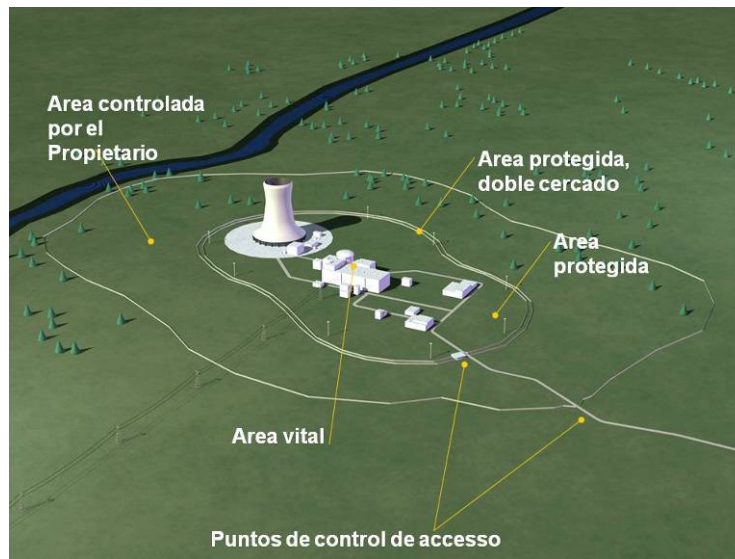


Figura 3.1- Representación esquemática de las zonas de seguridad para una central nuclear

Ahora bien, dentro la central nuclear se produce sustancias radioactivas y tóxicas en concentraciones altas y que podrían representar un grave riesgo si llegaran a contaminar los flujos superficiales o subterráneos de las aguas, a partir de donde se distribuirían en el medioambiente afectando a las plantas, los animales y las personas. Por eso, para la industria nuclear existen normas de estricto cumplimiento que regulan este tipo de emisión al medioambiente y para ello se equipan con eficientes medios de seguridad que permite el cumplimiento de lo regulado en ellas.

Las normas sanitarias de las concentraciones de los límites admisibles, las temperaturas permitidas, las cargas de dosis y las cargas mecánicas constituyen el criterio determinante en la elaboración de las medidas para proteger al medioambiente. Los límites de irradiación hacia el exterior, nivel de los radioisótopos y de las sustancias tóxicas en los componentes de los ecosistemas, así como las cargas mecánicas, se fijan en las normas correspondientes con el objetivo de proteger al medioambiente de una posible degradación.

Las medidas para la prevención de las influencias peligrosas durante la operación, la creación de posibilidades para su compensación y el control de las influencias nocivas deben considerarse durante la fase de planeamiento de los objetivos. Esto supone, como se mencionó anteriormente, la elaboración y creación de sistemas de monitoreo ecológico en las regiones, la elaboración de métodos de cálculo para el pronóstico del daño ecológico, métodos reconocidos de evaluación de las capacidades ecológicas de los ecosistemas y métodos de comparación de daños de diversos tipos.

Estas emisiones quedan registradas continuamente y son objeto de continuo seguimiento mediante un extenso programa de análisis realizado por entidades independientes y por la administración de las propias centrales nucleares. Los valores de esos efluentes medidos en

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Nucleo Eléctrica”

términos de actividad radiológica y de dosis son mil veces inferiores a lo permitido en las reglamentaciones vigentes en los países que poseen este tipo de planta y por debajo de otras fuentes de radioactividad a la que el ser humano se encuentra en su vida cotidiana. Este último aspecto se recoge en la sección 3.1.5 (Impacto Social, ver Figura 3.11).

Por otro lado, por regulación las centrales nucleares deben tener un Plan de Emergencia antes incidentes y accidentes nucleares que es revisado y controlado por la Autoridad Reguladora Nuclear y que contiene las acciones necesarias para reducir las consecuencias que pudiera tener cualquier tipo de incidente o accidente a los trabajadores de la central, al medioambiente y la población en general.

Al igual que las centrales termoeléctricas, las centrales nucleares realizan descargas de residuos líquidos al medioambiente. En este caso al igual que las termoeléctricas a combustibles fósiles como la nuclear, en Chile deben satisfacer el Decreto Supremo No. 90 del 30 de Mayo del 2000 que establece la “Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales” y por ello deben tomarse las soluciones técnicas correspondientes para su cumplimiento.

Por otro lado, en toda central térmica (de carbón, fuelóleo, gas o nuclear) hay una parte de la energía que, de acuerdo con la termodinámica, no se transforma en electricidad sino que se elimina en forma de calor residual. Este calor residual, si no se aprovecha de otro modo, se disipa en el agua de refrigeración del condensador. Cuando esta agua vuelve a su cauce original (río, lago o mar) puede producir un incremento térmico de este sumidero. Dependiendo de las circunstancias esta alteración puede tener efectos beneficiosos, indiferentes o perjudiciales, según los casos. Fuera de las ocasiones en que el aumento de temperatura sea deseable, la reglamentación prohíbe que dicho aumento exceda de una cierta cantidad, por debajo de la cual no hay alteración ecológica. Existen soluciones tecnológicas que permiten limitar el aumento de temperatura del agua diluyendo el agua del condensador con suficiente líquido del sumidero último, tomando agua más fría a una profundidad mayor, aumentando la eficiencia térmica de la generación o recurriendo al uso de torres de refrigeración. En la Figura 3.2 se presenta una de las soluciones técnicas para reducir esta contaminación.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”



Figura 3.2 - Representación esquemática de la toma de agua de mar a profundidad.

Existen experiencias de aprovechamiento del calor residual de las centrales con fines útiles en la acuicultura o invernaderos, con lo que además de evitarse el perjuicio ecológico, se aprovecha la energía residual de la central⁸.

En el caso de la central nuclear la diferencia de temperatura alcanza los 5 °C que está dentro de los rangos permitidos a los proyectos termoeléctricos de acuerdo con lo establecido en la Tabla No. 5 del Decreto Supremo 90 del 200 (7 °C) y cuyos análisis se pueden consultar en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental Chileno (SEIA)⁹. En los casos analizados en el SEIA se proponen medidas técnicas para que aun siendo esta diferencia de temperatura superior al límite establecido, esta diferencia se reduzca a los límites establecidos. Por ello, se puede afirmar que una central nuclear tiene impactos sobre el medio marino equivalentes a las unidades térmicas convencionales que existen en Chile, y que con regulación e inversión puede mejorar dichos parámetros.

3.1.3. Impacto al patrimonio cultural

Se ha mencionado con anterioridad que al igual que cualquier otro proyecto de generación de electricidad, la central nuclear debe cumplir con toda la normativa sectorial en el ámbito ambiental y la normativa específica que sea aplicable al proyecto con relación a la protección del patrimonio cultural que se encuentre ubicado en la región de emplazamiento de la central.

Por ello, si durante las investigaciones que se realizan para la selección del emplazamiento o incluso en los trabajos de construcción (particularmente excavación) se encuentran sitios o

⁸ http://www.tepco.co.jp/en/env-com/environment/report/env_sec/local/ka_35-02-e.html

⁹ <http://www.seia.cl>, proyectos de centrales generadoras mayores de 3 MW (CTE Maitencillo, Patache S. A. CTE Punto Alcede, entre otras. CTE Central Termoeléctrica).

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

lugares de interés arqueológico, se tendrán en cuenta las regulaciones establecidas al respecto para la protección del patrimonio cultural del país y en particular de la región.

Vinculado con la ubicación de la central generadora de electricidad, se origina en caso que sea necesario un proceso de reubicación o reasentamiento de la población que se encuentre en las inmediaciones del terreno donde se construirá la central. En general las renovables, incluyendo la hidráulica tienen impactos mayores en este sentido que el resto de las fuentes sin embargo, todas deben satisfacer las regulaciones establecidas al respecto en el país en cuestión.

En caso de que los asentamientos a reubicar sean de pueblos originarios adicionalmente habrá que satisfacer los requerimientos que en este sentido establezca la ley. Por ello, para ambas situaciones se deben promover la ejecución de medidas que ofrezcan a los afectados los medios para mejora o al menos restaurar los niveles de vida anteriores y el resto a la cultura de la región.

3.1.4. Desechos

Todas las actividades industriales generan residuos o desechos. Estos pueden ser más o menos cuantiosos o nocivos y pueden aparecer en las distintas fases de los procesos de construcción y de producción, debido a la continua manipulación de materiales involucrados en los diferentes procesos.

A modo de ejemplo se puede citar la producción **per cápita** anual de desechos en Francia, un país donde el 75% de la generación eléctrica es nuclear:

- 360 Kg de desechos domésticos;
- 7.300 Kg de desechos agrícolas;
- 3.000 Kg de desechos industriales de los cuales **100 Kg son tóxicos**;
- **1,4 Kg de desechos radioactivos de los cuales 20 g son altamente radioactivos y solo 1 g de vida media larga que por esta razón requieren una atención especial.**

La situación de los desechos en la Unión Europea según la empresa española ENRESA¹⁰ se presenta en la Figura 3.3.

¹⁰ Tomado de: Nuclear and Renewable Energies (Rome: Accademie Nazionale dei Lincei 200) update with data from European Commission, Radioactive Waste Management in the European Union (Brussels: EC: 1998). ENRESA: Empresa Nacional de Residuos Radioactivos S. A.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

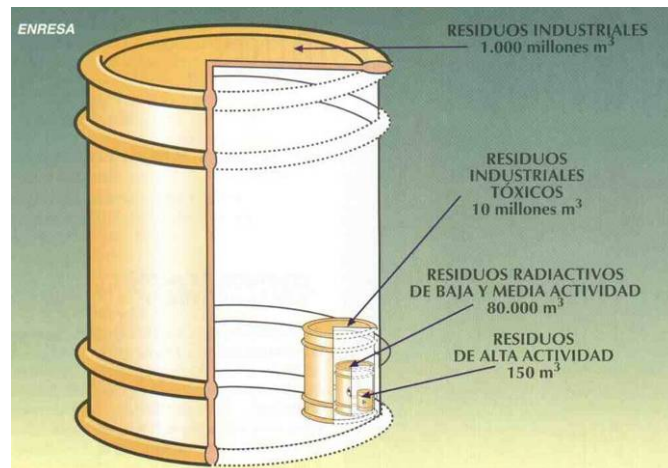


Figura 3.3 - Comparación de la generación anual de desechos en la Unión Europea.

Un análisis para el caso particular de la industria eléctrica se puede apreciar en la Figura 3.4 donde se recoge el tipo de desecho y su volumen por GW generado.¹¹

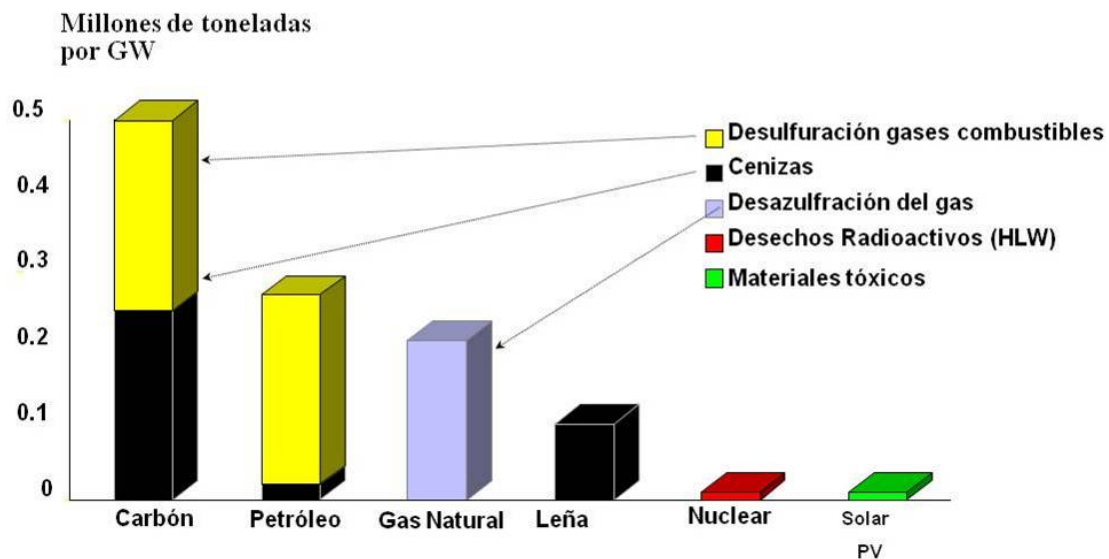


Figura 3.4 - Desechos anuales producidos en la elaboración del combustible y el funcionamiento de las centrales eléctricas.

¹¹ Mantenimiento y aumento del patrimonio para las futuras generaciones, Energía Nucleoeléctrica y desarrollo sostenible, Colección de Información Pública del OIEA, División de Información Pública 02-01577/FS Series 3/01/5/Rev.1)

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

3.1.4.1. Desechos radioactivos

La humanidad ha convivido con la radiación y los radioisótopos desde la aparición de la vida en la Tierra, entre estos, elementos con periodos de semidesintegración muy largos, como el potasio-40, el uranio-238, el uranio-235 y el torio-232, así como los isótopos resultantes de la desintegración de estos tres últimos. También el hombre ha empleado algunos isótopos radiactivos naturales, como el radio-226 en técnicas terapéuticas, además del uranio-235 de los reactores nucleares. Así, el factor de peligro de estas sustancias está dado por su concentración, que en el caso de los desechos radioactivos supera los niveles definidos como aceptables para la salud humana.

Se considera desecho radiactivo cualquier material o producto para el cual no está previsto ningún uso, que contiene o está contaminado con radionúclidos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por las autoridades competentes. Los residuos radiactivos se producen en las distintas aplicaciones, a saber:

- **Aplicaciones energéticas.** Es el grupo más importante. Los desechos generados en estas aplicaciones provienen de la generación de electricidad de origen nuclear abarcando cada una de sus etapas en el ciclo de vida. Constituyen alrededor del 95 % de la producción total.
- **Aplicaciones no energéticas.** Derivadas de los usos de la energía nuclear en la investigación, medicina e industria. El volumen de desechos radiactivos que generan es pequeño, inferior al 10%, sin que esto quiera decir que su gestión deba ser menos rigurosa.

Desde luego que en Chile, como país con basta aplicación de las técnicas nucleares en la industria, agricultura y la medicina desde hace mas de 40 años, se generan este tipo de desechos. La Comisión Chilena de Energía Nuclear es la responsable, a nivel de país, de la gestión de estos desechos y por ello tiene acumulada una relativa experiencia en el manejo de los mismos, alcanzada durante todo estos años de las aplicaciones de estas técnicas.

Con independencia de si el desecho es sólido, líquido o gaseosos estos pueden ser clasificados de la siguiente forma:

- **Desechos de actividad baja:** producidos en las centrales nucleares y en las aplicaciones de radioisótopos en la medicina, la industria y las investigaciones. Deben ser confinados solo por un periodo de tiempo limitado de cerca de 200 años.
- **Desechos de actividad media:** son los que generan durante la operación de la central nuclear tales como resinas de intercambio iónico, y son tratados y dispuestos normalmente de la misma manera que los de bajo nivel.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Nucleo Eléctrica”

- **Desechos de actividad alta:** consisten en los productos de fisión y el plutonio contenido en los elementos combustibles gastados que son extraídos del núcleo (zona activa) del reactor nuclear y que son almacenados de una forma segura para aislarlos del medioambiente y a largo plazo, posiblemente por cientos de miles de años. Estos desechos generan calor que puede ser significativo los primeros 30 años.

Para todos ellos, se exigen una gestión y evacuación apropiadas de manera que no tengan una interacción directa con el medioambiente y la población. Las tecnologías existentes en la actualidad para la gestión de los desechos radiactivos de actividad baja e intermedia son de una eficacia comprobada y se utilizan ampliamente en los Estados miembros del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) desde hace más de 40 años.

3.1.4.2. Desechos radioactivos producidos por las centrales nucleares^{12, 13}.

Los desechos radiactivos generados en la producción de energía nucleoelectrónica son:

- **Desechos generados en la minería y la fabricación del combustible nuclear.** Contienen radioactividad únicamente natural y son los materiales de desecho: a) de la minería del uranio; b) de la separación del uranio, de los minerales extraídos, en las plantas de fabricación de concentrados (torta amarilla); c) del enriquecimiento en uranio-235 para aumentar la concentración del isótopo fisiónable; y d) de la fabricación del combustible nuclear.
- **Desechos generados durante el funcionamiento de las centrales nucleares.** Hay de dos tipos:
 - Se originan en la fisión o “quemado” del combustible que se introduce en el reactor para producir energía, su volumen es pequeño pero altamente radioactivo.
 - Los que se generan durante la operación normal de la central provenientes de las mantenciones de la central entre los que se encuentran las resinas de intercambio iónico del primer circuito, guantes, ropas de trabajos, utensilios o equipos utilizados en el primer circuito para la mantención, entre otros.

¹² Factors Relevant to Recycle or Reuse of Components Arising from the Decommissioning and Refurbishment of Nuclear Facilities: Technical Report Series 293, Vienna. IAEA, 1988.

¹³ MacLauchlan A., NEA Study Finds Waste Weight is Key to Decommissioning Cost. Nucleon Weeks, 32, No. 42, P. 1-9.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

Todo esto da a lugar a una determinada cantidad de productos radiactivos de baja radioactividad, los que son tratados como “desechos radioactivos” dentro de la central nuclear.

- **Desechos generados en el reprocesamiento del combustible** una vez que este es retirado de la central nuclear para su almacenamiento definitivo. Son de alta actividad y periodos de vida media largos y que son debidamente gestionados para la reducción de sus volúmenes y almacenamiento definitivo. Se desarrollan tecnologías, en particular trasmutación, para reducir la radioactividad de los mismos y los tiempos de vida media.
- **Desechos generados durante el desmantelamiento** de la central al concluir sin tiempo de vida útil. Estos se producen como consecuencia del desmontaje de las instalaciones y equipos del primer circuito de la central que están expuestos a radiaciones ionizantes durante la vida útil de la central. Estos materiales son debidamente gestionados y confinados en almacenes especialmente diseñados para este tipo de desecho.

En su mayor parte residuos de baja actividad y, en algún caso, de media y en pequeños volúmenes los de alta actividad. Se producen en total del orden de 100 m³ de este tipo de residuos por año de operación en una central de 1.000 MW, conteniendo un total de actividad de 400 curies.¹⁴

El combustible nuclear una vez alcanzado el grado de quemado establecido se saca del núcleo del reactor y se coloca en las piscinas de combustible gastado de la misma central nuclear, que tienen como misión su aislamiento radiobiológico, la disipación de su calor residual y su albergue provisional en espera de su posterior gestión. El agua de la piscina se contamina, para lo cual luego se purifica por filtración y absorción, produciendo también pequeñas cantidades de residuos de baja actividad.

Por último hay que incluir todos los desechos radiactivos producidos en el proceso de desmantelamiento de las centrales al término de su vida útil.

En todas las etapas del ciclo de combustible se producen desechos radioactivos de baja actividad (número de desintegraciones de núcleos radioactivos por unidad de tiempo). Contienen elementos débil o muy débilmente radioactivos y de vida media corta (no más de unas pocas décadas). Representan el 90% del total del volumen de desechos generados a lo largo de toda la vida útil de una central nuclear, pero contienen solo alrededor del 1% del total de la radioactividad. Se producen especialmente durante el mantenimiento de la central (herramientas y ropa protectora o filtros irradiados) y durante el desmantelamiento.

¹⁴ Curie, antigua unidad de medida de la radioactividad. 1 Curie es igual a $2,2 \times 10^{12}$ desintegraciones por segundo.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Nucleo Eléctrica”

Los residuos de media actividad son sustancias de mayor vida media (miles de años). Se producen durante la operación del reactor y en el desmantelamiento (solo un porcentaje pequeño de la central desmantelada cae en esta categoría de desecho). También se generan en el reprocesamiento del combustible y para una central de 1.000 MW la World Nuclear Association estima que en el mantenimiento se genera cada año 0,5 m³ de desechos de este tipo.

Los residuos de alta actividad contienen desechos mas altamente radioactivos y de vida media larga (más de 10.000 años). Están constituidos esencialmente por el combustible gastado. El OIEA reporta valores que muestran que en promedio una central de 1.000 MW genera anualmente alrededor de 30 toneladas de metales pesados como desechos del combustible, lo que representa para reactores de agua ligera un volumen de aproximadamente de 20 m³ al año.

Por otra parte, el desmantelamiento de una central nuclear genera desechos de baja media y alta actividad. Los residuos de baja actividad y de vida media corta representan en promedio y de acuerdo con los datos del OIEA, unas 5.000 toneladas que, asumiendo una densidad media aparente de los residuos del desmantelamiento de 1,4 t/m³, implicaría unos 3.500 m³. Los residuos de media y alta actividad representan unas 1.000 toneladas (700 m³).

Algunos científicos sostienen que con la utilización del ciclo cerrado de combustible, en 150-200 años más, la radioactividad total de los desechos nucleares, a excepción de la porción final de alta radioactividad (que es un 3% del total), estará al mismo nivel inicial de la radioactividad de las materias primas del combustible nuclear. En la actualidad los especialistas no tienen dudas acerca de la seguridad de las medidas propuestas para el aislamiento de los desechos radioactivos. Sin embargo, es indudable que de cara a la opinión pública el hecho de admitir que se requiere guardar desechos nucleares por cientos o miles de años resulta difícil explicar y puede preocupar a un porcentaje importante de la población, aunque existan argumentos que demuestran que estos depósitos no constituyen una amenaza y tampoco han provocado, hasta ahora, un aumento de la radioactividad natural de la Tierra.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”



Imagen 3.5 - Centro de Almacenamiento de Desechos Radioactivos “El Cabril”, España.

3.1.4.3. Seguridad en la gestión de los desechos radioactivos¡Error! Marcador no definido.

El desarrollo alcanzado en los más de 50 años de operación de las centrales nucleares y las aplicaciones no energéticas de la energía nuclear permiten garantizar una alta gestión en el tratamiento de los desechos de baja y media actividad y constituye actualmente una actividad cotidiana y en constante perfeccionamiento. En cuanto a los desechos de alta actividad provenientes del combustible nuclear gastado también están tomadas las medidas para que este proceso se realice con igual seguridad.

Para este tipo de desecho en la actualidad se tienen 3 vertientes fundamentales (ver Figura 3.5):

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Nucleo Eléctrica”

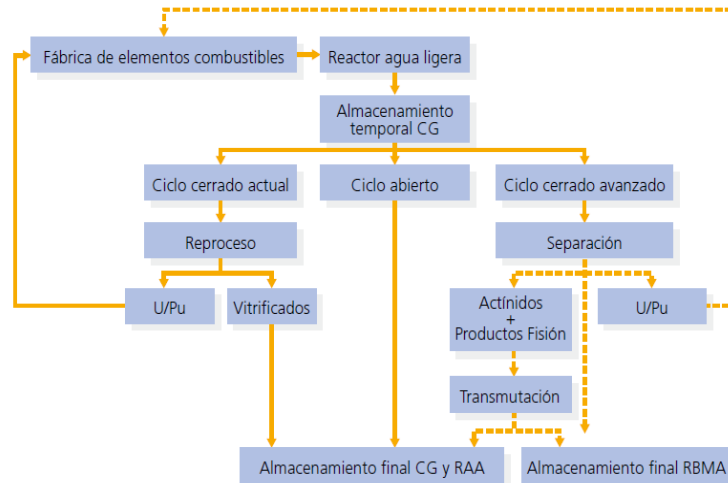


Figura 3.5 - Opciones de gestión del combustible nuclear gastado. (CG-Combustible gastado; RAA- Residuos de Alta Actividad y RBMA - Residuos de Baja y Media Actividad)

- El ciclo abierto del combustible nuclear, donde el combustible nuclear gastado es extraído de la zona activa del reactor nuclear y localizado primeramente en una piscina de refrigeración ubicada en el recinto de contención por un periodo de 7-9 años. Posteriormente es extraído de esta piscina y ubicado en una piscina similar pero fuera del recinto de contención donde se puede mantener durante todo el tiempo de vida útil de la central. La cantidad de estos desechos se corresponden con la cantidad de combustible nuclear gastado que este caso para un reactor de 1.000 MW es 27-30 toneladas por año.
- Ciclo cerrado actual, el combustible nuclear gastado es reprocesado y se extraen Uranio y plutonio que son utilizados nuevamente en la fabricación de combustible nuclear. En este proceso también se obtienen desechos de alta actividad que son vitrificados y enviados al almacén definitivo. El volumen de los desechos en este caso es de 15 m³ por año, para un reactor de 1.000 MW (PWR/VVWER).
- Ciclo cerrado “avanzado” en el cual el combustible nuclear se somete al mismo tratamiento anterior y solo se diferencia que el desecho que antes era vitrificado se transmuta por irradiación del mismo pasando a otros tipos de elementos radioactivos con tiempo de vida media más cortos. Aquí se producen dos tipos de desechos uno que es enviado a un almacén final por ser de alta actividad y otro de baja y media que puede ser almacenado en los repositorios normales que se utilizan para este tipo de desecho.

Hay un amplio consenso entre las organizaciones científicas mundiales que se encargan del estudio del almacenamiento final de estos desechos, de que la disposición de los mismos en capas geológicas es un método aceptable y seguro para el aislamiento permanente del

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

medioambiente. Estos almacenes, conocidos como Repositorios, actualmente se encuentran en construcción en Estados Unidos, Francia, Finlandia y Suecia.



Imagen 3.6 - Planta de enriquecimiento de uranio de Tricastin, Francia. Esta planta garantiza las necesidades de de uranio enriquecido para las centrales nucleares francesas.

Cualquier país que inicie un programa núcleo eléctrico tiene tiempo suficiente para poder definir la posición que tomará con relación al combustible nuclear gastado, aunque hay algunos suministradores del combustible, por ejemplo Rusia, que puede incorporar en el contrato de suministro la reexportación del combustible nuclear gastado, almacenarlo, reprocesarlo y almacenar los desechos finales de este proceso.

Por otro lado, debe tenerse en cuenta que la gestión de los residuos es parte integrante del proyecto nucleoelectrico por lo que la toma de decisión respecto a si es adecuado iniciar el camino nucleoelectrico requiere identificar las alternativas viables para esa gestión.

Durante la fase de análisis, se estima necesario definir las estrategias viables para la gestión de los desechos, a través de los siguientes estudios:

- Situación actual del tratamiento y disposición final de los desechos nucleares en el ámbito internacional, incluyendo investigaciones, perspectivas tecnológicas, capacidades existentes, regulaciones y experiencia específica con este tipo de desechos.
- Estimación de los volúmenes adicionales de desechos de cada categoría que se generarían en cada opción tecnológica.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

- Identificación de las opciones viables en Chile para la gestión de los desechos, incluyendo opciones para el almacenamiento a largo plazo.
- Análisis de la viabilidad de compartir un repositorio final conjunto con otros países.
- Estimación primaria de los costos de las opciones para la gestión de residuos, la organización y la forma de financiamiento del mismo.

3.1.4.4. Aspectos ambientales y de seguridad del ciclo de combustible nuclear

Una de las particularidades de este largo proceso es que todos los materiales que se manejan a lo largo del ciclo poseen componentes radiactivos, en cantidades que varían desde poco a muy significativas. Por otro lado, existe la posibilidad de que ocurra el llamado “accidente de criticidad”, es decir, que por manipulaciones del material que no respeten el protocolo de seguridad, puede llegar a ponerse en marcha una reacción en cadena fuera del reactor.

En general la minería del uranio presenta especificidades que hacen recomendable un marco regulatorio específico. El análisis de los aspectos ambientales de la minería del uranio indican que la extracción de ese mineral, el que normalmente está presente en concentraciones menores a 0,5%, genera una cantidad importante de material estéril, es decir con concentraciones de uranio menores al umbral de rentabilidad. Estas pilas de material estéril, permanecen incluso luego de cerrada la mina, pueden eventualmente emitir radiación en niveles superiores a los naturales, liberar gas radón y lixiviar sustancias radiactivas, que terminan en el ambiente. Debido a la elevada vida media de los componentes radioactivos los depósitos de los residuos deben estar bajo control durante mucho tiempo para prevenir la erosión de las pilas.

El mineral extraído, molido y filtrado en molinos de uranio puede producir emisiones de material particulado con alto contenido de minerales radiactivos. El proceso de separación del uranio del resto de los minerales genera relaves que deben ser manejados y dispuestos de tal manera que no contaminen el ambiente. Asimismo, durante las operaciones mineras en general, grandes volúmenes de agua potencialmente contaminada son bombeados fuera de la mina y un manejo inadecuado puede llevar a que sean liberadas a ríos o lagos. En las minas, los trabajadores están expuestos a polvo radioactivo y a gas radón, presentando riesgos de desarrollar cáncer de pulmón y otras enfermedades. La ventilación de las minas, si bien reduce el riesgo de los trabajadores de contraer enfermedades, puede liberar polvo y gas de radón, lo que incrementaría la insalubridad de los habitantes de la zona.

Al final de la operación de una mina o el de un molino de uranio debe tenerse en cuenta que su cierre requiere cuidados especiales y genera cantidades importantes de residuos radioactivos que deben ser gestionados en forma segura y durante un largo periodo de tiempo. En todas las actividades mineras, pero particularmente en la del uranio, el cierre de una mina debe preverse a lo largo de toda la vida del proyecto. De otra manera, los costos resultan demasiado importantes y,

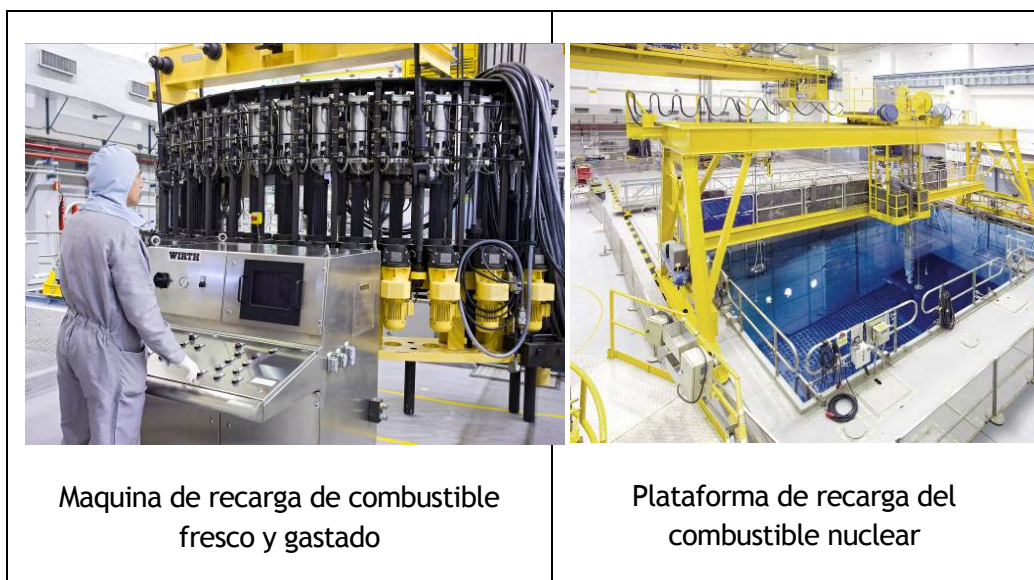
Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Nucleo Eléctrica”

en lugar de imputarlos al uranio, podrían terminar ser socializados. Por esta razón, en general, resulta recomendable la conformación de un fondo para el cierre de las minas y otras instalaciones vinculadas.

Sin perjuicio de lo expuesto, debe destacarse que existen prácticas para las operaciones mineras del uranio que aseguran una adecuada inserción en el ambiente. Una cuidadosa gestión ambiental y un manejo transparente de la información en las actividades mineras resultan indispensables para la extracción del uranio.

El combustible nuclear fresco, aquel que no ha sido introducido dentro de la zona activa del reactor nuclear, se almacena en las piscinas de almacenamiento correspondientes dentro del recinto de contención de la central en las cercanías del reactor. Desde estas piscinas y a través de la máquina de recarga primero se extraen las casetas seleccionadas con combustible quemado y se depositan en la piscina de decaimiento donde estarán entre 3 a 5 años y con posterioridad se toman los casetes frescos en la piscina correspondiente para ser introducidos en la zona activa en reemplazo de los que fueron extraídos (ver Figura 3.6).

Pasados los 5 años el combustible gastado se puede almacenar hasta el cierre de la central en almacenes exteriores debidamente acondicionados para ello y con los controles establecidos. En la Figura 3.7 se puede apreciar la piscina para el combustible extraído del reactor y los silos de almacenamiento en seco del combustible gastado fuera del recinto de contención de una central nuclear de los Estados Unidos, donde permanecerán hasta su evacuación definitiva, así como el medio utilizado para su movimiento dentro de la central nuclear.



Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

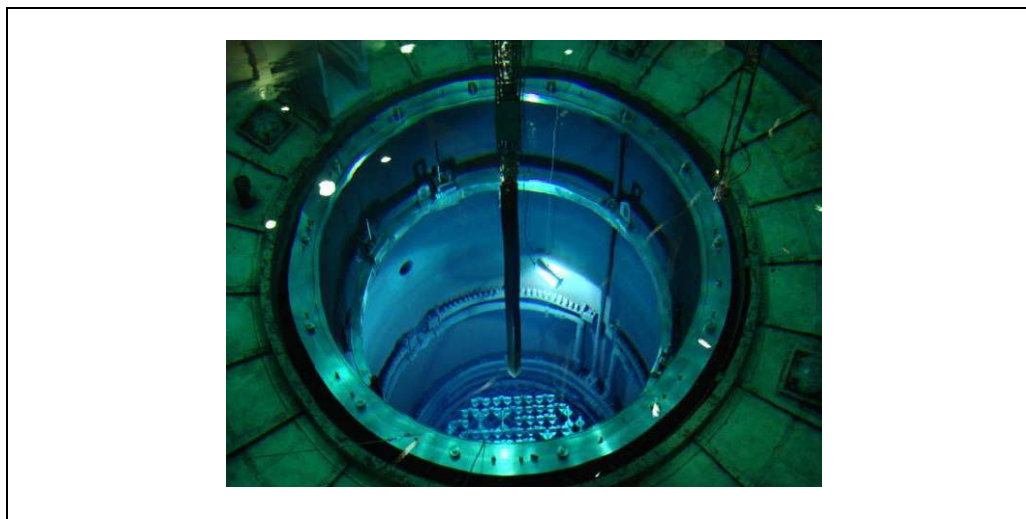


Figura 3.6 - Máquina de recarga, plataforma de recarga del combustible nuclear y vasija de reactor en recarga de la central nuclear Santa María de Garoña en España.



Figura 3.7 - Piscina de almacenamiento del combustible gastado en el recinto de contención de la central nuclear y su almacenamiento en seco en el emplazamiento de la central nuclear. Nótese,

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Nucleo Eléctrica”

en la imagen superior derecha, la cercanía del área para el almuerzo de los trabajadores de los silos de almacenamiento y en la imagen inferior, que no es necesaria ropa de protección para el movimiento de los contenedores. (Fuente: Marshall Cohen, *The future of Nuclear Energy*, Nuclear Energy Institute).

El combustible, ya sea antes o después de haber pasado por el reactor, se transporta dentro de recipientes especialmente diseñados para este fin (ver Figura 3.8), siguiendo protocolos de seguridad muy estrictos y bajo el contralor de organismos locales e internacionales. Los recipientes deben cumplir una doble función: el confinamiento de las sustancias, lo que se logra mediante varias capas protectoras, y el permitir la disipación de calor que acompaña los procesos radioactivos.

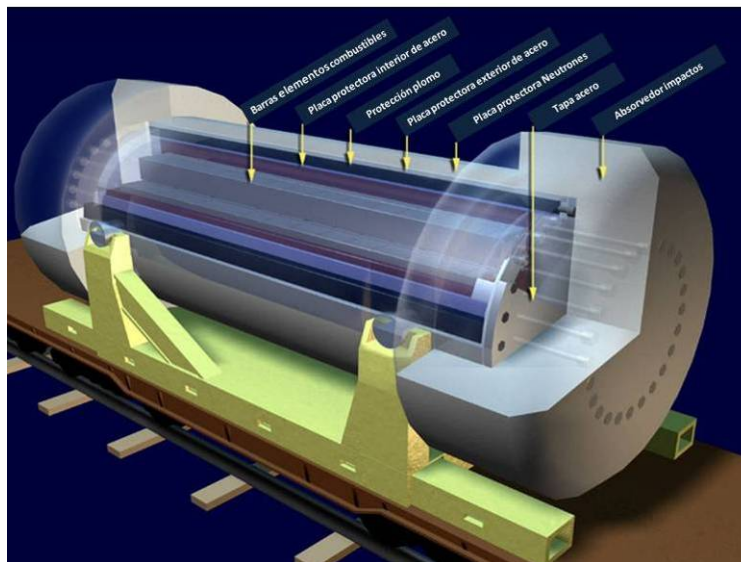


Figura 3.8 - Esquema del contenedor para transportación elementos combustibles gastados.

El ciclo de combustible nuclear involucra también el transporte (ver Figura 3.9), a veces a largas distancias, de sustancias radioactivas. Estos contenedores son diseñados para resistir fuertes golpes sin pérdida de confinamiento, previendo un accidente relevante del medio que lo transporta. Asimismo, los recipientes son capaces de resistir incendios de consideración. Para mayor seguridad,

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

en la actualidad, cada contenedor posee un emisor satelital que permite que sea rastreado en todo momento.



Figura 3.9 - Manipulación contenedores combustible gastado y transportación por carretera.

Las pruebas que tienen que superar los transportes de materiales radiactivos según establece el OIEA son:

- Caída libre desde 9 m de altura sobre un blanco rígido sin pérdida de integridad.
- Caída libre desde 1 m de altura sobre punzón de acero sin pérdida de integridad.
- Ensayo de fuego a una temperatura de 800 °C durante 30 minutos.
- Ensayo de inmersión en condiciones equivalentes a una profundidad de 15 m durante 8 horas (para el caso de combustible gastado se hace un ensayo reforzado a 200 m de profundidad durante 1 hora) garantizando la estanqueidad.

Adicionalmente también se hacen ensayos en condiciones reales de accidente:

- Impacto de un camión a 138 km/h contra muro de hormigón de 3 m de espesor.
- Impacto locomotora a 131 km/h contra contenedor, etc.

En la Figura 3.10 se recogen imágenes de las pruebas realizadas e impactos contra una pared y un choque con una locomotora. En los dos casos los resultados demostraron la resistencia del contenedor al impacto y por tanto la no salida exterior de los materiales radioactivos.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Nucleo Eléctrica”



Figura 3.10 - Pruebas de impactos realizadas a contenedores de transportación del combustible nuclear.

No hay constancia de que se haya producido ningún accidente en el mundo durante el transporte de materiales radiactivos en el que se haya producido una dispersión de la carga radiactiva.

El proceso de reciclado produce a su vez los residuos, (a veces denominados “cenizas”) que si bien ocupan un volumen menor, siguen siendo radiactivos. Estos residuos contienen los actínidos menores y los productos de fisión del uranio que también presentan vidas medias y altos niveles de toxicidad, por lo que deben gestionarse con estrategias similares a las planeadas en los países que han resuelto no reciclar sus residuos nucleares. Según el OIEA, el reprocesamiento del combustible produce $0,40 \text{ m}^3$ de residuos de alta actividad por cada tonelada, los cuales son vitrificados, lo que implica que el reprocesamiento del combustible usado en un año por una central de 1.000 MW genera un volumen de 15 m^3 de residuos vitrificados de alta actividad.

3.1.5. Impacto Social

Cuando se habla del impacto social que tiene la energía nuclear nuevamente se debe diferenciar en torno a sus dos aplicaciones es decir, la no energética y la energética.

Sus aplicaciones no energéticas tienen una amplia aceptación por parte de las población, ya que ellas están dirigidas al diagnóstico y terapia de enfermedades, a la investigación en las ciencias biológicas, en el control de calidad de la industria, preservación de alimentos, control de plagas, inducción de mutaciones en especies vegetales para mejorar los rendimientos de los cultivos, entre otros. En resumen, repercuten favorablemente en el bienestar general de la población.

Sin embargo, a pesar de que el empleo de la energía nuclear en la generación de electricidad tiene un impacto también positivo en la sociedad, por su contribución al mejoramiento de la calidad de vida y al bienestar en general de la población, esta aplicación no es bien recibida por las personas.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Nucleo Eléctrica”

Las causas de esta valoración negativa radican fundamentalmente en:

- El riesgo de repetición de accidentes severos con consecuencias similares a las del accidente de la central de Chernobyl.
- Los aspectos vinculados con la gestión de los desechos radioactivos
- La supuesta vinculación entre la generación nucleoelectrica y el armamento nuclear.

Hay que señalar que esta industria tiene una alta conciencia de sus responsabilidades e invierte colectivamente más en medidas de seguridad que cualquier otra industria con la que se le pueda comparar. La experiencia adquirida en la operación de centrales nucleares y en la de los accidentes ocurridos en la industria nuclear mundial, ha llevado a la tecnología de la seguridad a un nivel mayor que en cualquier otro tipo de central de energía eléctrica.

Cabe destacar que las Autoridades Regulatoras Nucleares Nacionales juegan un papel importante en la seguridad de este tipo de instalaciones. Sus requerimientos reguladores, son los medios legales a través de los cuales se otorgan las diferentes licencias que confirman el nivel de seguridad y autorizan la ejecución de los trabajos en cada una de las etapas (selección del emplazamiento, construcción, puesta en marcha, operación comercial y desmantelamiento). Asimismo, controlan el cumplimiento por parte de la entidad explotadora de la central nuclear y el cumplimiento de los requerimientos establecidos en estas licencias a través de inspectores residentes.

Otro aspecto que está presente en esta evaluación social, es el impacto de las radiaciones ionizantes sobre la salud y la esperanza de vida de la población. El hombre y todos los seres vivos están expuestos permanente a la radiación natural y al derivado de las actividades humanas, una representación esquemática de esta afirmación se presenta en la figura 3.11.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

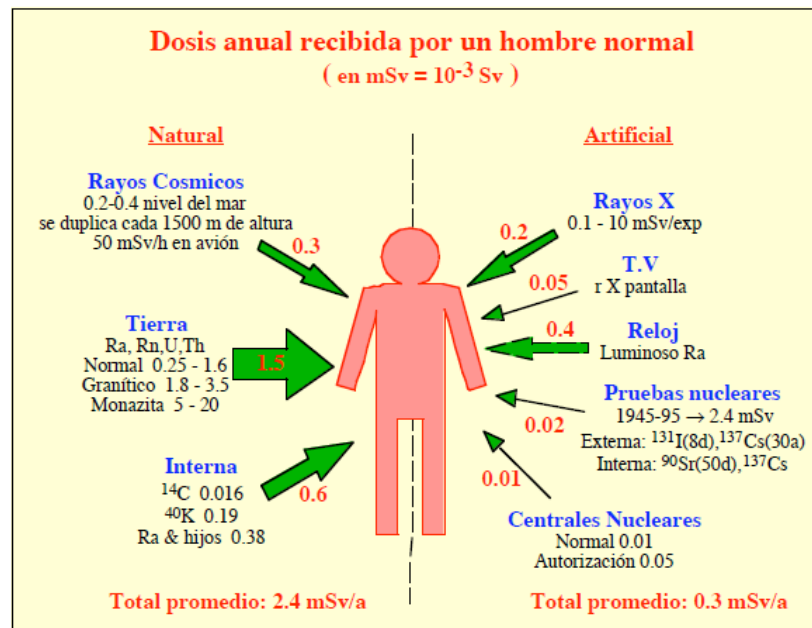


Figura 3.11 - Dosis anual de radiación recibida por un hombre normal (fuente: Foro Nuclear de la Industria Española).

De la figura se puede señalar que la dosis recibida por la **dosis a la población proveniente de la central nuclear en operación normal es 20 veces menor que la que se recibe al realizarse una radiografía, 5 veces menor a la que se recibe viendo la televisión y 240 veces menor que la que recibe por radiación natural.**

En relación con la dosis recibida por la presencia de **centrales nucleares**, una persona que permaneciera **todo el año a una distancia inferior a 2 km** de la central, **recibiría una dosis adicional de 0,005 mSv/año**; la dosis disminuiría a medida que la persona se alejara de la central, de tal modo que si se mantuviera **a una distancia superior a los 10 km no recibiría dosis adicional alguna**. Conviene recordar aquí que la reglamentación establece zonas de acceso prohibido o restringido en el entorno de una central nuclear, por lo que puede considerarse que es nula la dosis.

Tanto las centrales nucleares, como las de carbón, petróleo y gas, al igual que las geotérmicas, generan radiaciones. En todos los casos se traslada material radiactivo de la corteza terrestre a la superficie. **La Agencia de Protección del Medioambiente (EPA) de los Estados Unidos estima que alguien que vive en un radio de 50 millas (unos 80 Km) alrededor de una central de carbón recibe una dosis media de 0,3 μ Sv, mientras el nivel de radiación para alguien que vive a la misma distancia de una central nucleoelectrica es de 0,09 μ Sv.** Ambas cifras son más de mil veces menores que la dosis media que reciben en los Estados Unidos las personas expuestas a rayos X y a otros procedimientos médicos, y

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

más de diez mil veces menores que la dosis media que reciben por la radiación natural de fondo¹⁵.

Por otro lado, el desarrollo alcanzado en los más de 50 años de operación de las centrales nucleares y en las aplicaciones no energéticas de la energía nuclear permite garantizar una alta gestión en el tratamiento de los desechos de baja y media actividad y constituye actualmente una actividad cotidiana y en constante perfeccionamiento.

Hay un amplio consenso entre las organizaciones científicas mundiales que se encargan del estudio del almacenamiento final de estos desechos, de que la disposición de los mismos en capas geológicas es un método aceptable y seguro para el asilamiento permanente de estos desechos del medioambiente. Esto almacenes, conocidos como Repositorios, actualmente se encuentran en construcción en Estados Unidos, Francia, Finlandia y Suecia y es probable que alguno de ellos logre tener uno en funcionamiento antes del 2020.

Cualquier país que inicie un programa nucleoelectrico tiene tiempo suficiente para poder definir la posición que tomara con relación al combustible nuclear gastado, aunque hay algunos suministradores del combustible, por ejemplo Rusia, que puede incorporar en el contrato de suministro la reexportación del combustible nuclear gastado, almacenarlo, reprocesarlo y almacenar los desechos finales de este proceso.

Por otro lado, con la construcción de las centrales nucleares, las zonas de influencia se reaniman demográficamente, mejorando notablemente las comunicaciones por carretera. Los trabajos de construcción, montaje y puesta en marcha suponen la creación de alrededor de 5.000 - 7.000 puestos de trabajo directos y muchos indirectos en el sector servicios (transportes, construcción, etc.) durante varios años. De acuerdo con la experiencia internacional las municipalidades de las zonas cercanas a la central ven aumentados sus ingresos y la posibilidad de utilizar materiales y equipos de construcción propiedad de la central para renovar infraestructuras, pavimentar calles, construir polideportivos, restaurar monumentos locales, etc.

En la operación de una central nuclear se dispone de un personal fijo, bien sea de plantilla o de empresas contratistas cuyo número total estará en dependencia de la potencia instalada y el número de bloques. A esto se le debe adicionar el personal que se contrata para la parada de recarga que las centrales efectúan cada 12, 18 o 24 meses y que tiene una duración media aproximada de 25 días.

Un impacto social amplio también lo tiene los recursos humanos necesarios para el desarrollo de un programa de este tipo ya que la calificación de los mismos en instituciones de la enseñanza permitirá por un lado elevar el nivel científico técnico del país tanto del personal como el de las propias instituciones. Asimismo contribuirá al establecimiento de un régimen de trabajo en cualquiera de sus fases con altas exigencias para cada puesto de trabajo

¹⁵ Energía Nucleoelectrica y Desarrollo Sostenible, OIEA, Austria, Febrero 2008

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

alcanzándose alta disciplina laboral que puede ser transferida al resto de las industrias y servicios del país.

No obstante todo lo señalado, la oposición a la energía nuclear sigue siendo fuerte en algunos países, aun cuando parece detectarse cierta disminución al respecto y, al mismo tiempo, más preocupación por ciertos efectos negativos derivados de los combustibles fósiles y de los recursos renovables. En este aspecto ***es recomendable una política responsable enfocada a elaborar y dar a conocer toda la información disponible en torno a la opción nuclear, pero no planteada en forma de confrontación, sino de esclarecimiento para la opinión pública.***

En este sentido, hay que tener en cuenta que desde sus inicios, la industria nuclear ha sido desarrollada a partir de decisiones estratégicas por parte de los gobiernos como una cuestión de Estado en la que factores como los geopolíticos y económicos han tenido prioridad por sobre la opinión ciudadana. Y es comprensible que así haya sido, tomando en cuenta su complejidad y el alto grado de especialización técnica y científica relacionada, así como el contexto histórico que se vivía en esa época.

No obstante, en la actualidad esto ya no solo es imposible, sino que además resulta inaceptable dada la consolidación de los derechos civiles como elemento fundamental para el desarrollo social y el consenso internacional sobre los valores democráticos que imponen informar oportuna y extensamente a la ciudadanía sobre temas que afectan directamente a su calidad de vida. Por eso, para iniciar hoy un plan de desarrollo nuclear, una de las tareas importante a considerar es educar a la población en todos los aspectos de manera que permita que las personas puedan formarse una opinión propia, libre de prejuicios fundados en el desconocimiento o la publicidad adversa proveniente de otros sectores.

La oposición pública existente, se basa en gran parte en un factor subjetivo que predomina y refleja el desconocimiento de esta tecnología, sus beneficios y las compensaciones sociales que puede aportar.

Los medios masivos de comunicación también juegan un papel importante en esta percepción que tiene la población sobre la energía nuclear. Por ello, es necesario que ***quienes reportan sobre estos temas deban tener un nivel de conocimiento sobre el mismo que les permita abordarlo desde un ámbito más responsable y menos noticioso*** tomando así una posición de imparcialidad que ***permite un análisis equilibrado de la información que se brinda.***

Por último, con el objetivo de contribuir a brindar información correcta y entendible por la población, las centrales nucleares poseen centros de información ubicados directamente en sus áreas. En ellos existe información sobre la central que están visitando y a través de maquetas o esquemas computacionales se les explica a los visitantes, población y centros de enseñanza, todo lo relacionado con la generación de la nucleoelectricidad y se establece de

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

esta forma un intercambio directo entre los operadores de estas centrales y la población cercana. Evidentemente este tipo de centro ha contribuido y seguirá contribuyendo a mejorar la percepción social que se tiene de esta actividad.

3.1.6. Impacto económico

3.1.6.1. Ventajas económicas de la generación nucleoelectrica; Error! Marcador no definido.

La utilización de la energía nuclear ha supuesto una ampliación de la oferta de energía disponible desde su utilización comercial a mediados del siglo pasado.

El costo del KW instalado y el de generación de 1 KWh son dos indicadores ampliamente utilizados en la comparación de las fuentes y tecnologías para generar electricidad. Existe una amplia dispersión de estos valores que parte de los supuestos que se realizan en los cálculos y que vienen expresados por:

- La potencia instalada del bloque energético
- El periodo de vida útil de la central
- Horas anuales de utilización de la potencia instalada (factor de planta)
- La inversión total y costo del financiamiento (tasa de descuento anual)
- Tiempo que dura la construcción, el montaje y el ajuste y puesta en marcha.

Las centrales nucleares se caracterizan por ser intensivas en capital de manera que la inversión inicial supone aproximadamente dos terceras partes de los costos de generación, el combustible supone el 15% y la operación y mantenimiento el 20% restante. Esta estructura de costos da una gran estabilidad a los mismos, al no depender de manera importante de los precios de las materias primas (la materia prima uranio supone un 3%).

Como se puede apreciar en los datos que se recogen en la Tabla Resumen de Impactos Económicos, la dispersión de estos indicadores radica en lo fundamental en los supuestos que se han tomado para la realización del cálculo. Los resultados presentados sobre este tema permiten concluir:

- Con excepción de la energía eléctrica generada con gas, ***el costo unitario de la potencia instalada para una central nuclear es competitivo*** en relación con el resto de las fuentes analizadas.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Nucleo Eléctrica”

- Para el caso de la energía nuclear, *una parte importante del costo unitario de generación eléctrica lo constituye el costo fijo atribuido al monto de la inversión.* De aquí que las incertidumbres y riesgos respecto al costo estarían concentradas en el proceso de construcción.

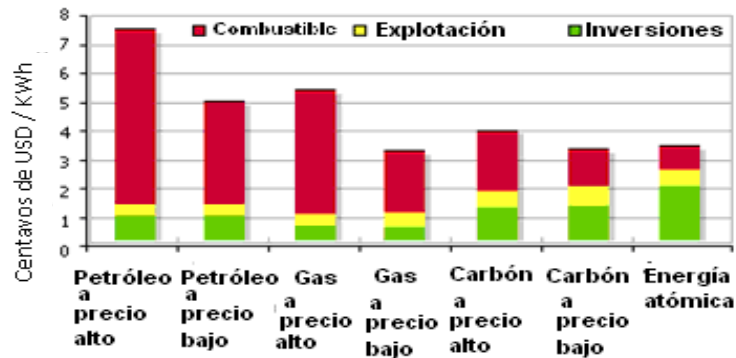


Figura 3.12 - Costos unitarios de generación para diferentes tipos de centrales eléctricas.

- Costos unitarios

- *El aporte del precio del combustible en el costo unitario de generación eléctrica en el caso de la energía nuclear es pequeño en comparación con el resto de las tecnologías analizadas. Además la sensibilidad a las variaciones del precio del combustible es pequeña en comparación con el resto.* De esta forma contribuye a la estabilidad de los precios de la energía *convirtiéndose en una barrera contra las fluctuaciones* de los precios de los combustibles fósiles, *ayudando a mantener de esta forma una estabilidad a largo plazo del precio de la electricidad.*

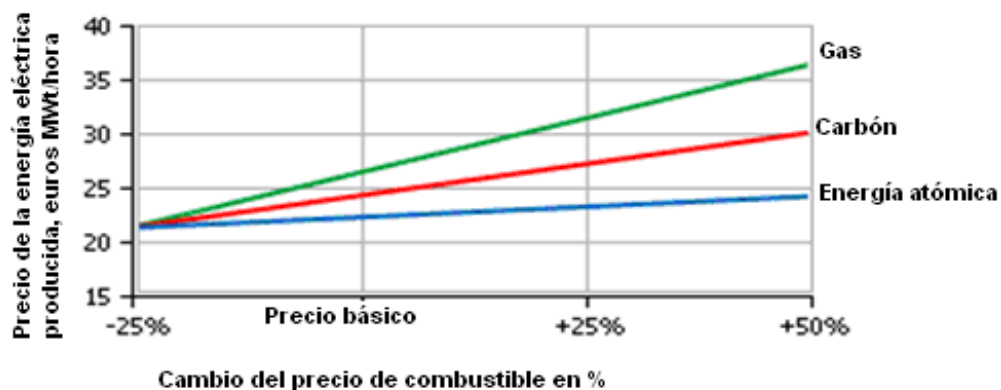


Figura 3.13 - Sensibilidad del costo unitario de generación a las variaciones del precio del combustible utilizado.

- *El costo de la gestión de confinamiento, almacenamiento y disposición final de los desechos radioactivos están internalizados y constituyen parte de las obligaciones de la entidad explotadora de la central nuclear.* Estos costos

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

internalizados incluyen los costos de gestión de desechos radioactivos, disposición final en repositorios a largo plazo y el desmantelamiento de la central al final de su vida.

En estas condiciones, y con periodos largos de operación, el kilovatiohora de origen nuclear es totalmente competitivo con el de otras fuentes.

3.1.6.2. Inversiones de capital

Para establecer un patrón de la inversión requerida para construir nuevas unidades de una central nuclear es necesario contar con información histórica que lamentablemente es muy escasa, debido principalmente a que en los últimos diez años han sido puestas en marcha pocas centrales nucleares, lo que hace que la información sea limitada y a veces contradictoria.

Cabe destacar que al momento de evaluar las inversiones específicas de capital, provenientes de diferentes fuentes, éstas se diferencian mucho entre sí. Lo complicado de este análisis es que en muchos casos esta información es confidencial, luego no se tiene acceso a ella, por lo tanto no se cuenta con una fuente para el análisis. Por otra parte, existen algunas fuentes de información abiertas en donde se puede realizar un análisis comparativo de los resultados de las investigaciones al respecto, que contienen datos de análisis de costos de la producción de la energía eléctrica con tecnologías diferentes. Un resumen de esto se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Comparación de precio de la construcción de nuevas potencias de generación (Fuente: *Projected Costs of Generating Electricity, Update 2005; Nuclear Energy Agency, International Energy Agency and OECD, 2005*).

	Instituto de Tecnología de Massachusetts	de de y de Ministerio Economía, Industria y Finanzas	TARJANNE LUOSTRAINEN (Finlandia)	Academia Real de Ingenieros, Inglaterra	de Universidad Chicago	Asociación Nuclear Canadiense
Divisa	\$	€	€	£	\$	Can\$
Inversiones de capital por KW						
Nuclear	2000	1280	1900	1150	1500	2347
Centrales de gas	500	523	600	300	590	711

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

	Instituto de Tecnológico Massachusetts	Ministerio de Economía, Industria y Finanzas	TARJANNE & LUOSTRAINEN (Finlandia)	Academia Real de Ingenieros, Inglaterra	Universidad de Chicago	Asociación Nuclear Canadiense
Centrales de carbón	1300	1281	860	820	1189	1600
Plazos de construcción (años)						
Nuclear	5	5	5	5	5	5
Centrales de gas	2	2	2	2	2	2
Centrales de carbón	4	4	4	4	4	4
Tasa de descuento (%)						
Nuclear	11,5	8	5	7,5	12,5	8
Centrales de gas	9,6	8	5	7,5	9,5	8
Centrales de carbón	9,6	8	5	7,5	9,5	8
Precio del gas	3,50/MBTU	3,30/MBTU	3,00/GJ	2,18/GJ	3,39/MBTU	6,47/Mcf
	Instituto de Tecnológico Massachusetts	Ministerio de Economía, Industria y Finanzas	TARJANNE & LUOSTRAINEN (Finlandia)	Academia Real de Ingenieros, Inglaterra	Universidad de Chicago	Asociación Nuclear Canadiense
Precio de la energía eléctrica por MW/hora						
Nuclear	67	28	24	23	51	53
Centrales de gas	38	35	32	22	33	72
Centrales de carbón	42	34	28	25	35	48

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

	Instituto de Tecnológico Massachusetts	de de Ministerio Economía, Industria y Finanzas	TARJANNE & LUOSTRAINEN (Finlandia)	Academia Real de Ingenieros, Inglaterra	de de Universidad Chicago	Asociación Nuclear Canadiense
Costo de la energía eléctrica v/s el precio de la energía de la Central Nuclear, en %						
Nuclear	100	100	100	100	100	100
Centrales de gas	57	125	133	96	65	136
Centrales de carbón	63	121	117	109	69	89

MBTU - miles de unidades térmicas británicas;

Mcf - miles de pies cúbicos

Las principales causas que originan las discrepancias en las evaluaciones tienen explicaciones objetivas, de acuerdo a lo siguiente:

- Al usar diferentes tecnologías de reactores, se originan diferentes evaluaciones de los costos de producción para los diferentes componentes de los equipos y tecnologías.
- A menudo, al calcular el precio, no se toman en consideración los gastos relacionados con la realización del primer proyecto de serie (FOAKE), que puede alcanzar a un 30-50% del precio declarado del proyecto.
- Los montos registrados de las inversiones de capital no contienen los gastos indirectos (por ejemplo, el mantenimiento técnico, algunos materiales y equipos, mano de obra complementaria, entre otros) que si debieran estarlo.
- Es frecuente, y argumentando el monto final del proyecto, que los investigadores de los diferentes proyectos se basan en diferentes parámetros con diferentes valores, para establecer la tasa de descuento.
- Al calcular el precio de la energía eléctrica que va a producir la central se pueden considerar diferentes años de servicio (vida útil) de la central nuclear, cifra que puede fluctuar ente 40-60 años.
- Los investigadores de cada proyecto utilizan diferentes supuestos para calcular el costo del desmantelamiento de la planta, el que fluctúa alrededor de un 5%; que

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Nucleo Eléctrica”

obviamente depende de la duración de la prestación de servicio y del volumen de trabajos para el desmantelamiento que conlleva el proyecto.

- Finalmente, ya que el nivel de vida es diferente para cada país, al evaluar los costos del personal se utilizan diferentes cifras iniciales.

A pesar de la divergencia bastante amplia de los resultados mencionados en la investigación, su análisis comparativo permite llegar a la conclusión de que la energía nuclear es competitiva en comparación con otras tecnologías energéticas a una tasa de descuento del 8% y menos y, con una inversión de capital de 1800 USD\$/KWh. Los datos informados por los productores y los resultados de la realización de los actuales proyectos de construcción en Rusia, China e India, permiten considerar estas cifras como reales.

3.1.6.3. Costos de la gestión de desechos

La Unión Internacional de Productores y Distribuidores de Energía Eléctrica (UNIPED por sus siglas en inglés), realizó en 1991 un estudio con el objetivo de estimar el costo total de la gestión de los desechos radioactivos (incluye los originados durante la operación y los desechos del desmantelamiento, así como el combustible gastado o el reprocesamiento de los desechos). El resultado del estudio permitió fijar este costo aproximadamente entre 2,5-11% del costo total de la generación eléctrica¹⁶.

El OIEA también ha realizado estudios de este tipo tanto para las centrales nucleares como para las centrales termoeléctricas de combustibles fósiles y sus ciclos de combustible, obteniendo resultados similares¹⁷:

Como se aprecia de la tabla 3.4, hay una amplia variabilidad en estos costos donde se puede apreciar que las plantas a carbón tienen un elevado costo de gestión de desechos en comparación con la de gas (ciclo combinado) mientras que el costo de la de gas es del mismo orden de magnitud que la nuclear. Asimismo, se puede apreciar que no hay diferencia de costos en la nuclear con o sin reprocesamiento del combustible gastado.

Tabla 3.4 - Costos nivelados de la gestión de desechos para diferentes tipos de centrales de generación eléctrica.

Tipo Central	Costo gestión de desechos
--------------	---------------------------

¹⁶ International Union of Producers and Distributors of Electrical Energy, Western European Nuclear Power Waste Management: A Note on its Actual Costs, UNIPED, Paris, 1991.

¹⁷ Choosing the Nuclear Power Options: Factors to be Considered, STI/PUB/1050, IAEA, Austria, January 2008.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

	[¢/KWh]
Nuclear con reprocesamiento	4
Nuclear con ciclo abierto	≈ 4
Carbón	18
Gas ciclo combinado	≈4

Una estructura de estos costos se presenta en la figura 3.14.

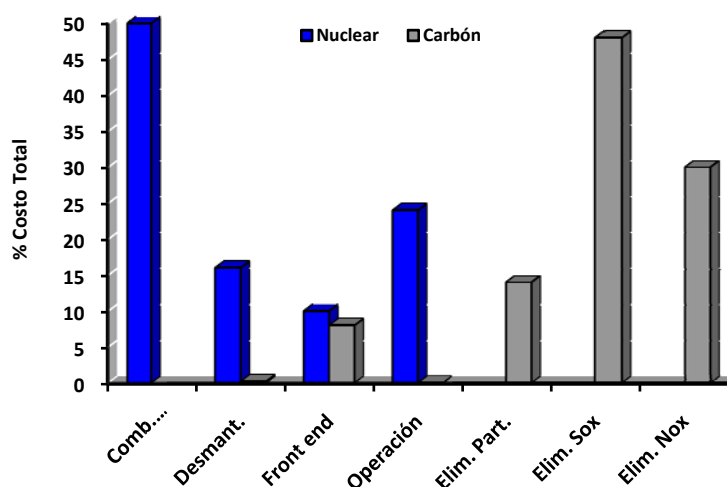


Figura 3.14 - Estructura del costo de la gestión de desechos para una central nuclear y una de carbón.

En diferentes países está establecido que todos los costos futuros originados por el desmantelamiento y el almacenamiento definitivo de todos los desechos, incluyendo los de alta actividad, **son sufragados por el propietario de la central a través de los ingresos durante la operación comercial de la central.**

3.1.6.4 Costos de desmantelamiento

En un proyecto de construcción de una central nuclear los costos de desmantelamiento son esenciales porque incluyen todas las operaciones relacionadas con el desarme de la planta, las instalaciones y en particular el desmontaje del reactor nuclear. Estos costos alcanzan en promedio entre un 10% y 15% del monto de la inversión inicial, pero después de efectuado los

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

ajustes por el plazo (60 años) el costo real es del orden de un 5%. La tabla 3.5¹⁸ ofrece una comparación de estos costos entre los diversos países que cuentan con tecnología nuclear.

Tabla 3.5 - Costos de desmantelamiento de las centrales nucleares en diferentes países.

País	Tipo de reactor	Potencia [MW]	Variante 1		Variante 2	
			Costo [millones USD\$]	Costo específico [USD\$/KW]	Costo [millones USD\$]	Costo específico [USD\$/KW]
Bélgica	PWR	900-1390	736-394	271-438	464	516
Finlandia	VVER, BWR	735-	178-222	171-178	101-266	137-205
Francia	PWR	1400	492	351	--	--
Alemania	PWR, BWR	70-1300	320-628	266-5029	301-622	239-1414
Suecia	PWR, BWR	465-1300	127-322	167-269	--	--
Gran Bretaña	GCR, PWR	60-1400	517	488	229-694	997-3817
EEUU	PWR, BWR	849-1300	145-228	112-236	164-280	140-216
Eslovaquia	VVER, GCR	440	52-181	118-421	151-187	351-435
Canadá	PHWR	542-1300	68-185	125-196	55-228	101-380
Japón	PWR, HWR, BWR	1100-1350	349	259	326-339	281-308
Rusia	VVER, RBMK, BN	440-1000	--	--	255-545	230-545
Media				475		645

El financiamiento de estas actividades es una responsabilidad directa del operador de la central y se acumula durante todo el tiempo de operación de la central nuclear.

Algunos países tienen experiencia técnica en el desmantelamiento de centrales nucleares ya que alrededor de 10-15 centrales nucleares han sido desmanteladas y sus emplazamientos han sido restaurados para ser reutilizados. La mayoría de ellas, fueron de los primeros diseños construidos y de una potencia pequeña. La experiencia alcanzada con estos trabajos es

¹⁸ V. M. Konanenko, Métodos y modelos de la evaluación de los proyectos de inversión de la modernización de los objetos de la energética atómica, Autoreferat de la Tesis a Candidato a Dr. Ciencias Económicas, RGB, 2005.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

especialmente relevante para el desmantelamiento futuro de las plantas que actualmente están en operación.

3.1.6.4. Otros aspectos económicos

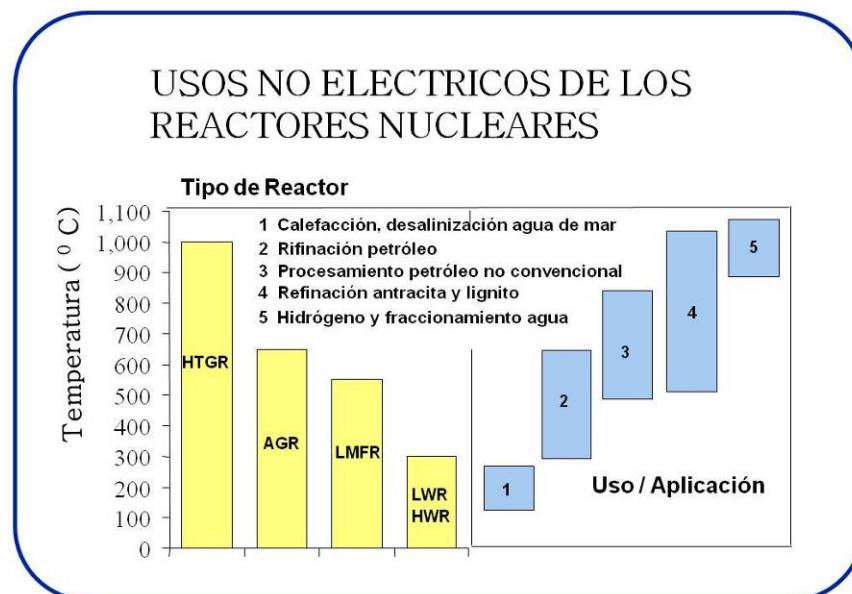
3.1.6.4.1. Recursos humanos e influencia en el resto del país; Error! Marcador no definido.

Además de estos aspectos, como se señaló con anterioridad, una central nuclear es una industria que genera centenares de empleos y su contribución en impuesto es importante. Este hecho también tiene un impacto económico a tener en cuenta.

Por otro lado, los procesos tecnológicos asociados a esta industria impactan, como se había señalado, en el ámbito de los conocimientos y se difunden en toda la estructura productiva al elevar el nivel de eficiencia global de la sociedad. Dado el carácter de tecnología punta de la energía nuclear, los conocimientos, avances e I+D en campos como materiales especiales, nuevos equipos, nuevos métodos y técnicas, etc. se convierten en patrimonio del conjunto del país y se aplican, como así viene ocurriendo, en otras áreas de la industria.

3.1.6.4.2. Usos no eléctricos de los reactores nucleares

En los últimos años se ha incrementado la utilización de la energía de las centrales nucleares con fines no eléctricos. Esto se debe especialmente a dos características fundamentales: el extremado alto contenido de energía del combustible nuclear y el amplio rango de temperaturas de trabajo de los reactores nucleares (200 - 1000 °C).



Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Nucleo Eléctrica”

Figura 3.15 - *Otros usos no eléctricos de los reactores nucleares*¹⁹²⁰.

Estos dos factores ofrecen varias opciones para resolver restricciones que se tienen de recursos que van desde el suministro de agua potable hasta la extracción de petróleo líquido o sólido, así como suministrar un nuevo combustible para el transporte. Entre estas aplicaciones se encuentran la desalinización del agua de mar, la extracción de petróleo de fuentes no convencionales, la producción de hidrogeno para el transporte. En la figura se recogen estas aplicaciones y las características de los reactores nucleares que pueden ser usados con estos fines. Todas estas aplicaciones tendrán en su momento un impacto económico con su utilización. También son conocidas y más ampliamente utilizadas las aplicaciones no eléctricas de las otras fuentes tradicionales de generación eléctrica como lo es en el transporte (petróleo, gas y carbón), procesos industriales (carbón, gas, petróleo), calefacción (fósiles y solar) etc.

Otra aplicación de la energía nuclear es la utilización de fuentes radioisotópicas como fuentes de energía en el espacio desde 1965 y fuentes de fisión han sido utilizadas por la Federación de Rusia y en la actualidad se diseñan nuevas tecnologías por los Estados Unidos y Rusia. Después de un vacío de varios años, hay un interés creciente en el uso de la energía de la fisión para las misiones espaciales. Mientras que Rusia ha utiliza más de 30 reactores de fisión en misiones espaciales, los Estados Unidos solo han utilizado uno en 1965 (SNAP-System for Nuclear Auxiliary Power: Sistema Auxiliar de Energía Nuclear).²¹

4. Riesgos asociados a las diferentes fuentes de energía

4.1. Consideraciones generales

El desarrollo industrial y en un sentido más amplio, el progreso que eleva constantemente los valores materiales y morales de la sociedad, se han convertido paradójicamente a su vez en una fuente principal de riesgo. Es un hecho reconocido, que ninguna fuente de energía es completamente inocua para el hombre y el medioambiente. En términos técnicos, el nivel cero de riesgo es posible únicamente en sistemas en los cuales no se almacene energía ni ningún componente químico o biológicamente activo, de aquí que el empleo cada vez más intensivo de energía, a nivel mundial, implica necesariamente un determinado nivel de inseguridad.

¹⁹ Nuclear Energy Applications beyond the Power Sector, Climate change and nuclear power plant 2008, IAEA.

²⁰ Market Potential for Non-electric Applications of Nuclear Energy, Technical Reports Series No. 410, IAEA, Vienna, 2002.

²¹ Nuclear Reactors for the Space en <http://www.world-nuclear.org/info/inf82.html>.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

Ante la imposibilidad de vivir en un mundo absolutamente seguro, tanto los individuos como la sociedad aceptan determinados riesgos e incluso, llegan a olvidarse de su existencia cuando son lo suficientemente pequeños y se está normalmente acostumbrados a ellos.

Además de los riesgos relacionados con la salud, existen otros muchos aspectos importantes, tales como su repercusión social, las ventajas económicas, el impacto en el medioambiente y los daños físicos, que deben tenerse en cuenta a la hora de decidir una actividad frente a otra.

La generación de electricidad produce el 27% de las emisiones de CO₂ y es una de las fuentes más importantes de gases efecto invernadero. Se ha hecho evidente que no pueden existir fuentes de energía ambientalmente puras. El uso de cada tecnología se acompaña, inevitablemente, de la contaminación térmica del medioambiente, la polución atmosférica con las sustancias tóxicas y CO₂, la intervención del paisaje, entre otros. La experiencia ha demostrado que estas consecuencias negativas tienen lugar cuando los argumentos tecnológicos y económicos priman sobre las exigencias sanitarias, higiénicas y ecológicas.

La contaminación del medioambiente y la aparición de riesgos que acompañan el desarrollo industrial moderno constituyen actualmente una preocupación prioritaria para todo nuevo proyecto o desarrollo industrial. No solo se evalúan las ventajas económicas que estos proyectos pudieran generar sino que también se realiza una evaluación más amplia donde se incluye el impacto que implica su implementación, así como los riesgos y las consecuencias negativas que podrían surgir con la ejecución del proyecto. Por eso determinar los “niveles aceptables” representa un problema muy difícil, tanto económico, político y social, como tecnológico, ya que ***de no aceptarse riesgos se limita el desarrollo.***

En la metodología riesgo-utilidad existen muchos elementos indeterminados. Por eso se usa el enfoque equilibrado de solución de las tareas científicas, legislativas, sociales y jurídicas, el cual ha mostrado funcionar de manera positiva en la práctica.

En opinión del Consultor, el criterio más acertado para definir es el de **tolerancia del riesgo**:

- Los niveles de riesgo aportados con la introducción de una nueva tecnología pueden considerarse socialmente aceptables si uno de los efectos finales útiles de su uso, es la reducción de tal impacto y del riesgo total al que se somete la población.
- Si resulta que lo aportado por la nueva tecnología no se compensa por la disminución adicional de sus riesgos y, por el contrario, estos en total aumentan, es razonable considerarlos como socialmente inaceptables y se deben introducir medidas adicionales de seguridad o bien rechazar por completo la aplicación de tal nueva tecnología.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

En cuanto al nivel admisible de riesgo de cualquier actividad, varias organizaciones internacionales y nacionales proponen aceptar el valor de $1 \cdot 10^{-6}$ (un caso por 1.000.000) al año, lo cual corresponde al riesgo de pérdida por causa de siniestros (ver tabla 4.1).

Tabla 4.1 - Clasificación de riesgo de las actividades profesionales.

Categoría	Condiciones de actividad	Rango de riesgo de muerte personas por año
I	Seguro	$<1 \cdot 10^{-4}$
II	Relativamente peligroso	de $1 \cdot 10^{-4}$ a $1 \cdot 10^{-3}$
III	Peligroso	de $1 \cdot 10^{-3}$ a $1 \cdot 10^{-2}$
IV	Especialmente peligroso	$>1 \cdot 10^{-2}$

Esta clasificación en cierto modo es condicional, pero permite comparar las circunstancias de la actividad profesional en distintas industrias, especialmente en las nuevas ramas productivas y sobre esta base juzgar el riesgo. Conforme al concepto de riesgo admisible, si el valor es superior al rango aceptable, dicho riesgo ha de ser reducido. En caso contrario tal actividad debe ser prohibida.

La comparación entre el valor recomendado de riesgo admisible $1 \cdot 10^{-6}$ por año y el valor de riesgo que reviste la presencia y funcionamiento de la central nuclear, que representa $0,2 \cdot 10^{-6}$ por año (cinco veces menor que el valor aceptado) se ajusta holgadamente a estas exigencias de seguridad. Este riesgo es tan bajo porque la probabilidad de producirse un accidente es muy pequeña, producto de los altos niveles de seguridad garantizados en el diseño de las centrales nucleares. Desde 1945 a la fecha en todo el mundo solo han ocurrido dos accidentes en centrales nucleares que han provocado emisión de sustancias radioactivas al medioambiente: los accidentes de Three Mile Island (Estados Unidos, 1979) y Chernobyl (Ucrania, 1986)

En la tabla 4.2²² se presenta el riesgo medio anual de muerte debido a eventos naturales, hábitos humanos y accidentes antropogénicos. Con base a estos resultados si se sigue la lógica, *el público debería renunciar entonces a viajar en el transporte público, ir a un partido de fútbol, practicar alpinismo, etc. pero en realidad tales decisiones no ocurren. En este caso el riesgo se acepta y forma parte de la actividad cotidiana.*

²² Journal of the American Medical Association 244, II: 1126-112 y Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

Tabla 4.2 - Riesgo medio anual de muerte debido a eventos naturales, hábitos humanos y accidentes antropogénicos.

Causa	Probabilidad de muerte
Fumar 20 cigarrillos diarios	1/200
Gripe	1/5.000
Viajar en transporte público	1/10.000
Concurrir a un estadio de fútbol	1/25.000
Practicar alpinismo	1/25.000
Tomar píldora anticonceptiva	1/50.000
Terremoto (California)	1/600.000
Central Nuclear	1/10.000.000
Repositorio de desechos radioactivos de alta actividad	1/100.000.000.000.000

Las sustancias contaminantes del medioambiente por sí mismas influyen con frecuencia negativamente en el fomento de la industria, siendo esas mismas materias resultado o derivados de ésta. Por eso, al evaluar la correlación entre utilidad y daño es necesario también tener en cuenta este aspecto del Impacto ambiental de los contaminantes. Desafortunadamente no existe hoy un parámetro internacional de “impacto aceptable”, ya que depende de la legislación de cada país.

No obstante, en lo que a emisión de gases de efecto invernadero se refiere, para los países que suscribieron y ratificaron el protocolo de Kyoto quedó establecida la meta de reducirlas en un 5% entre 2008 y 2012, tomando como punto de partida los índices de 1990. De esta forma se ha señalado de manera implícita que el nivel aceptable de polución es cero o debería ser cero. Lo cierto es que desde la firma de este convenio las emisiones han seguido aumentando progresivamente en decenas de países, incluido Chile, llegando a un punto más alto jamás registrado en 2005. A pesar de eso, la Organización de Naciones Unidas publicó posteriormente estimaciones según las cuales los signatarios del Protocolo cumplirán, en conjunto, la meta trazada hasta el 2012. Este contrasentido se explica por el hecho de que los países signatarios completaron el 63,7% de las emisiones recién en 2005, luego de la ratificación de Canadá y Rusia, que produce un 17,4% de las emisiones; y principalmente a la

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

ausencia de Estados Unidos, el principal emisor del mundo con 25% del total, que no obstante ha puesto en marcha una política nacional con criterios propios de reducción de emisiones.

Es de suponer, que en la segunda reunión del Protocolo, a realizarse en Copenhague en 2012, se establecerán acuerdos más rígidos que constituyan un estándar internacional en esta materia.

4.2. Análisis de los riesgos asociados a las diferentes fuentes de energía

4.2.1. Riesgos relacionados con las fuentes de energías renovables²³

Una central hidroeléctrica trae consigo una serie de transformaciones que modifican el curso de las aguas de los ríos. Estas transformaciones bien empleadas pueden utilizarse para el control de inundaciones, riegos, suministro de agua potable y para instalaciones industriales. Sin embargo, el riesgo más importante de esta forma de generar energía se concentran en los accidentes catastróficos derivados del hundimiento de presas o embalses. En su fase constructiva los accidentes que puedan ocurrir afectan principalmente a los trabajadores. En la operación de la central los riesgos son de tipo catastrófico, por rotura del muro de contención de la central o por pérdida del asentamiento del mismo, tras un posible desplazamiento del mismo. En este caso se pone en libertad un gran volumen de agua, el cual puede producir daños catastróficos a la población cercana.

En el caso de las solares térmicas, se utilizan heliostatos o espejos, los riesgos los producen la luz reflejada en los espejos (pueden producir ceguera) y los fluidos con los que se trabaja, como sales de sodio, que en general son productos tóxicos. En el caso de las fotovoltaicas, el riesgo se produce en las fábricas donde se producen las fotoceldas ya que en este proceso hay riesgo de exposición a sustancias tóxicas y gases tóxicos y la toxicidad de ellos en caso de escape por accidente tiene también un riesgo a la salud pública.

Un parque eólico está formado por un gran número de unidades eólicas, de elevada altura, con paletas de los aerogeneradores de grandes dimensiones sometidas a fuerzas del viento muy intensas. Por ello, el riesgo principal radica en el desprendimiento de las paletas cuando las condiciones del viento superan los límites de diseño. Si estos parques están cercanos al punto de consumo aparece entonces un riesgo para la población.

Cada una de estas fuentes tiene a su vez diferentes impactos que fueron analizados con anterioridad y que se recogen también en la tabla resumen que se adjunta.

²³ Cuestiones sobre la energía, Foro de la Industria Nuclear Española, Enero 2007.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

4.2.2. Riesgos relacionados con las fuentes de energía fósiles²⁴

La utilización del carbón para la generación de electricidad tiene asociado los siguientes riesgos en las diferentes etapas de su ciclo de vida:

- En la minería produce un elevado riesgo de enfermedades respiratorias, además de enfermedades de tipo nervioso, por inhalación de polvo procedente del proceso de extracción.
- En la construcción de centrales no son superiores a los normales de otras actividades industriales. En ningún caso son catastróficos.

En la operación:

- Trabajadores: riesgo a la salud relacionado con enfermedades respiratorias por la existencia de polvo de carbón y posible pérdida de la capacidad auditiva por el ruido.
- A la población: están relacionados a las emisiones que se han señalado anteriormente provenientes de su combustión que ocasionan enfermedades respiratorias, toxicidad y cáncer.

En el caso de las centrales eléctricas a petróleo, los riesgos derivados de su extracción, transporte, el refinado y su empleo en la central son fundamentalmente: fuego en los yacimientos, emisión de gases orgánicos durante el refinamiento que producen riesgo de cáncer, daños elevados por fuego en las refinerías, así como durante su transporte. El riesgo para el público, está directamente vinculado con los productos de su combustión que tienen un importante aporte al efecto invernadero como se han señalado antes.

Para el caso de una central a gas, los riesgos para la salud son menores que para el carbón y el petróleo, por cuanto las emisiones de NO_x producen un gran riesgo de enfermedades respiratorias. Durante el almacenamiento y transporte del gas, como consecuencia de la presencia de gases licuados inflamables en la composición del gas natural, existe riesgo de fuego y explosión.

4.2.3. Riesgos relacionados con la energía nuclear

A diferencia de las formas convencionales de producir energía quemando combustible fósil, el impacto de una central nuclear y el riesgo que representa su instalación y operación, tanto para el medioambiente como para las personas, son mínimos. Esto se puede afirmar considerando que la técnica desarrollada para provocar la reacción nuclear se basa en la

²⁴ Cuestiones sobre la energía, Foro de la Industria Nuclear Española, Enero 2007.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

comprensión de las leyes naturales que la determinan y el manejo armónico de estas. Quemar combustible, sea este petróleo, gas o carbón, implica una intervención anómala en los procesos naturales de la tierra y de ahí sus efectos indeseados. Ese camino ha conducido a una crisis en que los recursos naturales están agotándose y el clima cambia producto de la elevación de la temperatura del planeta, causada por esta práctica. En cambio, la fisión nuclear consiste en reproducir bajo circunstancias controladas un fenómeno que se produce de manera natural y a cada instante en el universo, siendo incluso parte de la vida.

La alta complejidad que implica la ciencia nuclear se ha visto compensada con el veloz avance de la industria que pone en práctica sus principios, para aprovechar la ilimitada fuente de energía que produce la fisión del átomo. Lamentablemente, en sus albores, la ciencia nuclear se utilizó prioritariamente para fines bélicos y la humanidad comprendió con el horror de miles de víctimas inocentes que la energía atómica podía ser también algo muy malo.

Lo cierto es que la industria nuclear con fines pacíficos siguió también su propio camino, aprovechando el conocimiento y la experiencia tanto de aquellos episodios de violencia como de los descubrimientos que los hicieron posibles. Tampoco ha estado exenta de accidentes graves y lamentables, como lo fueron las fallas de las centrales Three Mile Island, en Estados Unidos, y Chernobyl, en Ucrania. Sin embargo, hay que destacar que ambos eventos fueron causados por errores humanos, relacionados con una operación negligente, más que a un repentino suceso inevitable relacionado con el reactor, el combustible o alguno de los sistemas diseñados para producir la reacción de fisión.

Al decir que el impacto y el riesgo indeseado de la energía nuclear son mínimos, en ninguna caso se desconoce que entraña un cierto peligro. Ciertamente, la estadística demuestra que sólo han ocurrido dos accidentes severos, mencionados con anterioridad, con consecuencias para el medioambiente y la población en comparación con cinco décadas de beneficio, al punto de que casi una quinta parte de la electricidad del mundo se produce en centrales nucleares.

Actualmente la ciencia y la tecnología desarrollada por la industria nuclear garantizan que este riesgo está bajo control. La existencia de una central nuclear, tanto para la población como para sus trabajadores que operan en las áreas directamente relacionadas con elementos altamente radioactivos, representa un nivel de riesgo significativamente inferior al de otras actividades. Este conocimiento técnico ha sido desarrollado en un contexto de colaboración internacional ejemplar, lo que también implica que actualmente exista un marco normativo y legal completo que garantizan excelentes niveles de bajo impacto y riesgo en el uso la energía nuclear.

Los sistemas de seguridad de las centrales nucleares modernas representan el máximo logro de la ciencia y la tecnología, proceso que va perfeccionándose día a día, incorporando constantemente nuevas mejoras a la industria. Esto implica por ejemplo, la capacidad de

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Nucleo Eléctrica”

hacer frente con éxito no solo a eventuales fallas de la central, sino también a eventos externos como la actividad sísmica o ataques terroristas.

A pesar de esto, es inexacto afirmar que el peligro de la energía nuclear ha sido suprimido por la ciencia. Pero resulta indudable que se trata de un campo que se ha desarrollado intensamente, precisamente por la necesidad de brindar una seguridad que reduzca el impacto y minimice el riesgo, lo cual ha dado origen no solo a avances tecnológicos significativos, sino también a una cultura de la seguridad total.

A diferencia de las tecnologías que se han analizado anteriormente, en el caso de las centrales nucleares el público conoce medianamente los beneficios que brinda la nucleoelectricidad y la valoración que realiza de sus riesgos está muy lejana a la realidad. Los riesgos en este tipo de instalación son:

- La ocurrencia de un accidente severo que pueden afectar a la integridad del recinto de contención del reactor nuclear y dar lugar a la emisión de productos de fisión al medioambiente.
- Los desechos radioactivos que se generan durante las diferentes etapas del ciclo de vida de este tipo de central.
- La proliferación de las armas nucleares, seguridad física de las instalaciones nucleares y el terrorismo.

4.2.3.1. Riesgo de un accidente nuclear severo; Error! Marcador no definido.

La percepción de riesgo que tiene la población sobre este tema está fundamentada marcada por los accidentes ocurridos en las centrales nucleares Three Mile Island y Chernobyl, unido a una inadecuada utilización de los medios de información para reflejar cualquier tipo de accidente o incidente de esta industria y la falta de una correcta y conveniente educación sobre el tema.

Se consideran accidentes severos a aquellos que pueden afectar a la integridad del recinto de contención del reactor nuclear y dar lugar a la emisión de productos de fisión al medioambiente. Pese a que la probabilidad de ocurrencia de este evento es muy baja: 10^{-6} (un accidente de este tipo en un millón de años); la industria nuclear, centros de investigación y otras instituciones vienen desarrollando esfuerzos de investigación e ingenieriles dirigidos a evitar y controlar estas situaciones.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”



Imagen 4.1 - Vista de la Central Nuclear Three Mile Island, Estados Unidos²⁵



Imagen 4.2 - Unidad 4 de la central nuclear de Chernobyl donde ocurrió el accidente. Se puede apreciar la estructura de hormigón denominada “sarcófago” diseñado para contener el material radioactivo del núcleo del reactor y para una duración de 30 años.

La seguridad nuclear es uno de elementos primordiales en el desarrollo de esta tecnología se basa en diseñar, construir y operar las centrales nucleares para lograr de forma segura la producción de energía eléctrica, sin que ello suponga un riesgo superior al tolerable para la población, el medioambiente y para los trabajadores de la central y que se encuentra debidamente regulado en las leyes, reglamentos y normas que constituyen la base del desarrollo de esta industria en cada uno de los países que desarrollan o desarrollarán la generación eléctrica de origen nuclear. Esto significa que:

²⁵ Dos reactores tipo PWR. El reactor de la unidad 1 (TMI-1 de 786 MW y el de la unidad 2 (TM-II), donde ocurrió el accidente de 900 MW.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

- En funcionamiento normal, las dosis recibidas por los trabajadores y el público en general, deben ser tan bajas como sea posible y, en todo caso, inferiores a los límites fijados por la reglamentación.
- En caso de ocurrencia de un accidente hipotético, las consecuencias deben ser muy bajas y, en todo caso, limitadas a valores aceptables para la población.

En las centrales nucleares todos los sistemas responden a la filosofía de la “seguridad total”. Este concepto supone el establecimiento de distintas barreras de protección que evitan que los productos radiactivos que existen y que se encuentran dentro del reactor lleguen al medioambiente. Las barreras de contención son tres (ver Figura 4.1), aunque algunos autores hablan de cuatro, ya que suponen que la pastilla en la que se aloja el combustible es la primera barrera efectiva.

En todo caso, se considera a las barras dentro de las que se encuentran las pastillas de combustibles como la primera barrera; la vasija del reactor en la que se aloja el núcleo con las barras de combustible y el circuito primario forma la segunda barrera; y el recinto de contención es la tercera barrera.

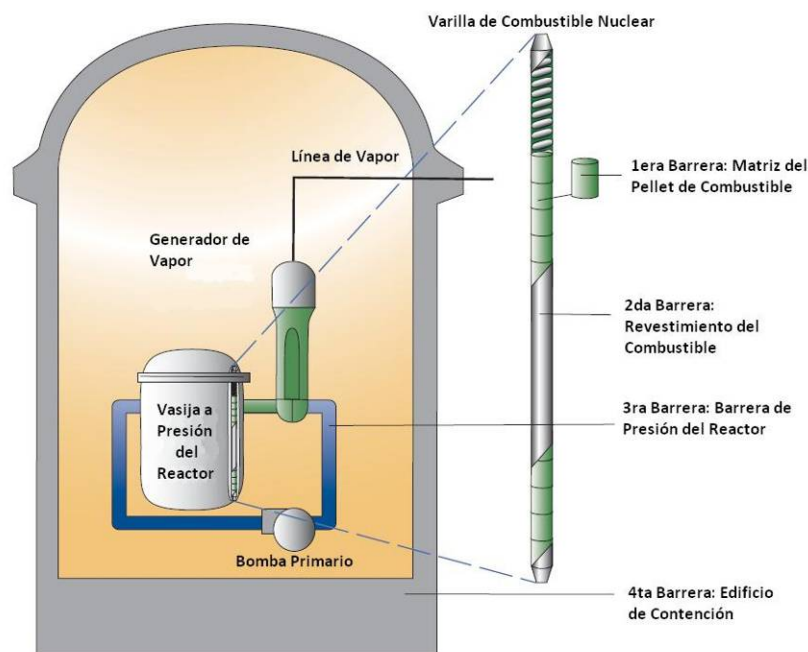


Figura 4.1 - Barreras de contención típicas para el confinamiento de los materiales radioactivos del primer circuito de una central nuclear²⁶.

²⁶ Figura tomada de: Nuclear Energy Today, Nuclear Energy Agency/OECD, Paris, 2005.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

La tercera barrera en realidad son muros de más de un metro de espesor de hormigón armado forrado por la cara interna con una capa de varios centímetros de acero. Este recinto de contención se construye de acuerdo a muy rigurosas prescripciones técnicas de manera de ser resistentes a terremotos, choque de un avión o atentados terroristas. La función de la contención es evitar que, en caso de un eventual accidente, la radiación salga al exterior.

Los niveles de seguridad generalmente más aceptados son cinco. El primero de ellos es una construcción sólida, de acuerdo a estrictas normas de construcción y a un riguroso control de calidad. Durante la construcción de este recinto, las pruebas de control de calidad son constantes y antes de la puesta en marcha de una central esta se inspeccionan en numerosas ocasiones para garantizar que fue construida de acuerdo al diseño original.

El segundo nivel de seguridad es el cumplimiento de rigurosos controles para mantener siempre a la central dentro de las condiciones normales de operación. El tercer nivel consiste en sistemas de seguridad capaces de hacer frente a los posibles accidentes e incidentes. El cuarto son aquellos métodos desarrollados para el control “tecnológico” de eventuales accidentes, incluidos accidentes con daños en el núcleo, si los hubiera. Y, por último, están todos aquellos planes de contingencia para hacer frente a las emergencias que puedan ocurrir. En la Figura 4.2 se muestra esquemáticamente todos los elementos considerados para garantizar la seguridad de una central nuclear (o cualquier instalación nuclear).

Los sistemas de seguridad de la central nuclear garantizan:

- que el material radioactivo esta siempre confinado,
- que el proceso de fisión de los núcleos de uranio presentes en la zona activa del reactor en todo momento pueda ser detenido de manera instantánea si persiste cualquier tipo de anomalía para concluir la generación menos la del calor residual y
- que el calor residual sea extraído después del apagado del reactor de manera de proteger las barreras de integridad contra las fugas de material radioactivo.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Nucleo Eléctrica”

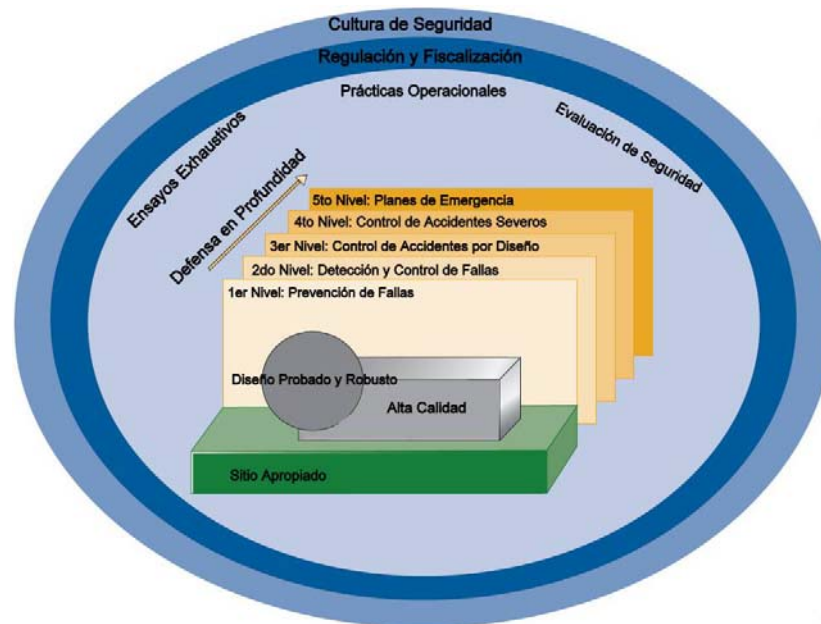


Figura 4.2 - Representación de los elementos considerados en la seguridad nuclear de una central nuclear²⁷.

En todo caso, cuando se hacen análisis de riesgos en las centrales nucleares se hacen pensando que puede ocurrir siempre lo más improbable. Por eso, todos los sistemas de seguridad son redundantes, es decir, que siempre hay varios sistemas capaces de hacer determinada tarea, de manera que cualquiera de ellos, si uno falla, permite funcionar con normalidad. Además, se utiliza el criterio de diversidad, es decir, dos métodos distintos para hacer una sola cosa.

Un ejemplo práctico de ello se puede apreciar el sistema de refrigeración de emergencia que tiene la central nuclear (ver Figura 4.3). Si falla el circuito primario de refrigeración, aunque se introduzcan las barras de control, el calor residual podría fundir el núcleo; entonces entra en funcionamiento el sistema de emergencia:

- Varios dispositivos de agua fría borada independientes.
- Bombas con grupos diesel independientes.
- En caso de que todo falle, el recinto de contención debe soportar la presión e impedir la salida al exterior de sustancias radioactivas (recuerde que Chernobyl no poseía este recinto).

²⁷ Figura tomada de: Nuclear Energy Today, Nuclear Energy Agency/OECD, Paris, 2005

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Nucleo Eléctrica”

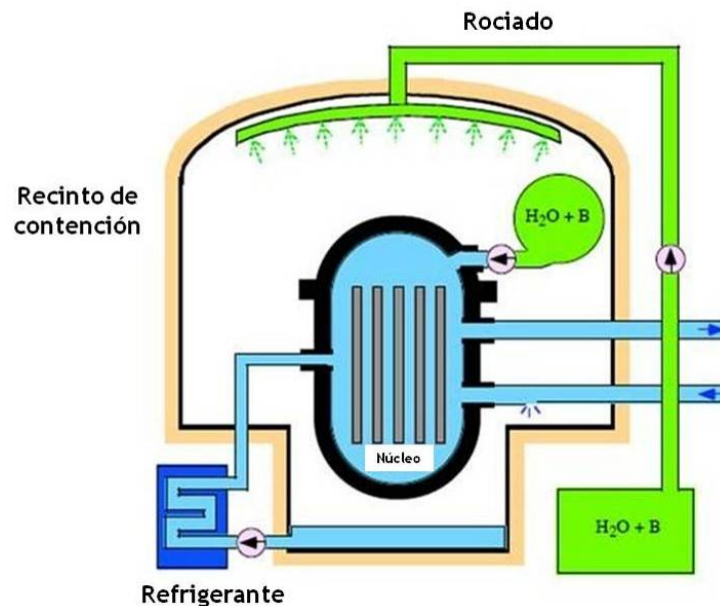


Figura 4.3. - Esquema del Sistema Refrigeración de Emergencia

La selección del emplazamiento, es un elemento importante de seguridad a considerar en un proyecto. El proceso de selección, como se verá más adelante, exige considerar condiciones de todo tipo, demográficas, climáticas, sísmicas, medios de comunicación, etc., antes de tomar una decisión. Una adecuada preparación y capacitación del personal asegura un control total sobre los sistemas operacionales del reactor y la central en su totalidad y desde una incidencia directa a la disminución de los errores humanos que pudiera provocar un accidente o incidente nuclear en estas instalaciones.



Figura 4.4 - Representación esquemática de las zonas consideradas dentro de los planes de emergencia nuclear de una central nuclear.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

Finalmente, la preparación de eventuales evacuaciones de la población ante situaciones límites, está normada y claramente establecida y coordinada con las organizaciones y autoridades locales y regionales como son la Autoridad Reguladora Nacional, Gobierno Civil, fuerzas del orden, organizaciones vecinales y de protección pública. Estos planes, llamados Planes de Emergencia, son preparados por la entidad explotadora de la central nuclear y los presenta a la Autoridad Reguladora Nuclear para su aprobación. En su confección se contemplan, como se puede apreciar en la figura 4.5 diferentes para cada una de las cuales existen las medidas correspondientes en caso de ocurrencia de un accidente o incidente durante la operación de la central.

Las Autoridades Reguladoras Nucleares en cada país, controlan que los riesgos asumidos estén siempre dentro de los límites tolerables. Para ello, el control se realiza a todo nivel de manera que se cumplan las medidas de seguridad normadas. Se puede afirmar sin temor a equivocarse que no hay ninguna otra industria en el mundo, quizá con la excepción de la aviación civil y la aeronáutica espacial, que esté sometida a los mismos controles de seguridad equivalentes a los que están sometidas las centrales nucleares. La comparación con la aviación civil es muy buena, pues tanto en la industria nuclear como en la aviación, el riesgo siempre existe, y si llegase a ocurrir un daño este es catastrófico. En la aviación por ejemplo, si hay un error en el momento de aterrizaje, pueden morir en segundos 300 - 400 personas; en un reactor, si ocurriera un accidente severo, el daño también es equivalente. Pero, existiendo ese riesgo en la aviación civil, todos los días despegan y aterrizan ciento de miles de aviones con pasajeros. ¿Porque lo hacen y siguen haciéndolo? Pues calculan los riesgos versus los beneficios del transporte rápido que otorga la aviación, y concluyen que el riesgo vale la pena correrlo. En la industria nuclear ocurre algo parecido, los riesgos versus los beneficios, considerando la estadística existente, los beneficios superan al riesgo.

La importancia del concepto “seguridad” en los reactores nucleares, mantiene en estos momentos su extraordinaria vigencia no solo por la pérdida de vidas humanas o el daño al medioambiente que puede evitar, sino también por la percepción psicológica de la población. Al igual que con los almacenes de combustible nuclear gastado, aquí hay dos enfoques. Uno es el típico de la energía nuclear actual que se apoya en las diferentes fundamentos probabilísticas y otro, que está cobrando importancia hoy día, es el de crear reactores que por su construcción, y los materiales utilizados, las propiedades físicas que tienen, se elimina la posibilidad de ocurrencia de accidentes severos. A estos reactores se les llama “reactores con seguridad intrínseca”.

4.2.3.2. Desechos radioactivos

Al igual que en el caso anterior, el riesgo aquí está asociado con un accidente que provoque el escape al medioambiente de radiaciones y sustancias radioactivas que pudieran dañar al medioambiente y la salud de las personas durante su manipulación, transportación o su almacenamiento definitivo.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Nucleo Eléctrica”

La disposición final de los desechos es un aspecto en el que la producción de energía nucleoelectrica está, por lo general, mejor situada que los otros tipos de generación. A diferencia de los desechos sólidos y tóxicos producidos por las otras cadenas de combustible, los desechos nucleares son de pequeño volumen, están bien confinados y son objeto de controles muy estrictos. En la mayoría de los países, el costo de contención, almacenamiento y disposición final de los desechos nucleares está incluido en el precio de la electricidad. Estos costos internalizados incluyen los costos de gestión de los desechos, disposición final en repositorios a largo plazo y clausura de la central al final de su vida útil.

Además es necesario señalar que para todo el proceso de gestión de los desechos radioactivos existen rigurosas normas y procedimientos regulan todas las actividades de manera que para que ocurran situaciones como las mencionadas. Por ello, la ocurrencia de cualquier accidente en estas actividades solo puede ocurrir cuando se incumplen las medidas de seguridad establecidas para el manejo de los desechos radioactivos y como en el caso de las centrales nucleares la probabilidad de ocurrencia es baja. Un análisis más detallado se presentó en el 3.1.4.1 de este resumen.

4.2.3.3. No proliferación y seguridad física

El proceso de enriquecimiento y la producción de plutonio en los reactores nucleares son los que provocan preocupación internacional, ya que pueden tener aplicaciones militares²⁸.

El principal instrumento internacional para garantizar la no proliferación es el Tratado de No Proliferación de las Armas Nucleares (TNP) de 1968 y ratificado por 187 estados que se complementan con diferentes tratados de carácter regional como es el caso del Tratado para la Proscripción de las Armas Nucleares en América Latina y el Caribe conocido como el “Tratado de Tlatelolco”.

A través de las Salvaguardias se previene la proliferación de las armas nucleares. Estas salvaguardias son implementadas por el Organismo Internacional de Energía Atómica y es el mecanismo por el cual se garantiza que un Estado de cumplimiento a su compromiso de no utilizar los materiales fisionables especiales y otros, así como servicios, equipos e instalaciones nucleares para el desarrollo de armas u otros dispositivos nucleares con fines militares. El alcance de dicho compromiso se determina en las obligaciones que asume el Estado en cada Tratado y en el tipo de acuerdo de salvaguardias que el Estado haya concertado con el OIEA. Por medio de diferentes instrumentos internacionales, regionales y bilaterales, los Estados se comprometen a adoptar la aplicación de salvaguardias a los materiales y actividades nucleares sujetos a su jurisdicción o control.

²⁸ Ver capítulo 5: Autoridad Reguladora Nuclear.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

Entre los requisitos más importantes que un Estado debe asumir aparecen: la necesidad de designar a la autoridad responsable por establecer y mantener el Sistema de Contabilidad y Control de Materiales Nucleares sujetos a Salvaguardias, el envío de registros y reportes de las actividades de contabilidad y control desde y para el OIEA, la revisión y verificación del diseño de la instalación, realizar inspecciones y encargarse del mantenimiento de registros.

También es esencial reconocer que la energía nucleoelectrica no es el factor que más contribuye a aumentar los riesgos de proliferación, y que detener la expansión de ese tipo de energía, o disminuir su producción, no supondría una reducción apreciable de esos riesgos.

4.2.3.4. Riesgos de la actividad sísmica; Error! Marcador no definido.

Las centrales nucleares se diseñan para soportar la ocurrencia de terremotos y de otros eventos externos de manera tal de no poner en riesgo la seguridad de la central. Por ejemplo, en Francia las centrales nucleares, para cada emplazamiento, se diseñan para que resistan un terremoto dos veces más fuerte que el calculado con una probabilidad de ocurren de 1 en 1000 años. Se estima, que el 20% de las centrales nucleares en operación se encuentran ubicadas en áreas de actividad sísmica significativa.²⁹

Debido a la frecuencia y magnitud de terremotos en Japón, una atención particular se brinda a la atención de los problemas sísmicos durante la selección del emplazamiento de la central nuclear, así como en su diseño y construcción. El diseño sísmico de estas centrales nucleares está basado en criterios muchos más severos que aquellos que se aplican a instalaciones industriales convencionales. Las centrales nucleares se construyen además en terrenos rocosos duros (no sedimentos) con el objetivo de minimizar el movimiento sísmico sobre las estructuras. Sensores sísmicos son fijados en las estructuras de la central nuclear. Si los registros de estos sensores exceden los límites establecidos por diseño, la central nuclear se apaga automáticamente sin emisiones de sustancias radioactivas al medioambiente. Para la puesta en operación de la central nuclear después de un evento de este tipo se puede requerir de una inspección al equipamiento. En particular, después de un sismo la vasija del reactor, las barras de regulación y los sistemas de control, así como el recinto de contención no deben haber sufridos daños en absoluto.

La eficiencia de las estrictas normas internacionales bajo las que se construyen las centrales fue puesta a prueba en el gran terremoto de Kobe, ocurrido el año 1995. Ese día alrededor de 6.000 japoneses murieron, las vías quedaron destrozadas y exactamente 6.513 edificios fueron destruidos y otras innumerables construcciones quedaron con daños severos o menores. Debido a lo pequeño del territorio, **9 centrales nucleares se vieron directamente afectadas**, en especial la que se encuentra instalada en las cercanías del puerto de Kobe;

²⁹ Nuclear Power Plants and Earthquakes, World Nuclear Association, January 2009.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

pero debido a las extremas medidas de seguridad con que se edifican, estas no sufrieron daño alguno. Además, como medida de protección, sus reactores pararon automáticamente y no sufrieron daño alguno.

Otro gran examen ocurrió el año 2007, cuando el territorio japonés se vio nuevamente azotado por un gran movimiento telúrico, evento que provocó la fisura en una de las piscinas que acumulan el agua radiactiva, mucho se especuló sobre este daño, llegándose a la conclusión, luego de acabados análisis, que la radiación emanada hacia el exterior fue 100 veces menor a la que recibe una persona cuando se somete a una radiografía. **Sus 7 reactores, 3 en operación y 4 en mantención no sufrieron daño alguno.**

Debido a la alta actividad sísmica de Chile, el factor de riesgo más importante en el análisis que se haga de la opción nuclear lo constituye indudablemente la probabilidad de ocurrencia de un sismo de alta intensidad, como el ocurrido en Valdivia en 1960 (9,5 grados en la escala de Richter).

Si bien la naturaleza es impredecible y en ocasiones altamente destructora, los ejemplos mundiales expuestos y los elevados estándares de seguridad internacional en el diseño, construcción y operación de centrales **permiten el desarrollo seguro y confiable de esta tecnología en países sísmicos como**

4.2.3.5. Riesgo asociado al terrorismo

A raíz de los atentados perpetrados en septiembre de 2001 en los Estados Unidos de América, así como de los cometidos posteriormente en España, Indonesia y la Federación de Rusia y en otras partes, se ha llevado a cabo una revaluación radical de los riesgos de ataques terroristas en todos los puntos sensibles: centros urbanos, complejos industriales, puertos, refinerías de petróleo, medios de transporte aéreo y ferroviario e instalaciones nucleares. Se ha hecho aun más hincapié en las medidas de seguridad física nuclear - la capacidad de controlar y proteger los materiales nucleares y otros materiales radiactivos, las instalaciones nucleares y las actividades de transporte - contra las actividades terroristas y otras actividades ilegales.³⁰

³⁰ Seguridad física nuclear, Informe anual para 2004, OIEA, Viena.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”



Imagen 4.4 - Montaje fotográfico de un posible impacto de avión sobre una central nuclear.

En las evaluaciones de la seguridad física en las centrales nucleoelectricas se señala que esas centrales y otras instalaciones del ciclo del combustible están diseñadas para soportar desastres naturales, como terremotos, inundaciones, tornados y huracanes. Los ataques terroristas en los que se producen explosiones e incendios podrían asimilarse a esos acontecimientos externos por sus consecuencias en materia de daños y emisión de radiactividad.³¹ Debido a su diseño, el edificio de contención y otros edificios de las centrales son obstáculos más firmes que podrían resistir mejor los ataques.

³¹ The Future of Nuclear Power, MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts), Cambridge, Massachusetts (EE.UU), 2003.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Nucleo Eléctrica”

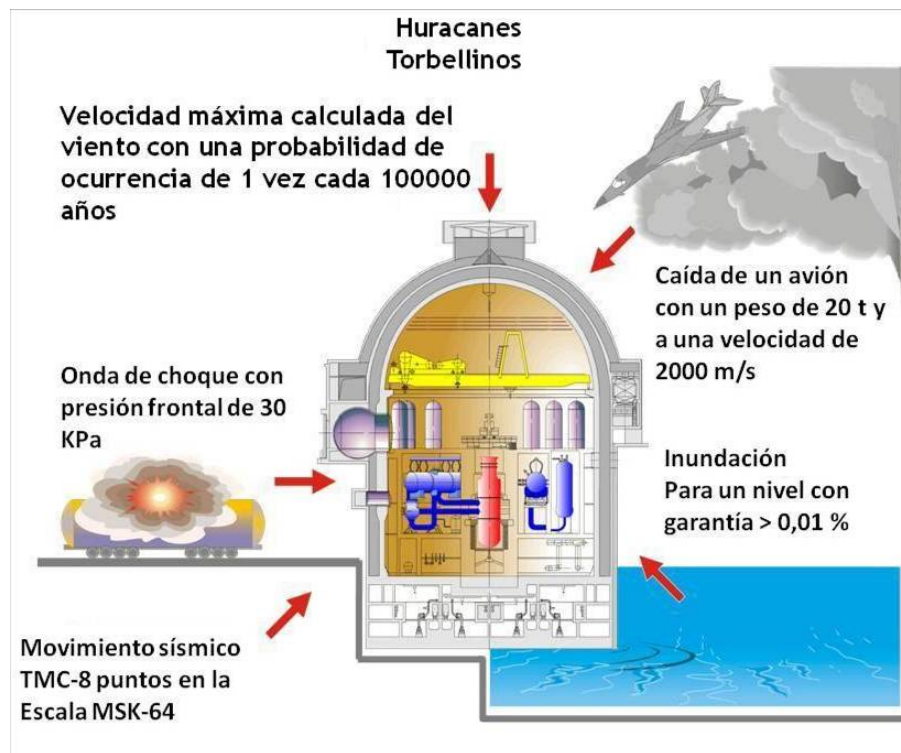


Figura 4.5 - Representación esquemática de algunos eventos externos considerados en el diseño de una central nuclear.

En una evaluación realizada por el Instituto de Investigaciones de la Energía Eléctrica, de los Estados Unidos, sobre las consecuencias del impacto de un avión en una central nuclear de este país, se determinó que los edificios de contención no se verían dañados por un ataque de esa naturaleza.³² La División Principal de Seguridad de las Instalaciones Nucleares, de Suiza, estudió un escenario similar e informó en 2003 de que el peligro de emisión de radiación sería bajo en las centrales antiguas y extremadamente bajo en las nuevas.³³

³² Reactor Security: Multiple Safety Systems and Physical Construction, NEI (Instituto de Energía Nuclear), 2006, Washington, DC.

³³ Safety of Nuclear Power Reactors, Nuclear Issues Briefing Paper 14, UIC (Uranium Information Centre), 2006, Melbourne (Australia).

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”



Imagen 4.5 - *Secuencia gráfica de la prueba de impacto sobre una estructura similar a la del recinto de contención de una central nuclear de un avión de combate Phantom F-4.*

Asimismo, la solidez de las instalaciones nucleares, los dispositivos especiales de seguridad para impedir todo acceso no autorizado o forzado, y los requisitos reglamentarios con arreglo a los cuales las centrales deben estar diseñadas para soportar “amenazas bases de diseño” contra actos de sabotaje y robos, indican que es muy improbable que un ataque perpetrado desde el interior de una central provoque una emisión significativa de radiactividad. En un ejercicio de seguridad realizado en 2002 por el Center for Strategic International Studies de los Estados Unidos se llegó a la conclusión de que las centrales nucleoelectricas son blancos muchísimo menos atractivos para los terroristas debido a las estrictas medidas de seguridad a que están sujetas estas instalaciones.^{34, 35}

Esta prueba presentada en el Informe Anual 2001 de la DSN, permite deducir que ***el grosor de la cubierta de hormigón armado es suficientemente fuerte como para resistir un atentado terrorista por aire o sabotajes de esa naturaleza***, según señaló Johannis Nöggerarrath de la DSN.

³⁴ Site Security: Armed Guards, Physical Barriers, Detection Systems, NEI (Instituto de Energía Nuclear), 2006, Washington, DC.

³⁵ Security Effectiveness: Independent Studies and Drills, NEI (Instituto de Energía Nuclear), 2006, Washington, DC.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

4.2.3.6. Otros riesgos

4.2.3.6.1. Riesgo económico como consecuencia del retardo de la construcción

El tiempo de la construcción de una central nuclear normalmente se toma como la duración entre el vertido del primer hormigón y hasta su conexión a la red de transmisión de energía (ver figura 4.6). Por ello, antes de que la central entre en operación, una cantidad sustancial de tiempo y esfuerzo está involucrada en el proceso de planificación y gestión de las aprobaciones y autorizaciones correspondientes necesarias para este tipo de proyecto. Por ello, los costos de los intereses durante el proceso de construcción pueden ser un elemento importante del costo total de capital (costo inversión), pero estará en dependencia de la relación entre los intereses y el período de construcción. Para un periodo de construcción de 5 años, la Universidad de Chicago³⁶ ha realizado un cálculo donde se muestra que el pago de los intereses durante la construcción puede ser aproximadamente un 30% de los gastos totales. Esto aumentaría a un 40% si el plazo se extendiera a 7 años. De aquí la importancia que tiene el completar en los plazos fijados la construcción y puesta en operación de la central.

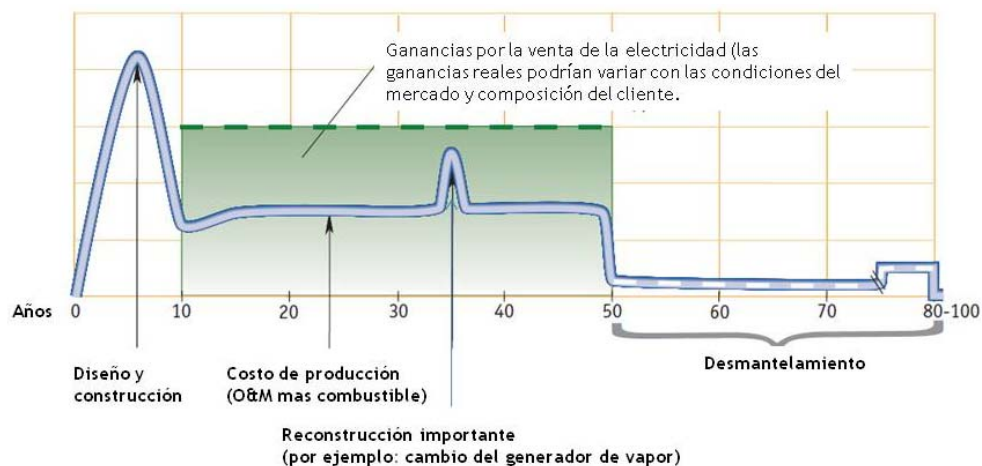


Figura 4.6 - Flujo de caja típico para un proyecto de una central nuclear.

El principal riesgo entonces, está vinculado a todo el proceso de licenciamiento a que está sometido un proyecto de este tipo, así como la llegada en tiempo de los suministros necesarios para su ejecución. Desde luego este riesgo está también vinculado con la política y la regulación vigente en el país. Por ello es que el Estado aquí juega un papel importante con el objetivo de garantizar que los plazos establecidos en cada una de las etapas sean

³⁶ The Economic Future of Nuclear Power, University of Chicago, 2004, http://www.anl.gov/Special_Reports/.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

cumplidos en tiempo y forma, sin perjuicio de la seguridad de la instalación, de manera de minimizar este riesgo. De ahí la importancia de contar con una Autoridad Reguladora debidamente preparada para estas actividades, de manera que no sea un riesgo innecesario para los inversionistas.

Un ejemplo característico de este de riesgo es el del Programa de Generación Nuclear de Filipinas^{37,38}:

- En 1973 optó por recurrir a la energía atómica para contrarrestar los efectos de la crisis del petróleo y encargó a la empresa estadounidense Westinghouse la construcción de una central nuclear en la provincia de Bataan, unos cien kilómetros al norte de la capital.
- Los planes iniciales eran dotar al reactor de agua ligera con una potencia de 621 MW.
- Las obras comenzaron en 1976 y concluyeron en 1984, aunque estuvieron suspendidas durante dos años, después de que en 1979 una investigación oficial revelara más de 4.000 fallos en el panel de control central y otros sistemas.
- Westinghouse tuvo que reemplazarlos por modelos más modernos, pues la mayoría databan de principios de los años 70, y el coste total se elevó por encima de los 2.300 millones de dólares.
- En 1986 se decidió clausurar la planta por temor a que el emplazamiento de la misma en una zona propensa a los terremotos y cercana al volcán Pinatubo pudiera provocar en Filipinas un nuevo desastre como el que ocurrió aquel año en Chernobyl.
- En 2007, el Gobierno filipino anunció el pago del último plazo de la deuda que mantenía con Westinghouse, cuyos intereses ascendían a más de 150.000 dólares al día.

4.2.3.6.2. Riesgos comerciales

Estos riesgos existen para todo tipo de central en diferente magnitud. Por ejemplo, *la variación del precio del combustible, la fluctuación del precio de la energía eléctrica*, etc. El *riesgo por el precio del combustible es considerablemente más bajo en el caso de las centrales nucleares que para las centrales eléctricas convencionales*, ya que su

³⁷ <http://www.diariodenavarra.es/20080820/culturaysociedad/>

³⁸ http://latercera.com/contenido/659_77405_9.shtml

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

participación en la conformación del costo de la generación es menor como se vió en el capítulo relacionado con los aspectos económicos.

Así entonces, un fuerte aumento del precio del combustible nuclear no influye fuertemente en los ingresos de la empresa. En condiciones de economía de libre mercado, la industria nuclear funciona bajo las regulaciones del operador del sistema energético, el que dependen de los costos de producción del sistema, con esto las empresas con costos más bajos gozan de prioridad. Es decir, las empresas operadoras de centrales nucleares poseen un grado suficiente de control sobre los precios de la energía eléctrica, pues los costos marginales contribuyen al mantenimiento de la competitividad de estas con respecto al de su competencia que son las centrales a combustibles fósiles. El aumento del factor de planta alcanzado por las centrales nucleares se refleja también en el precio y el costo general del proyecto.

Este riesgo puede ser mitigado si se toman las medidas correctas durante todo el proceso de negociación para la construcción y operación de la central nuclear con las autoridades públicas y privadas relacionadas con el sector eléctrico.

Otra de los eventos que está vinculado con este riesgo, está relacionado con la posibilidad que la Autoridad Reguladora durante las inspecciones que realiza en la etapa de operación de la planta detecta desviaciones de las condiciones en que se extendió la licencia de operación de la central. En algunos casos, esto puede llevar a la detención del bloque generador en cuestión provocando las pérdidas correspondientes fijadas por la generación total de electricidad dejada de producir el precio de venta del KWh fijado con la autoridad correspondiente. Algo similar ocurre también, cuando un incidente provoca la detención del bloque. Estos dos eventos que pueden provocar este riesgo son minimizados por la entidad explotadora de la central a través de sus inspecciones, la aplicación de la cultura de la seguridad y la preparación de los recursos humanos vinculados a la operación y el mantenimiento de la central.

4.2.3.6.3. Riesgo de la política vigente y de regulación; Error! Marcador no definido.

Debido a la larga duración de un proyecto de este tipo el establecimiento de una política definida y a largo plazo por parte del Estado en torno a la opción nuclear para generar energía eléctrica, permitirá la estabilidad a largo plazo de este tipo de opción una vez decidido a su favor. Para ello, es necesario el establecimiento de la regulación correspondiente en esta actividad de acuerdo con la experiencia internacional tanto de la industria nuclear como de organizaciones tales como el OIEA y la Autoridades Reguladoras Nacionales de los diferentes países con centrales nucleares en operación.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

En la actualidad hay países con centrales nucleares que por distintos motivos, tomaron la decisión de deshacerse gradualmente o por completo de la energía nuclear (Alemania e Italia). Esto provocó que se tomaran una serie de medidas a nivel de gobiernos para acortar la vida útil de las centrales nucleares respecto al señalado en el proyecto original. En algunos casos, las empresas a pesar de esta acción, tuvieron que seguir realizando pagos, especialmente relacionados con los cumplimientos adquiridos antes de esa decisión política y cumplir además con exigencias adicionales de seguridad exigidas por parte de los órganos de control (también motivadas por decisiones políticas). Estos ejemplos, demuestran *la importancia que tiene la situación política de cada país y la necesidad de existencia de regímenes estables y predecibles para el control y licenciamiento del desarrollo de la energía nuclear.*

4.2.3.6.4. Riesgo por el agotamiento de las reservas de los diferentes tipos de combustibles

Este riesgo es particularmente importante en el caso de los *combustibles fósiles ya que se estima que sus reservas se agotaran en un futuro mediano* aunque la precisión del momento es muy difícil de determinar por la participación de diferentes intereses vinculados con el tema. Según el OIEA y la información brindada en este estudio, la existencia del recurso nuclear se presenta en la siguiente Tabla 4.3³⁹.

Tabla 4.3 - Años de generación mundial de energía nucleoelectrónica al nivel de la generación del 2004.

Reactor/ciclo de combustible	Años de generación mundial de energía nucleoelectrónica al nivel de 2004 con los recursos convencionales conocidos	Años de generación mundial de energía nucleoelectrónica al nivel de 2004 con todos los recursos convencionales (conocidos y estimados)
Ciclo del combustible abierto con reactores de agua ligera	85	270

³⁹ Uranium 2005: Resources, Production and Demand, OCDE, Paris.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

Ciclo puro del combustible de reactores rápidos con reciclado	500 - 600	1600 - 1900
---------------------------------------------------------------	-----------	-------------

En la Tabla 4.3 se resumen los datos relativos a la duración prevista de los recursos convencionales de uranio si se mantienen las tasas de quemado actuales. Las cifras que figuran en la primera fila se basan en el supuesto de que los futuros reactores nucleares de potencia utilizarán la misma tecnología que los reactores actuales, que sólo pueden utilizar menos del 2% de la energía contenida en el uranio natural. En la fila de abajo se supone que, conforme aumente el precio del uranio, el combustible usado acabará siendo reciclado - mediante tecnologías que ya existen - para extraer mucha más energía. Dado que todas las cifras indicadas en los cuadros se basan en las tasas actuales de consumo de uranio, todas se reducirán proporcionalmente en caso de expansión de la producción de energía nucleoelectrica.

Si se toman en cuenta los recursos de uranio no convencionales, aumentan considerablemente todas las cifras de la tabla 4.3. Estos recursos abarcan cerca de 22 MtU presentes en yacimientos de fosfato y hasta 4 000 Mt U contenidas en el agua de mar. Ya se dispone de tecnología adecuada para recuperar el uranio de los fosfatos, aunque los costos son relativamente altos: 60-100 dólares de los Estados Unidos por Kg U. La tecnología para extraer los grandes recursos de uranio diluidos en el agua de mar sólo ha sido demostrada en laboratorio; los costos de extracción con esta tecnología se estiman actualmente en unos 300 dólares de los Estados Unidos por Kg U.⁴⁰ Un eventual incremento en los precios de los recursos de uranio tendría efectos limitados en los costos de producción de energía nucleoelectrica porque el combustible nuclear sólo representa una parte muy pequeña de estos costos (el 2%), mientras que en el caso de la generación de electricidad con combustibles fósiles la incidencia de los precios del combustible es mucho mayor (del 40 al 70%).

La Tabla 4.3 se refiere únicamente al uranio. Los reactores alimentados con torio se desarrollaron en los decenios de 1960 y 1970, pero nunca llegaron a tener una presencia significativa en el mercado. La India, que cuenta con muchos más recursos de torio que de uranio, es un país que continúa desarrollando el ciclo del combustible del torio. Este mineral es tres veces más abundante en la corteza terrestre que el uranio. Las estimaciones sobre las reservas de torio conocidas y las reservas potenciales totalizan más de 4,5 Mt, pero se considera que estas estimaciones son conservadoras, teniendo en cuenta que no abarcan todas las regiones del mundo y que una demanda históricamente débil ha limitado la prospección del torio.

⁴⁰ Informe Mundial de Energía: la energía y el reto de la sostenibilidad, PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo), 2000, Nueva York.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

Por todo lo anterior, se puede apreciar que las *reservas existentes de uranio garantizan la generación de energía eléctrica de origen nuclear y que la introducción del torio como combustible hará aun más favorables este escenario.*

4.2.3.6.5. Marco Regulatorio

Un riesgo asociado a la opción nuclear del cual se ha hablado anteriormente y está relacionado con la necesidad de *contar con un marco regulatorio* conveniente elaborado para el desarrollo de un programa de este tipo. Este marco regulatorio debe estar preparado con tiempo de antelación con el objetivo de que el inversionista conozca las exigencias concretas del país en materia de seguridad nuclear y protección radiológica. Un retraso en este aspecto implicaría diferir el desarrollo de un programa de este tipo hasta que se cuente con el mismo, aun teniendo necesidad de contar con energía y existiendo inversores interesados. Esto está directamente vinculado con las actividades de la Autoridad Reguladora Nacional y la necesidad de contar con ella con tiempo de anticipación para que no retrase el desarrollo de un programa de este tipo.

4.2.3.6.6. La no existencia de los recursos humanos calificados

Las características propias de las ciencias y técnicas nucleares requieren que los proyectistas, constructores y explotadores hayan de tener conocimientos específicos muy avanzados, que sólo se pueden adquirir a través de la formación y el entrenamiento cuidadoso. De hecho, el personal de explotación de las centrales nucleares requiere un entrenamiento específico y permanente. De acuerdo con la práctica internacional y los requerimientos de la Autoridad Reguladora Nuclear, los operadores y supervisores de una central requieren de una licencia o permiso de trabajo que otorga esta institución. Por ello, el no contar con los recursos humanos adecuados para el desarrollo de un programa de este tipo tiene un determinado riesgo.

Sin embargo, la preparación de los recursos humanos necesarios para un programa de este tipo se puede realizar a partir de las diferentes carreras universitarias que tenga una vinculación con las diferentes actividades del programa nuclear. En este sentido la necesidad más urgente de preparación de los recursos humanos está directamente vinculada con la actividad reguladora ya que esta entidad es la primera que debe estar preparada para poder evaluar proyectos de este tipo de manera que le permita al Estado tomar una decisión en este sentido, así como permitir la evaluación de cualquier propuesta de inversión que se haga para la generación de electricidad de origen nuclear.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

4.2.3.6.7. Riesgo geopolítico asociado a la ubicación de los recursos energéticos

Los yacimientos de los combustibles fósiles se encuentran localizados en países con cierta inestabilidad política, lo que han provocado problemas tanto en su suministro como en sus precios. Esto evidentemente repercute negativamente en las economías de los países importadores de estos combustibles y desde luego con la influencia también en el consumidor final de esta energía y por ende la sociedad.

En el caso del uranio, esta situación no se da. Es decir, los yacimientos se encuentran situados en países con estabilidad política lo que constituye una garantía de suministro para este tipo de combustible. A mayor detalle, el hecho de que el combustible nuclear es varios órdenes de magnitud menor en volumen que cualquier otra alternativa energética, permite que su almacenamiento sea factible ya que ocupa un volumen manejable facilitando que sea almacenado en las centrales de nucleares de manera eficiente y en almacenes relativamente pequeños. Esto hace posible que las centrales nucleares puedan contar con existencia de este combustible para periodos largos, 3 - 5 años, dependiendo del tamaño de la piscina de almacenamiento, la estrategia para la campaña⁴¹ del combustible seleccionada y el propio contrato de suministro del combustible.

4.2.3.6.8. Riesgo de suspensión del suministro de combustible nuclear a la central nuclear

Este es un riesgo que puede considerarse cuando se hace una evaluación de riesgo. Sin embargo, hay que señalar:

- **Primero:** las centrales nucleares después de su primera carga de combustible (unas 70 toneladas de uranio ligeramente enriquecido), recarga cada año un tercio de este volumen (unas 27 toneladas). En general, las centrales nucleares disponen de almacenes debidamente diseñados que les permite disponer de combustible para unas 5 recargas (recargas que se efectúan cada 12, 18 o 24 meses, de acuerdo con las características del diseño y las estrategias que se asuman al respecto). Con estas reservas en la central se asegura cierta independencia del suministro y la posibilidad, ante una interrupción del mismo, de buscar una solución sin afectar la generación de energía.
- **Segundo:** A través del contrato de suministro de este combustible entre el operador de la central y el productor del combustible se puede garantizar su suministro estable.

⁴¹ La estrategia de campaña del combustible consiste en la forma que el operador de la planta repondrá en la zona activa del reactor el combustible que se quema durante la campaña que puede durar entre 12 a 18 meses.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

En la actualidad no se ha reportado ningún caso en que los operadores de centrales nucleares no hayan recibido el suministro comprometido de este combustible y hayan tenido que detener la generación eléctrica por este motivo.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Nucleo Eléctrica”

Conclusiones Generales

A lo largo de este estudio se ha reiterado una idea que no por conocida tiene menos relevancia: el futuro energético, no solo de Chile, sino también del mundo, depende de que seamos capaces de asegurar el bienestar social con un suministro adecuado y oportuno para satisfacer una demanda creciente y, al mismo tiempo, tomando las medidas necesarias para frenar el calentamiento global y preservar los recursos naturales.

Sobre este desafío se viene haciendo gran hincapié en el último tiempo, pero aún falta algo para que el mecanismo apropiado comience a funcionar. Líderes de opinión y representantes de sectores tan diversos como la industria, la política, la economía y la ecología coinciden en un mensaje de alerta que también es un llamado a la acción. Por eso, la verdad sea dicha: cada día que pasa es un día perdido que costará demasiado caro en el futuro, si no se realizan avances concretos hacia esta meta.

En este contexto sin duda que la ciencia y la tecnología tendrán mucho que aportar. Es más, su voz será determinante a la hora de evaluar las mejores opciones para resolver nuestros requerimientos de energía. Este hecho adquiere una especial relevancia tratándose de analizar la opción nuclear como una alternativa viable, pues no solo se trata de una de las más importantes fuentes energéticas en la naturaleza, sino también del punto más alto alcanzado hasta hoy por la investigación y el desarrollo tecnológico de nuestra civilización, que ha puesto al hombre en condiciones de desentrañar los misterios de la materia y la energía para servirse de ellos, en armonía con sus leyes.

El presente estudio ha tenido como objetivo contribuir a esto de manera objetiva, aportando antecedentes relacionados con el Impacto y los Riesgos de la Nucleo- Electricidad.

En este sentido, surgen de este estudio de inmediato dos importantes conclusiones respecto al Impacto y el Riesgo de la Energía Nuclear:

- **Alta potencia con mínimo impacto:** Indudablemente la principal fortaleza de la energía nuclear, en comparación con la generada con otras fuentes renovables, es su mínimo impacto ambiental y prácticamente nula emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera durante el proceso de generación de altas potencias eléctricas, algo que, salvo la hidroeléctrica, ninguna otra tecnología puede ofrecer en la actualidad.
- **Riesgo bajo control:** Indudablemente el lado débil de la tecnología nuclear es el riesgo de que eventualmente ocurra un accidente que implique la emisión de radioactividad al ambiente. Sin embargo, con los actuales sistemas de seguridad y desarrollo de la tecnología este riesgo está controlado y se encuentra por debajo de los márgenes fijados por las normas internacionales establecidas para esta actividad. Incluso al

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

comparar el índice de riesgo de esta tecnología con otras, aparece como uno de los más bajos de la industria moderna, en cualquier ámbito. Es importante comprender lo que realmente significa el riesgo, para diferenciarlo de las percepciones de “una actividad riesgosa”, como en este caso, asumiendo que hay factores relacionados con la comunicación, la educación y la información muy importantes a considerar para saber diferenciar los verdaderos riesgos de los prejuicios y las falsas creencias.

Una vez dejando sentado ambos puntos es posible una revisión de los demás factores relacionados con la tecnología nuclear expuestos en este estudio, los cuales aportan argumentos para una evaluación profunda.

En cuanto a los riesgos que representa la alta actividad sísmica en Chile, no obstante serán necesarios estudios especialmente enfocados en este aspecto, a la luz de la experiencia internacional en la materia y los antecedentes aportados por la industria nuclear, se puede concluir que es enteramente posible construir una central nuclear en un país sísmico como en el nuestro.

La experiencia internacional, especialmente en países como Japón, ha demostrado que las centrales resisten bien los sismos que han ocurrido los últimos 50 años. El tema se ha solucionado desde la perspectiva estructural de la planta y de la tecnología del reactor propiamente tal. En Chile, por ejemplo, el reactor nuclear experimental de La Reina se detiene automáticamente en fracción de segundos si el movimiento telúrico sobrepasa los 5 grados, y no se trata precisamente de la tecnología más moderna de la actualidad.

Chile tiene casi 40 años de manejo seguro de dos reactores nucleares experimentales, dedicados a la investigación y aplicación de las técnicas nucleares, lo que le da un reconocimiento internacional en la materia, así como un grado de madurez muy importante en el manejo seguro de centrales nucleares de potencia. Por lo tanto, en Chile existe una base para pensar en el desarrollo de un programa nuclear para la generación de electricidad a corto plazo.

Junto con ello y no menos importante es el interés del Estado de Chile por estudiar seriamente la opción nuclear, teniendo claro que se trata del primer paso necesario para comenzar a evaluarla.

Los avances en esta materia logrados bajo su administración implican desde modificaciones tanto a la institucionalidad relacionada con el tema, como a la voluntad política y los aspectos legales implicados, lo cual representa sin dudas un legado de gran valor y utilidad futura.

De acuerdo a esto, después de considerar todos los antecedentes integrados en el presente informe y tomando en consideración lo señalador por el Director General del OIEA (ver inicio): “... de que para los países interesados en incorporar la energía nucleoelectrónica en sus

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

estrategias de desarrollo sostenible es importante *mantener abierta y accesible esa opción energética...*”, es posible *recomendar 3 aspectos* que permitirán alcanzar este objetivo:

1. Definir y perfeccionar la Autoridad Regulatoria y el marco legal para el uso de la energía nuclear, en todos sus aspectos. Esto permitirá estar preparado no solo para enfrentar las propuestas inversionistas en esta actividad sino también, estar preparado para las posibles incidencias de programas similares que puedan desarrollarse en países cercanos de la región, que también analizan en estos momentos esta opción.
2. Desarrollar las actividades tendientes a iniciar un proceso de calificación y preparación de los recursos humanos de manera de poder afrontar las necesidades que se originen de la propuesta formulada en el primer punto, así como de poder contar con personal con una alta calificación para el desarrollo de esta actividad.
3. Realizar una evaluación preliminar de la posible ubicación de emplazamientos de centrales nucleares. Este aspecto también fue recomendado por la Comisión creada por el Gobierno de Chile. Una evaluación de este tipo permitirá disponer de información anticipada que le permita al inversionista fijar la ubicación definitiva de la central y además en caso de que esto no se concrete el país dispondrá de información importante de los lugares seleccionados que puede ser utilizada con otros destinos.

En términos generales y a partir de las consideraciones presentadas en este estudio, las *conclusiones generales* que se pueden obtener son las siguientes:

- 1.- No hay ninguna fuente de energía que pueda considerarse libre de impactos ambientales y no presentar riesgos adicionales, por lo que para la diversificación de la matriz energética de cualquier país hay que tener en cuenta los impactos y riesgos que tiene cada tecnología en su ciclo completo.
- 2.- El desarrollo de la sociedad y por tanto su bienestar exige de un crecimiento del consumo de energía y este incremento debe ser suplido por aquellas fuentes de energía que no pongan en riesgo el bienestar de las generaciones presentes y futuras.
- 3.- la energía nuclear es una opción importante a considerar por cuanto permite garantizar este crecimiento ya que al no emitir gases efecto invernadero durante la operación de la central contribuye positivamente a frenar el calentamiento global del planeta y la contaminación del medioambiente.
- 4.- Las energías renovables tienen un rol relevante pero técnicamente no pueden sostener el desarrollo energético, no hay país que así lo proyecte. La solución no es Nuclear versus Renovables, sino Nuclear y Renovables.

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo Eléctrica”

- 5.- Un país que decida desarrollar un programa nuclear debe contar con una Autoridad Reguladora Nacional que sea independiente de los demás actores del sector energético. Su existencia es necesaria para dejar siempre abierta esta opción de generación de electricidad.
- 6.- Las plantas nucleares liberan cantidades insignificantes de radiación sin que por ello sea dañino para las personas o el ambiente. Estas emisiones son menores que la radiación ambiental media y están siempre por debajo de las establecidas en las normas nacionales e internacionales.
- 7.- Las centrales nucleares en operación emiten cantidades insignificantes de gases efecto invernadero y de material particulado por lo tanto no afectan al calentamiento global ni ensucian el ambiente. No obstante, el resto de las actividades de la cadena de la industria nuclear sí las producen, pero en su conjunto son inferiores a la generación eléctrica de origen fósil.
- 8.- Las reservas probadas de uranio a nivel mundial, con la tecnología actual basada en Uranio-235, son suficientes para abastecer el consumo durante 100 años. Existen otras tecnologías en desarrollo que producen energía a partir del Uranio-238 y el Torio-232, más abundantes que el Uranio-235, por lo que podría sostenerse la producción núcleo-eléctrica actual por 600 años.
- 9.- La seguridad nuclear está desarrollada a un nivel sin paragón posible con otros sistemas similares de la industria. En el proceso se involucran, entre otros, de manera simultánea e integrada las instalaciones nucleares, la industria, los centros de investigación, los organismos reguladores, expertos en todo tipo de disciplinas, los gobiernos de cada país y las organizaciones internacionales. Este tratamiento conjunto ofrece una solidez y un desarrollo compensado de carácter singular que se hace patente en el alto nivel de excelencia alcanzado por las centrales nucleares.
- 10.- Las centrales nucleares se caracterizan por ser intensivas en capital de manera que la inversión inicial supone aproximadamente dos terceras partes de los costes de generación, el combustible supone el 15% y la operación y mantenimiento el 20% restante. Esta estructura de costes da una gran estabilidad a los mismos, al no depender de manera importante de los precios de las materias primas (la materia prima uranio supone un 3%). En estas condiciones, y con periodos largos de operación, el KWh de origen nuclear es competitivo con el de otras fuentes. Contribuye a la estabilidad de los precios de la energía convirtiéndose en una barrera contra las fluctuaciones de los precios de los combustibles fósiles, ayudando a mantener una estabilidad a largo plazo del precio de la electricidad.
- 11.- La disposición final de los desechos es un aspecto en el que la producción de energía nucleoelectrónica está, por lo general, mejor situada que los otros tipos de

Estudio “Análisis Relativo de Impactos y Riesgos de la Generación Nucleo Eléctrica”

generación. A diferencia de los desechos sólidos y tóxicos producidos en la combustión de las fuentes de energía fósiles, los desechos nucleares son de pequeño volumen, están bien confinados y son objeto de controles muy estrictos.

- 12.- Los recursos humanos necesarios para el desarrollo de un Programa Nucleo-eléctrico son un factor fundamental para alcanzar la ejecución exitosa del mismo y obtener un reconocimiento de la gestión núcleo-eléctrica a nivel internacional y en el propio país. Está demostrado que los procesos tecnológicos asociados a esta industria impactan en el ámbito de conocimientos y se difunden en toda la estructura productiva del país al elevar el nivel de eficiencia global de la sociedad y por ello sus ventajas comparativas para insertarse ventajosamente en el actual sistema globalizado.
- 13.- La aceptación pública y política de la nucleoelectricidad depende de un conjunto de factores, entre los cuales el manejo adecuado y equilibrado de la información respecto a esta tecnología tiene una importancia fundamental. En este punto es recomendable una política responsable enfocada a elaborar y dar a conocer toda la información disponible en torno a la opción nuclear pero, no planteada en forma de confrontación, sino de esclarecimiento de la opinión ciudadana.
- 14.- No existe peligro real de robo de material nuclear para usos bélicos o terrorista. El temor que existe sobre este aspecto de la industria nuclear es infundado. El Organismo Internacional de Energía Atómica es el encargado del control de la energía nuclear, fiscaliza y previene estos riesgos y los mecanismos establecidos hasta la fecha han demostrado gran eficacia.
- 15.- En un país sísmico como Chile es enteramente posible construir una central nuclear. La experiencia internacional, especialmente en países como Japón, ha demostrado que las centrales resisten bien los sismos que han ocurrido los últimos 50 años. El tema se ha solucionado desde la perspectiva estructural de la planta y de la tecnología del reactor propiamente tal. En Chile, por ejemplo, el reactor nuclear experimental de La Reina se detiene automáticamente en fracción de segundos si el movimiento telúrico sobrepasa los 5 grados, y no se trata precisamente de la tecnología más moderna de la actualidad.