

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

Documento Final



Corporación Nuclear Eléctrica Chile S. A.

Santiago de Chile, Junio de 2009

Viktor Filichkin

Gerente General del Proyecto

Presidente de la Corporación Nuclear Eléctrica Chile S. A.

Anatole Gubin Uliantzeff

Gerente del Proyecto en Chile

Director General de la Corporación Nuclear Eléctrica Chile S. A.

Sergei Pegov

Jefe del Proyecto en Rusia

Director de AtomProm de ROSENERGOATOM

Manuel Cadavid Rodríguez

Jefe del Proyecto en Chile

Corporación Nuclear Eléctrica Chile S. A.



ROSENERGOATOM

Federación de Rusia

INDICE

1.1. La situación energética mundial	19
1.2. Los recursos energéticos	23
1.2.1. Recursos no renovables	25
1.2.1.1. Carbón	26
1.2.1.2. Gas natural	29
1.2.1.3. Petróleo	31
1.2.2. Recursos renovables	33
1.2.2.1. Energía solar	35
1.2.2.2. Energía eólica	38
1.2.2.3. Energía hidráulica.....	40
1.2.2.4. Energía de las afluencias	41
1.2.2.5. Energía nuclear.....	42
1.3. La situación energética de Chile	44
2.1. Aspectos generales.....	52
2.2. El combustible nuclear.....	62
2.2.1. Perspectivas para el uso del Uranio	62
2.2.2. Perspectivas del uso del Torio	66
2.3. Tipos de centrales nucleares	69
2.4. Proyectos en desarrollo	75
2.5. La industria nuclear rusa	83
2.5.1. Reactores de gran potencia	83
2.5.1.1. Reactor VVER - 1000	83
2.5.1.2. Reactor VVER - 1200	84
2.5.1.3. Reactores MKER	86
2.5.2. Reactores de mediana potencia	87
2.5.2.1. Reactor VVER-440.....	88
2.5.2.2. Reactor ASER-300	89
2.5.2.3. Reactor VK-300 (calefacción).....	90
2.5.3. Reactores de baja potencia	91
2.5.3.1. Modelos SVVER-75/100, VVER-150 y KLT-40C	91
3.1. Principales requerimientos de seguridad en las centrales nucleares	102
3.2. Clasificación de incidentes y accidentes	107
3.3. Los accidentes más relevantes de la industria nucleo-energética	111
3.3.1. Three Mile Island	111
3.3.2. Chernobyl	112

3.4. Colaboración internacional.....	115
3.5. Principios fundamentales para garantizar la seguridad en las centrales nucleares.....	117
3.6. La seguridad en las centrales nucleares modernas	119
3.6.1. Seguridad radiológica de las centrales nucleares	123
3.6.2. Seguridad en la gestión de los desechos radioactivos	130
3.6.3. Garantías de seguridad en las principales etapas del ciclo vida de la central nuclear	131
3.6.3.1. Garantía de seguridad pública respecto al emplazamiento de la central nuclear	132
3.6.3.2. Garantía de seguridad en la etapa de diseño de la central nuclear	133
3.6.3.3. Garantía de seguridad en la etapa de construcción de la central nuclear.....	134
3.6.3.4. Garantía de seguridad en la etapa de operación de las centrales nucleares.....	135
3.6.3.5. Garantía de seguridad en la etapa de desmantelamiento de las centrales nucleares.....	138
3.7. Plan de emergencia nuclear	140
4.1. Características generales	147
4.2. El combustible nuclear	153
4.2.1 El Uranio enriquecido.....	153
4.2.2. El combustible en la central nuclear	155
4.2.3. Desechos radioactivos	155
4.2.3.1. Clasificación de los desechos radioactivos.....	157
4.2.4. Ciclo abierto y ciclo cerrado	158
4.3. Industria internacional del Uranio	159
4.4. Minerales alternativos al Uranio	164
4.5. Aspectos de la no proliferación de materiales nucleares.....	166
4.6. Aspectos ambientales y de seguridad del ciclo de combustible nuclear	167
5.1. La Autoridad Reguladora Nuclear Nacional	180
5.2. El marco jurídico nacional.....	183
5.2.1. Principio de seguridad tecnológica	184
5.2.10. Principio de cooperación internacional	191
5.2.2. Principio de seguridad física	185
5.2.3. Principio de responsabilidad	186
5.2.4. Principio de autorización	187
5.2.5. Principio de control	187
5.2.6. Principio de indemnización.....	188
5.2.7. Principio de desarrollo sostenible.....	188
5.2.8. Principio internacional de cumplimiento.....	189
5.2.9. Principio de transparencia.....	189
5.3. Proceso de aprobación del marco jurídico.....	192

5.4. Convenciones y tratados internacionales	193
5.4.1. Convención sobre Seguridad Nuclear y Convención Conjunta	194
5.4.2. Convenciones sobre Asistencia y Sobre pronta Notificación	194
5.4.3. Reglamento de Transporte Seguro de Materiales Radiactivos.....	195
5.4.4. La Convención Conjunta	195
5.5. Salvaguardias para el uso pacífico de la energía nuclear	199
5.6. El licenciamiento para las centrales nucleares	203
5.7. La experiencia de la Federeación de Rusia.....	205
5.7.1. Rosenergoatom.....	205
5.7.2. La Autoridad Reguladora de Rusia	208
5.7.3. Otorgamiento de licencias en Rusia	210
5.7.4. Permisos y certificaciones para la ejecución de los trabajos en la central nuclear	211
5.7.5. Responsabilidades y obligaciones de la entidad explotadora	211
6.1. Etapas y criterios, ,	218
6.2. Metodología para la Selección del Emplazamiento	221
6.2.1. Selección	222
6.2.2. Etapa de Caracterización	222
6.2.3. Etapa Pre operacional	224
6.2.4. Etapa Operacional	224
6.3. Características de los emplazamientos relacionadas con la seguridad y no relacionadas con la seguridad	224
6.3.1. Características relacionadas con la seguridad	225
6.3.2. Criterios a considerar no relacionados a la seguridad	226
6.4. Factores socioeconómicos a considerar	227
6.4.1. Red de distribución eléctrica	227
6.4.2. Condiciones de transporte.....	228
6.4.3. Condiciones sociales	228
6.4.4. Información respecto a la región.....	228
6.5. Factores naturales que limitan la elección de un emplazamiento.....	228
6.5.1. Los factores que prohíben	229
6.5.1.1. Agua.....	229
6.5.1.2. Geológicos	229
6.5.2. Los factores que limitan.....	229
6.5.2.1. La sismicidad.....	229
6.5.2.2. Los recursos hídricos disponibles.....	231
7.1. Consideraciones de carácter general	239
7.2. Comparación del impacto ambiental entre las diferentes fuentes de energías.....	242
7.3. Emisiones y contaminación térmica	251
7.4. Impacto al patrimonio cultural	255
7.5. Desechos	256

7.5.1. Los desechos radioactivos	258
7.5.1.1. Desechos radioactivos producidos por las centrales nucleares.	260
7.5.1.2 Tratamiento de los desechos radioactivos.....	262
8.1. Ventajas económicas de la energía nuclear	273
8.2. Costos de la construcción y operación de las centrales nucleares	275
8.2.1. La tasa de descuentos	277
8.2.2. Inversiones de capital	278
8.3. Costos y riesgos de operación	292
8.3.1. Riesgos de operación.....	292
8.3.2. Costos de operación.....	293
8.4. Coeficiente de utilización de la potencia instalada (Factor de Planta).....	296
8.5. Costos de desmantelamiento	298
8.6. Costos medioambientales.....	299
8.7. Incentivos para proyectos de construcción de nuevas centrales nucleares	300
8.8. Usos no eléctricos de los reactores nucleares	302
9.1. Desarrollo de los recursos humanos, científicos y pedagógicos	307
9.1.1. Indicadores cuantitativos y especialidades.....	309
9.2. Formación de trabajadores previo al inicio de operaciones	314
9.3. El Centro de Enseñanza y Entrenamiento.....	316
10.1. Significado social.....	319
10.2. Aceptabilidad social de la energía nuclear	323
10.3. Impacto laboral.....	326
10.4. Riesgo subjetivo y objetivo	327
10.5. La influencia de la energía nuclear en la salud de las personas.....	334
11.1. Consideraciones generales	353
11.2. Análisis de los riesgos asociados a las diferentes fuentes de energía	357
11.2.1. Riesgos relacionados con las fuentes de energías renovables.....	357
11.2.2. Riesgos relacionados con las fuentes de energía fósiles	357
11.2.3. Riesgos relacionados con la energía nuclear	358
11.2.3.1. Riesgo de un accidente nuclear severo	360
11.2.3.2. Desechos radioactivos	363
11.2.3.3. No proliferación y seguridad física	363
11.2.3.4. Riesgos de la actividad sísmica	364
11.2.3.5. Riesgo asociado al terrorismo.....	365
11.2.3.6. Otros riesgos.....	368
11.2.3.6.1. Riesgo económico como consecuencia del retardo de la ejecución del proyecto.	368
11.2.3.6.2. Riesgos comerciales	370
11.2.3.6.3. Riesgo de la política vigente y de regulación	371
11.2.3.6.4. Riesgo por el agotamiento de las reservas de los diferentes tipos de combustibles	371

11.2.3.6.5. Marco Regulatorio	373
11.2.3.6.6. La no existencia de los recursos humanos calificados	374
11.2.3.6.7. Riesgo geopolítico asociado a la ubicación de los recursos energéticos	374
11.2.3.6.8. Riesgo de suspensión del suministro de combustible nuclear a la central nuclear	375
Conclusiones Generales	381

Introducción

I. Antecedentes

La energía, en particular la electricidad, es esencial para el desarrollo económico y social de los pueblos y un factor clave en la calidad de vida de las personas. Se trata de un recurso de primera necesidad sin el cual la mayoría de las actividades humanas no serían posibles actualmente. Es un hecho que nuestra civilización es por entero dependiente de las fuentes de energía y su uso cotidiano nos parece tan natural y sencillo que cuesta trabajo asimilar el hecho de que los niveles mundiales de suministro que se alcanzaron durante el siglo pasado ya no son sostenibles. La verdad es que durante este siglo la problemática energética se presenta en la necesidad de favorecer y garantizar el acceso a la energía para todos, reduciendo al mismo tiempo la amenaza ambiental del cambio climático, provocado por las emisiones antropogénicas de CO₂, y enfrentando las consecuencias sociopolíticas provocadas por el aumento de los precios de la energía y la progresiva carencia de fuentes de abastecimiento.

Chile, al igual que otros países del mundo, deberá enfrentar estos desafíos para satisfacer la demanda de energía 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, cual es contar con estándares de seguridad energética a la altura de los desafíos. 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 alta volatilidad en los precios de los insumos e interrupciones en el suministro. Por ello, el país está impulsando varias 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.

En este contexto surge la posibilidad de incluir la energía nuclear dentro del menú de opciones para satisfacer la demanda eléctrica. 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.

Por ello, aunque el Gobierno actual de Chile no tomará una decisión con respecto a iniciar un programa de desarrollo núcleo-eléctrico en el país, si ha expresado la voluntad de

comenzar con los estudios que reúnan los antecedentes necesarios para que la próxima administración pueda tomar decisiones bien fundamentadas acerca de la conveniencia de incluir o no la opción nuclear dentro de la matriz energética.

Así, en 2007 el Gobierno conformó un Grupo de Trabajo que se encargaría de hacer una primera evaluación de esta opción. En Septiembre de ese año el informe “La Opción Núcleo-Eléctrica en Chile” presentado al Gobierno y, entre sus conclusiones, estableció que:

- 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.

Además, el informe recomendó la realización de diferentes estudios vinculados con esta tecnología cuya información constituirá una base indispensable de consulta para la etapa de toma de decisiones.

Dentro de estos estudios se encuentra el que se presenta en este documento: “Análisis relativo a los Impactos y Riesgos de la Generación Núcleo-Eléctrica”, ejecutado por la Corporación Nuclear Eléctrica Chile S. A., en estrecha coordinación con ROSATOM.

II. Objetivos

El objetivo del Estudio es establecer desde la perspectiva económica, social y ambiental los beneficios, costos y riesgos que pueda tener un eventual desarrollo núcleo-eléctrico en Chile, en comparación con otras opciones de generación eléctrica.

Objetivos Específicos:

1. Identificar y describir sistemáticamente los potenciales impactos y riesgos económicos, sociales, ambientales y territoriales de un eventual desarrollo de un

programa núcleo-eléctrico en Chile en comparación con otras opciones de generación eléctrica.

2. Establecer órdenes de magnitud de los potenciales impactos y de los riesgos que involucra la generación núcleo-eléctrica en comparación con otras alternativas de generación eléctrica en Chile.

III. Alcance

A través de la recopilación de diversos estudios y fuentes de información existentes, así como de la experiencia acumulada en la energía nuclear por las instituciones rusas anteriormente mencionadas, este documento 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 la generación de electricidad, así como su comparación con otras fuentes tradicionales de generación eléctrica, incluyendo las energías renovables. En su desarrollo se abordan aspectos económicos, sociales, ambientales, institucionales y técnicos, que pueden ser usados en apoyo a la toma de decisión.

IV. Estructura

Los temas analizados en este estudio abarcan: la situación actual y perspectiva del sector de la energía en mundo y de la generación núcleo eléctrica, los tipos de reactores que actualmente se encuentran en explotación y su desarrollo perspectivo, la seguridad nuclear, el ciclo del combustible nuclear, la generación, conservación y almacenamiento de los desechos radioactivos, la ubicación de la central nuclear, los aspectos ambientales, económicos y sociales de las diferentes fuentes de energía analizadas en el estudio, así como los riesgos asociados, la regulación y el controlador.

El consultor ha estructurado el estudio en tres partes. En la primera parte, se proporciona información de carácter general que le permite al lector interiorizar diversos aspectos relacionados con la energía convencional y la de origen nuclear, con el fin de permitir en capítulos posteriores un análisis de las opciones con el mismo nivel de información y referencia. En particular, se abordan los temas relacionados con la situación actual y perspectiva que presenta el sector de la energía a nivel mundial, los recursos energéticos disponibles para cubrir el pronóstico de la creciente demanda de energía y los aspectos

medioambientales que hay que considerar en el uso de un recurso u otro para la generación de energía eléctrica. Asimismo, se describe la situación actual y perspectiva de la energía nuclear, los diferentes tipos de reactores nucleares, los suministradores principales de esta tecnología y la potencia de los bloques disponibles en el mercado internacional. La seguridad nuclear, aspecto importante en este tipo de generación, es otro de los aspectos que se aborda en el estudio. En esta parte se definen, en primera instancia, los elementos esenciales de la seguridad nuclear y los sistemas de control y protección de los reactores nucleares. Se describen las averías y las medidas para su prevención y, de manera resumida, se explican los dos únicos accidentes relevantes de la industria nucleoelectrica a nivel mundial: el de Three Mile Island, Estados Unidos (1979) y el de Chernobyl, Ucrania (1986).

Posteriormente, se trata aspectos asociados al combustible nuclear y su ciclo. Este tema se trata con este nivel de preponderancia dado que corresponde a uno de los aspectos que presenta mayores desafíos a la industria nuclear y uno de los aspectos de mayor inquietud y menores antecedentes por parte de la opinión pública. En particular, se enmarcara en los riesgos que están presentes en el ciclo del combustible nuclear, la cantidad de combustible que se utiliza, el volumen, conservación y almacenamiento de los desechos radioactivos que se genera durante su reprocesamiento y la utilización de estos últimos en el ciclo del combustible nuclear. Finalmente, se abordan los problemas relacionados con la no proliferación de los materiales nucleares y los aspectos ambientales y de seguridad del ciclo del combustible nuclear.

Por último, en esta primera parte del estudio se abordan diferentes aspectos relacionados con la Autoridad Regulador Nacional, entidad responsable ante el Estado para garantizar el desarrollo de un programa de generación nucleoelectrica con estricto cumplimiento de las normas que garantizan la seguridad operacional de este tipo de instalación. Este capítulo se redacta por especial encargo del mandante del estudio, y a juicio del consultor resulta uno de los aspectos de mayor impacto social y ambiental de un programa nuclear, dado el rol que cumple la Autoridad Reguladora Nacional, en generar externalidades en la sociedad y en el ambiente, a través del aumento de conocimiento de la radiaciones ionizantes y no-ionizantes en áreas como la salud, industria, educación, investigación y energía.

La segunda parte, se centra en el tema fundamental del estudio: la evaluación del impacto y los riesgos que posee la generación nucleoelectrica y su comparación con otras fuentes de energía: fósiles (petróleo, gas y carbón), la energía hidroeléctrica y las energías renovables no convencionales (eólica y solar). Así en el capítulo 6 se hace una comparación del impacto ambiental que tienen las diferentes fuentes de energía relacionadas con este estudio¹, se

¹ De acuerdo con el sección 6.1 tercera pleca: En el ámbito ambiental: Magnitud de las emisiones de gases de efecto invernadero que evita la generación con plantas núcleo-eléctricas, en

describe el tipo y volumen de los desechos radioactivos que se producen durante la operación de la central nuclear, su tratamiento y almacenamiento, e incluye una valoración de los riesgos ecológicos y su minimización. En el capítulo 7 se recogen los aspectos fundamentales relacionados con la selección del emplazamiento², aspecto que está directamente relacionado con impactos de tipo ambiental, social y económico de la región donde se decida la construcción de una central nuclear.

Los aspectos económicos vinculados con la opción nucleoelectrica y su comparación con otras formas de generación de electricidad serán presentadas en el capítulo 8 del estudio³. Este capítulo responde a la inquietud del mandante de investigar acerca de los costos de producción de la generación núcleo-eléctrica. La participación de la industria nacional en el desarrollo de la núcleo-energía, la innovación tecnológica y el uso de la energía nuclear en otras actividades industriales son parte del análisis que se presenta, reflejando los principales impactos sociales de la energía nuclear en el país que la decide implementar.

Un papel importante durante todas las etapas de un programa de desarrollo nucleoelectrico, lo constituye la disponibilidad y preparación del personal. Así, en el capítulo 9 se presenta la cantidad y especialidades que son necesarias durante la construcción y en la operación de una central nuclear, así como su comparación con otras formas de generación de electricidad⁴. La calificación y recalificación del personal durante la operación en un centro

comparación con plantas generadoras convencionales, medidas en toneladas de CO2 equivalentes evitados por cada millón de kWh generado por las plantas núcleo-eléctricas.

- ² De acuerdo con el punto 6.1 cuarta pleca: En el ámbito territorial: Magnitud del área de influencia de las plantas núcleo-eléctricas comparada con plantas generadoras convencionales y CG-ERNC.
- ³ De acuerdo con el sección 6.1 primera placa de los términos de referencia de la licitación: En el ámbito económico: Participación que la generación núcleo-eléctrica puede tener en la matriz energética del sector eléctrico de Chile. En particular, el Consultor realizará una comparación del costo anual promedio de producción del kWh núcleo-eléctrico estimado para diversos tipos y tamaños de plantas nucleares vis-a-vis centrales generadoras convencionales y centrales generadoras que utilizan energías renovables no convencionales (CG-ERNC), tomando en cuenta los costos de inversión (considerando tiempos de construcción), operación, combustible, desmantelamiento y vida útil y factor de planta anual con un costo de oportunidad del dinero de 10% anual.
- ⁴ De acuerdo con el sección 6.1 segunda pleca de los términos de referencia de la licitación: En el ámbito social: Beneficios para el país que un programa núcleo-eléctrico y la introducción de la tecnología nuclear pueden tener sobre la seguridad del servicio eléctrico, el desarrollo y empleo de los recursos humanos (académicos, profesionales, trabajadores en general) y sobre las oportunidades de innovación para la industria nacional.

de entrenamiento propio de la central con simulador a plena escala del bloque. Este capítulo refleja la alta especialización que deben poseer los recursos humanos que están vinculados al desarrollo de un programa de este tipo, siendo este tema otro de los grandes aportes e impactos a la sociedad de la industria nuclear, y al mismo tiempo uno de los mayores riesgos si el país no es capaz de desarrollar u obtener dichos recursos humanos a tiempo.

Con una evaluación del impacto social y la calidad de vida de la población en las cercanías del emplazamiento de la central nuclear se presenta el capítulo 10⁵. Incluye además un análisis de la influencia de la central nuclear en la salud de la población, una comparación con otras fuentes de generación de electricidad así como, las vías para la minimización de los riesgos.

En la tercera parte del informe se presentan las conclusiones del estudio y una tabla resumen con la presentación de la comparación de los impactos ambientales, económicos y sociales de las diferentes fuentes de energías analizadas en el estudio, así como los riesgos vinculados a cada una de estas fuentes⁶.

V. Metodología utilizada

En el desarrollo de este estudio se utilizan los conceptos de impacto y riesgo. Estos conceptos se definen como:

- **Impacto:** técnicamente, es la alteración de la línea de base (medioambiente), debido a la acción antrópica o a 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.

Para la realización de este estudio se utilizaron los siguientes puntos de partida:

⁵ Ídem a la referencia anterior.

⁶ De acuerdo con el sección 6.2 de los términos de referencia de la licitación: El Consultor entregará un inventario de los riesgos que plantea un programa núcleo-eléctrico y de los costos de la mitigación de sus posibles impactos en los ámbitos económicos, sociales, ambientales y territoriales, los describirá en detalle, elaborará indicadores para medirlos, y los comparará con los riesgos de otras fuentes de generación eléctrica.

- 1) Las fuentes de generación de electricidad que se serán comparadas con la nucleoelectrónica son:
 - Carbón
 - Gas Natural
 - Petróleo
 - Hidráulica (solo embalses)
 - Energías renovables no convencionales: Solar y Eólica
- 2) Para todas estas tecnologías se evaluará el equivalente a una potencia instalada total de 1.000 MW.
- 3) Como la tecnología base para ser utilizada por la generación nuclear, se considero el reactor de agua ligera a presión (LWR). Esta selección se debe a que, según datos del OIEA, a Julio del 2008, 265 reactores (60%) de los 439 en operación actualmente son de esta tecnología, por lo que se considera la mas expandida en el mundo. En caso de que fuera necesario, se destacará cuál diferencia que existiera con el resto de las tecnologías para este tipo de generación.

VI. Usuarios

Este estudio será de interés para los que establecen políticas y analistas en los sectores energéticos, económicos, políticos y científicos, los formadores de la opinión pública, así como aquellos miembros de la comunidad interesados en la temática energética, especialmente en la generación núcleo-eléctrica.

Preámbulo

En la actualidad con el crecimiento de la población y el rápido desarrollo de la economía de los países, el papel del complejo de combustible y energía, que es la base de la producción y el crecimiento del bienestar público de los pueblos, son factores que tienen una importancia muy significativa. El hecho de que la humanidad llegó a tener en su disposición grandes cantidades de la energía aseguró en parte considerable los avances de la industrialización y el desarrollo de la sociedad. Sin embargo, la generación de energía eléctrica, solamente en base a fuentes de energías fósiles, se ha hecho peligrosa. Además de los impactos locales medioambientales que se acompañan de la contaminación del aire, el agua y el suelo, hay un peligro en el cambio del clima mundial, a causa del efecto invernadero.

Es evidente que no puede sostenerse que existe alguna fuente energía sin impactos para el medio ambiente. El uso de cada tecnología se acompaña, inevitablemente, de la contaminación térmica del medioambiente, la polución atmosférica con las sustancias tóxicas y CO₂ y la desfiguración de los campos electromagnéticos naturales.

La comunidad mundial está ante el dilema: por un lado, sin energía eléctrica es imposible asegurar el bienestar de la sociedad y, por otro lado, el mantenimiento de los ritmos actuales del crecimiento de su producción a base de las fuentes tradicionales puede llevar a la destrucción del medioambiente, lo cual traería como consecuencia un violento descenso en la caída del nivel de vida, cambios serios en los ecosistemas e incluso daños insospechados en la población humana, como eventuales influencias sobre el código genético.

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 nuevas categorías de riesgo son el resultado de los procesos tecnológicos, indudablemente. En la actualidad esta es una preocupación prioritaria: el desarrollo de cualquier nueva tecnología se acompaña no sólo por la evaluación de las ventajas económicas correspondientes, sino que también conlleva el análisis de los riesgos y las consecuencias negativas que podrían surgir del proceso.

Por eso determinar los niveles de “riesgo aceptable” representa un problema muy difícil, tanto económico, político y social, como tecnológico.

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 nuestra opinión el criterio más acertado es el de tolerancia del riesgo: el riesgo aportado con la aplicación de la nueva técnica puede considerarse socialmente aceptable si uno de los efectos finales útiles del uso de la nueva técnica es la reducción del riesgo sumario al que se somete la gente. Si resulta que el riesgo adicional aportado por la nueva técnica no se compensa por la disminución adicional de otros riesgos y, por el contrario, el riesgo en total crece, es razonable considerarlo como socialmente inaceptable y se deben introducir medidas adicionales de seguridad o bien rechazar por completo su aplicación.

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 de los contaminantes, quiere decir que la evaluación debe hacerse en base a un enfoque integral, tomando en cuenta los siguientes factores:

- El daño aceptable al medioambiente, tomando en cuenta la reducción de eficiencia de la tecnología.
- La influencia de la variación de los parámetros de la tecnología en el proceso de producción.
- Los gastos crecientes para fines de reconstitución y mantenimiento de la calidad del medioambiente y la renovación de sus recursos.
- Las pérdidas de la sociedad causados por daños a la salud de las personas.
- Las pérdidas del trabajo invertido en la parte no utilizada y por lo tanto la devolución al medioambiente de los recursos en forma de energía y recursos degradados.

La crisis energética mundial marcó una etapa de cambio radical en las opiniones sobre la opción nuclear para la generación de electricidad. En la actualidad es ampliamente reconocido el hecho de que entre todos los problemas vinculados al desarrollo de la energía nuclear - económicos, políticos, sociales, técnicos -los más complicados son los asociados al riesgo y al pronóstico de las consecuencias biológicas del impacto de los radionúclidos en el medioambiente.

Conforme al concepto de riesgo admisible, si el valor del riesgo por cualquiera actividad es superior al valor aceptable, dicho riesgo ha de ser reducido. En caso contrario tal actividad debe ser prohibida. En calidad del valor admisible del riesgo individual de tal o cual

actividad para la población, varias organizaciones internacionales y nacionales proponen aceptar el valor de $1 \cdot 10^{-6}$ (un evento por 1.000.000) al año, el cual se corresponde con el riesgo de pérdida por causa de cataclismos. Tal riesgo no implica habitualmente objeciones por parte de la sociedad.

La comparación entre el valor recomendado de riesgo admisible $1 \cdot 10^{-6}$ por año y el valor de riesgo para la población de la operación de la Central Nuclear, que representa $0,2 \cdot 10^{-6}$ por año, se ajusta a estas exigencias de seguridad.

En función del valor del riesgo la actividad profesional se clasifica por su grado de seguridad (Tabla 1.)

Tabla 1- Clasificación de las condiciones de actividad profesional

Categoría	Condiciones de la 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 condiciones de la actividad profesional en distintas industrias, especialmente en las nuevas ramas productivas y sobre esta base juzgar del riesgo adicional vinculado al nuevo tipo de la actividad profesional.

La investigación realizada del análisis de las ventajas y los riesgos del uso de la energía nuclear, su lugar y su papel en el equilibrio energético de los principales países será examinada detalladamente en este estudio.

Parte I

Consideraciones de carácter general

En esta primera parte del estudio recoge la información relacionada con la situación del sector de la energía en el mundo y las diferentes fuentes de energía con que se cubre la demanda actual y perspectiva, los aspectos fundamentales para comprender lo que significa la industria nuclear en el mundo y se brinda la experiencia que posee la Federación de Rusia en más de 50 años de construcción y operación de centrales tanto en internacional como nacional.

Esta parte contiene 5 capítulos: Energía, Energía Nuclear, Seguridad Nuclear, Ciclo del Combustible Nuclear y la Autoridad Reguladora Nacional.

Capítulo 1

Energía

1.1. La situación energética mundial

En menos de un año el ritmo de la economía internacional, que parecía ser capaz de mantenerse indefinidamente creciendo de manera sostenida hacia la prosperidad, sufrió uno de los colapsos más graves de la historia. Hasta antes de eso cada vez más países se sumaban a la senda de un rápido desarrollo, y consecuentemente, el consumo de energía crecía. Pero la llegada de la crisis financiera mundial ha cambiado radicalmente la situación. La economía de la mayoría de las naciones se encontró de pronto en condiciones muy severas, con déficit de medios financieros, desempleo elevado y evidentes signos de recesión.

Es evidente el hecho de que la energía no es sólo la base de la economía moderna, sino también de la misma civilización moderna. Ninguna economía puede desarrollarse sin disponer de adecuadas fuentes de energía y esto no depende ni del sistema político, ni del nivel del desarrollo del país. Tal declaración es justa para la economía planificada, así como para la economía de mercado, para los países desarrollados y en vías de desarrollo.

En este contexto otra vez surge la antigua pregunta respecto a la racionalidad de las decisiones políticas y la responsabilidad del Estado en el bienestar de la población, teniendo en cuenta que el aumento de la eficiencia energética y el ahorro de este recurso pueden contribuir al descenso del consumo específico de determinadas fuentes de generación, pero no al descenso del consumo en cifras absolutas.

Para los países desarrollados de Occidente el abastecimiento regular a partir de diversas fuentes energéticas es una condición clave para la conservación de su economía y el alto nivel de vida alcanzado. Para los países en vías de desarrollo de Asia y América del Sur es una condición necesaria para su crecimiento progresivo y el aumento del nivel de vida de su población. Debido a esto, la seguridad energética siempre fue y será un objetivo fijo de atención política y de planificación estratégica. En el encuentro del G-8 en San Petersburgo, Rusia, realizado en julio de 2006⁷, este tema fue central, vinculado además con el cambio dramático de la situación mundial, evidenciado en que el desarrollo de los recursos básicos

⁷ Declaración de los Presidente del “Grupo de los 8”, San Petersburgo 17 Julio del 2006.

se retrasa fuertemente en comparación con la dinámica de la demanda, tendencia que se manifiesta de manera más contundente en el mercado del petróleo.

En realidad, el mundo ha entrado en una crisis energética de escala global cuya solución no es evidente, ya que mientras el consumo va siempre en aumento, las posibilidades de las tecnologías disponibles y los recursos naturales son objetivamente limitadas. Está claro que es necesario unir el equilibrio energético con la producción de combustibles y el consumo. En caso contrario, los países desarrollados no podrán conservar el nivel de desarrollo que hoy ostentan y aquellas naciones en vías de desarrollo verán truncadas las esperanzas de lograr sus objetivos.

A excepción del último año (2008), a lo largo de algunas décadas la demanda de fuentes energéticas en el mundo creció a ritmos por encima de las posibilidades de la oferta. La mayoría de los analistas de este sector predicen que continuará este crecimiento, basados en el crecimiento de las economías emergentes y en que continúa, aunque a un ritmo más moderado, el crecimiento de la demanda de fuentes energéticas en los países desarrollados. Por ejemplo, según los datos de la Agencia Internacional Energía (AIE), hacia 2030 la demanda global de fuentes energéticas crecerá en el mundo más de un 50 % (Figura 1.1). Al mismo tiempo, el crecimiento de la oferta en los mercados mundiales disminuirá.

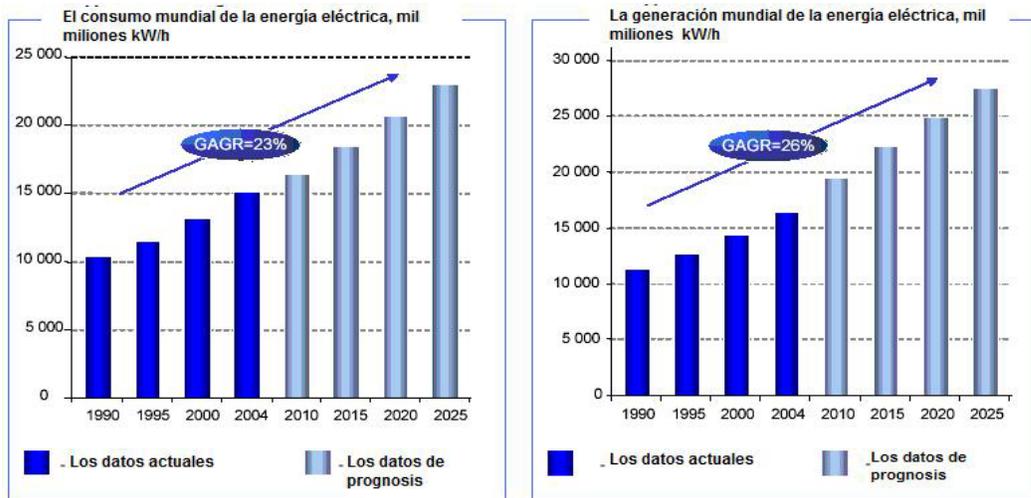


Figura 1.1 - Consumo y producción mundial de energía eléctrica (mil millones KW/h)⁸.

⁸ Energy Information Administration, International Energy Outlook 2007

El resultado del desbalance surgido entre demanda y oferta es el rápido crecimiento de la tasa de precios de los hidrocarburos en los últimos años, con un nivel máximo en el verano del 2008 (ver Tabla 1.1). Su ulterior caída, en relación a la actual crisis financiera internacional en la segunda mitad de 2008, ha obligado a los países exportadores de energía a iniciar una considerable disminución de los volúmenes de suministros para lograr, en un futuro cercano, nuevas alzas sostenidas en su precio, ya que precios inestables constituyen una amenaza, tanto a la economía mundial en su totalidad como a cada país por separado.

Tabla 1.1 - Dinámica de precios por tipo de combustible básico desde el 2003 a septiembre de 2008⁹.

Combustible	2003	2004	2005	2006	2007	2008			
						I Sem.	Jul.	Ago.	Sep.
Petróleo medio ponderado (APSD*, (USD/barr.)	28,90	37,73	53,39	64,29	71,12	108,14	132,83	114,57	99,66
Gas natural, medio ponderado, Europa, Frontera Francesa (USD/MMBTU)	3,91	4,28	6,33	8,47	8,56	11,63	14,37	14,64	14,85
Carbón, FOB Newcastle, Australia, (USD/t)	27,84	52,95	47,62	49,09	65,73	126,33	180,0	158,40	150,0
Concentrado Uranio U₃O₈ (USD/libra)**	11,20	18,00	27,90	47,70	99,20	71,25	61,80	64,50	63,00

**En base a las cotizaciones medias diarias: Brent, Dubái y medio de Texas Occidental en partes iguales.*

*** Por transacciones sencillas de la compañía norteamericana Nuexco.*

⁹ World Bank, Washington D. C., Development Prospects Group (Release), October 8, 2008

El número de países y regiones del mundo que no cuenta con suministros energéticos propios aumenta, es decir, hay un incremento en las desproporciones energéticas regionales. En 1990 estos países constituían el 87% del PIB mundial, cifra que a principios del siglo XXI creció al 90%. Además, el crecimiento más grande en cuanto a la dependencia de importación de energía se presenta en naciones que se desarrollan muy rápidamente, como es el caso de China o India, por ejemplo. (Ver Figura 1.2 y 1.3)¹⁰.

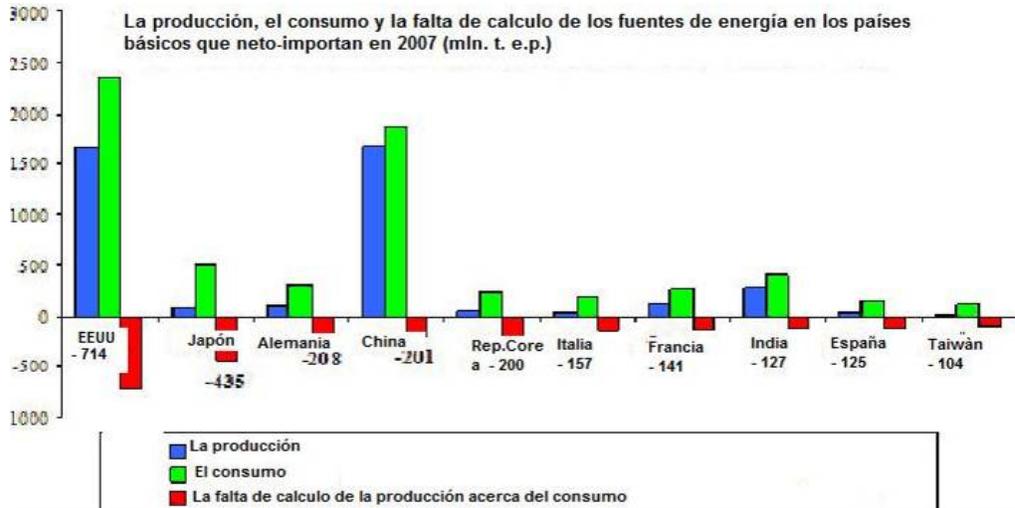
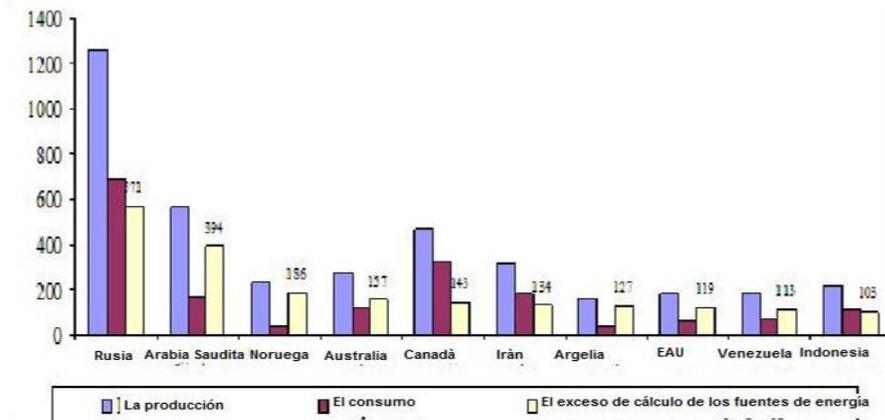


Figura 1.2 - Producción, consumo y exceso de recursos energéticos netos a 2007, en los países exportadores (MM. Ton.).



¹⁰ BP Statistical Review of World Energy, June 2008

Figura 1.3 - Producción, consumo y falta de cálculo de las fuentes de energía en los países importadores.

Frente a la mayoría de los países, en uno u otro nivel, está el problema de contar con un suministro estable de energía. En la mencionada cumbre del G-8 en San Petersburgo se propuso una serie de soluciones alternativas, entre estas, el desarrollo a gran escala de la energía nuclear.

En el ámbito científico-técnico moderno la solución al problema de la seguridad energética estatal por medio del desarrollo de la energía nuclear aparece como la alternativa más conveniente, considerando los problemas globales como el cambio climático y el agotamiento de los recursos. La intención de ir por esta vía ya ha sido declarada por diferentes países, entre ellos China, India, Bielorrusia, Argentina, Estados Unidos, Finlandia, Bulgaria, Turquía y Eslovaquia, incluyendo a naciones que aún hoy son grandes exportadores de petróleo, como Rusia e Irán.

Cualquier decisión, especialmente a gran escala, de iniciar un programa núcleo energético propio, exige un análisis exhaustivo de las variables riesgo/beneficio, sobre la base del estudio de la experiencia de otros países en la ejecución de iniciativas semejantes.

1.2. Los recursos energéticos

Los recursos energéticos que se encuentran actualmente a disposición de la humanidad pueden dividirse en cuatro categorías:

1. **Fuentes orgánicas renovables:** madera, turba, algunos cereales aptos para la elaboración de combustibles como por ejemplo, alcohol etílico o metanol.
2. **Fuentes orgánicas no renovables (fósiles):** carbón, gas natural y petróleo.
3. **Fuentes renovables:** luz y calor solar, energía del viento (eólica), energía de las olas del mar, corrientes de río, calor geotérmico, gradientes oceánicos de temperatura.
4. **Fuente nuclear:** uranio, plutonio y torio.

La Figura 1.4 muestra el crecimiento de la demanda proyectada hacia el 2020 de recursos energéticos mundiales a partir de las últimas décadas¹¹

¹¹ Risks and Benefits of Nuclear Energy, OECD, NEA, 2006

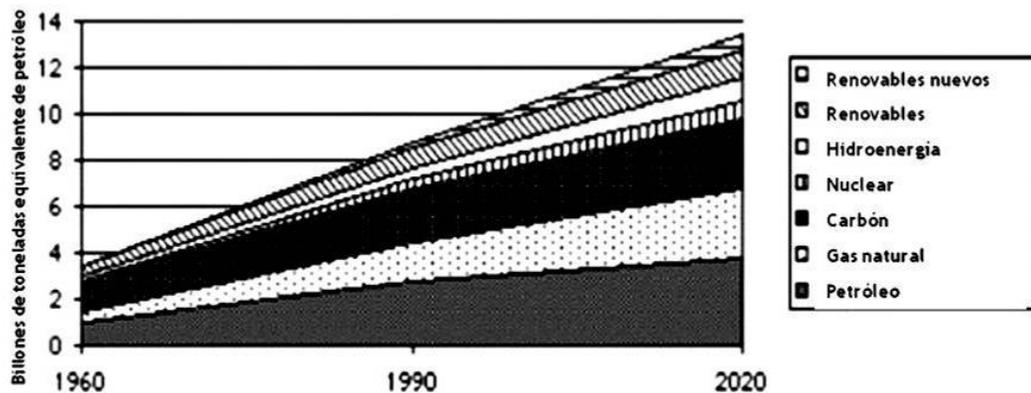


Figura 1.4 - Crecimiento en la demanda de recursos energéticos en el mundo.

Los recursos energéticos, como base para la generación de energía eléctrica, desde el punto de vista del riesgo/beneficio, deben satisfacer los siguientes criterios:

- **Atractivo Económico:** el combustible, en la manera de lo posible, deber ser barato al igual que la energía producida.
- **Seguridad de los recursos:** las reservas de combustible deben ser considerablemente grandes y cumplir con las necesidades para el desarrollo constante a largo plazo.
- **Accesibilidad de transporte:** No siempre es posible construir centrales eléctricas en las cercanías de los yacimientos, por ello, el combustible debe tener beneficios para su transporte y almacenamiento.
- **Utilidad industrial:** es deseable que el combustible sirva solamente para la combustión. Así, por ejemplo, el gas natural y el petróleo, al igual que los productos de refinación del petróleo, son demasiados valiosas para utilizarlos como combustible de caldera. Hasta el uso de la turba, para estos mismos objetivos, se reduce cada año, ya que la turba es un excelente fertilizante y una sustancia que influye de manera muy favorable en la estructura del suelo.
- **Seguridad tecnológica:** el actual nivel del desarrollo de la tecnología debe proveer una suficiente seguridad, tanto en situaciones de operación normal como en situaciones de emergencia.
- **Ecología de los desechos:** los desechos originados por la utilización del combustible deben generar un nivel mínimo de contaminación del medioambiente. Del mismo

modo, en las últimas décadas se ha comenzado a hablar sobre la exigencia de no influir en el calentamiento global del planeta.

La Figura 1.5 muestra la producción de energía primaria y el suministro mundial de energía¹².

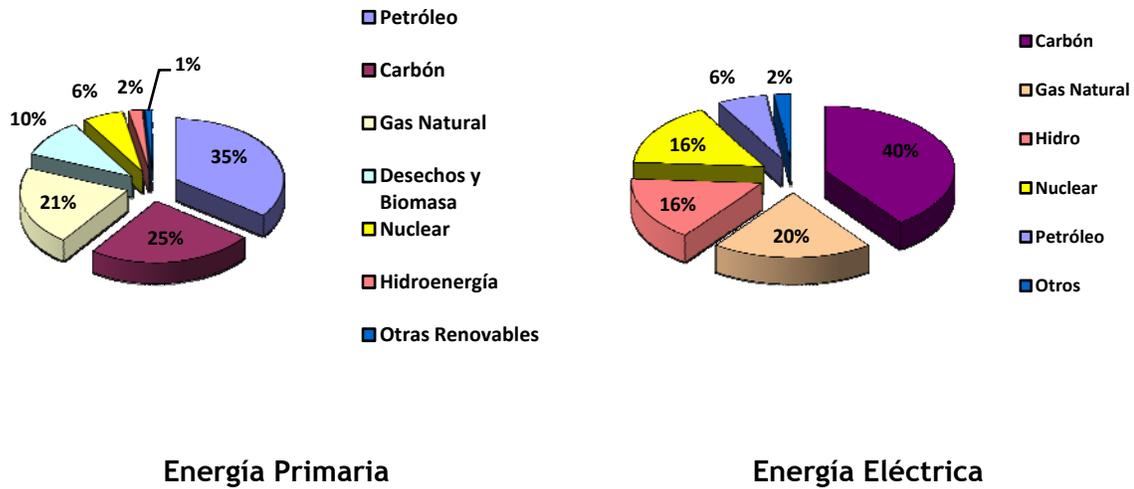


Figura 1.5 - Producción de energía primaria y suministro mundial de energía.

1.2.1. Recursos no renovables

Según su estructura, los recursos de energéticos no renovables (Carbón, Gas natural y Petróleo) se pueden separar en generales y extraídos. Es prácticamente imposible obtener y utilizar todo el combustible ubicado en el yacimiento. El coeficiente de extracción depende del tipo de combustible, el carácter del yacimiento y la técnica de extracción. Este coeficiente para el carbón es de 0.25 - 0,5 (entre los yacimientos de carbón hay muchas capas delgadas, que se encuentran muy profundo bajo la tierra); para el gas natural es de 0,5 - 0,8, y para el petróleo es de 0,3 - 0,4. La cantidad general de recursos orgánicos de combustible extraídos de la Tierra (carbón, gas natural y petróleo juntos) es estimada en 4.000 billones de teratoneladas.

En el año 1980 el consumo de todos los tipos de recursos energéticos, por parte de todos los países del mundo, fue de alrededor de 10 billones de teratoneladas y en el 2000, alrededor

¹² Risks and Benefits of Nuclear Energy, OECD, NEA, 2006

de 20 billones de teratoneladas. Estas cifras, de acuerdo a una serie de pronósticos, indican que las reservas de combustible orgánico alcanzarán solo por un tiempo limitado

A continuación se revisa cada una de de estas tres fuentes de energía no renovable, según sus características principales, yacimientos y dinámica de precios.

1.2.1.1. Carbón

El carbón es un combustible sólido de origen vegetal, procedente de eras geológicas remotas (hace 345 millones de años) en las que grandes extensiones del planeta estaban cubiertas por una vegetación abundante que crecía en pantanos. Al morir las plantas quedaban sumergidas por el agua poco a poco se descomponían. Con el paso del tiempo, la arena y el lodo fueron acumulándose sobre estos sedimentos y la presión de las capas superiores, los movimientos de la corteza terrestre y el calor volcánico, comprimieron y endurecieron los depósitos hasta formar carbón.

Los diferentes tipos de carbón se clasifican según su contenido de carbono fijo. La turba, la primera etapa en la formación de carbón, tiene un bajo contenido de carbono fijo y un alto índice de humedad. El lignito, el carbón de peor calidad, tiene un contenido de carbono mayor. El carbón bituminoso tiene un contenido aún mayor, por lo que su poder calorífico también es superior. La antracita es el carbón con el mayor contenido en carbono y el máximo poder calorífico. La presión y el calor adicionales pueden transformar el carbón en grafito, que es prácticamente carbono puro. Además de carbono, el carbón contiene hidrocarburos volátiles, azufre y nitrógeno, así como diferentes minerales que quedan como cenizas al quemarlo. En promedio, durante la combustión de un kilogramo de diferentes variedades de carbón se liberan 20-34 Mega Julios de energía térmica. Esto es poco en comparación con el petróleo y el gas natural. Sin embargo, el carbón es el combustible más usado para la producción de energía eléctrica y en la actualidad es la fuente del 40% de la electricidad en todo el mundo. Sus reservas constituyen $\frac{1}{4}$ de todos los recursos energéticos mundiales, como se pudo apreciar en la Figura 1.5

Las ventajas del carbón como combustible se basan principalmente en su universalidad: se puede usar en cualquier clima, en centrales eléctricas de cualquier potencia y hasta en calderas individuales. Por contrapartida, su principal desventaja es el alto nivel de contaminación atmosférica que entraña su combustión, que libera al medioambiente anhídrido sulfuroso, cenizas volantes, hollines, metales pesados y óxidos de nitrógeno.

Una prueba del alto grado de contaminación que genera el carbón la entregó recientemente el estudio titulado “La combustión del carbón deja un legado tóxico de metales pesados en el Ártico”, llevado a cabo por el Desert Research Institute (DRI) de Nevada, Estados Unidos. Mediciones detalladas de un núcleo de hielo extraído en Groenlandia revelaron la presencia de agentes contaminantes como resultado de la combustión del carbón. Se trata de elementos tóxicos como el cadmio, el talio y el plomo, a niveles mucho mayor de los que se esperaba, dado el descenso sostenido en la utilización de este combustible durante la última década, sumado al hecho de que se han elaborado diversas nuevas tecnologías para su combustión destinadas a minimizar el daño al medioambiente.

Lo cierto es que el “carbón limpio” no existe. Peor aún, se trata de la principal fuente de contaminación de mercurio del planeta y también del causante número uno del calentamiento global. Además, la explotación minera del carbón destruye millones de hectáreas de tierras y contamina o destruye miles de kilómetros de corrientes de agua. Las emisiones de las centrales a carbón pueden provocar ataques de asma en los niños y están relacionadas con enfermedades respiratorias que provocan incapacidad y muerte.

Por otra parte, el azufre y el nitrógeno del carbón producen óxidos durante la combustión que contribuyen a la formación de lluvia ácida.

Si bien es cierto, que la eficiencia de las centrales eléctricas de carbón modernas ha mejorado, esto ha sido a cambio de aumentar sus costos de producción, básicamente por el uso de tecnologías especiales para la captura de sus principales contaminantes. La extracción de carbón en grandes canteras es relativamente barata, pero los gastos para su transporte a grandes distancias aumentan considerablemente su precio, lo cual indudablemente aumentará el valor de la energía producida.

El carbón se encuentra en casi todas las regiones del mundo, pero en la actualidad los únicos depósitos de importancia comercial están en Europa, Asia, Australia y América del Norte.

La distribución geográfica de las reservas mundiales de carbón y su extracción se muestran en ver Tabla 1.2¹³, mientras que la dinámica de los precios de este recurso se explica en la Figura 1.6¹⁴.

Tabla 1.2 - Distribución geográfica de las reservas de carbón y su extracción.

¹³ Risks and Benefits of Nuclear Energy, NEA, OECD, 2006

¹⁴ BP Energy Statistics, 2008

País	% reservas comprobadas	% extracción (año 2005)
Australia	8,5	7
Polonia	1,5	2,5
Estados Unidos	27	20
Total Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OCED).	4	35
República Sudafricana	5,5	5
China	12,5	38,5
India	10	7
Kazajstán	3,5	1,5
Federación de Rusia	17,5	4,5
Ucrania	4	1,5

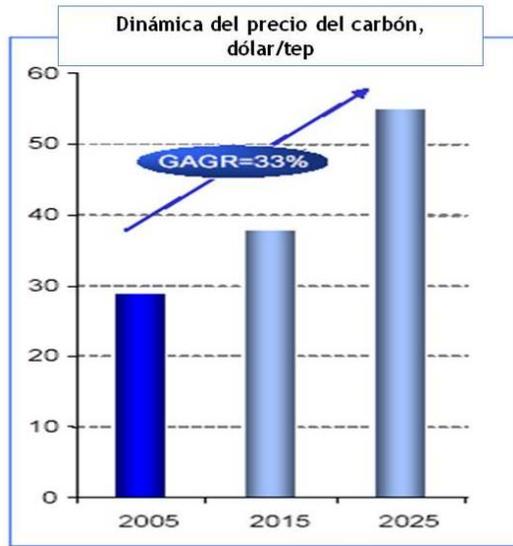


Figura 1.6 - Dinámica de precios del carbón (\$ /toneladas del equivalente de petróleo).

1.2.1.2. Gas natural

El gas natural también es un recurso importante para la energía eléctrica mundial. En el año 2004 su parte en la producción internacional constituía alrededor de un 20%, índice que aumenta de manera constante (ver Tabla 1.3)¹⁵.

El uso del gas natural provoca una contaminación menor en la atmósfera en relación al carbón, por eso es que algunos países ya tomaron la decisión de sustituir el carbón como combustible por gas natural. Se puede extraer del suelo, transportar de manera relativamente fácil por medio de gasoductos a grandes distancias y conducirlo de esa manera a localidades lejanas (de esta forma se abastece gran parte de los países de Europa). Tiene también la cualidad de transformarlo en líquido para su transporte en embarcaciones marítimas. El calor específico producido por la combustión del gas es igual al petróleo (44-46 Mega Julios/Kg.).

Tabla 1.3 - Distribución geográfica de las reservas del gas natural y su extracción.

País	% reservas comprobadas	% extracciones

¹⁵ Risks and Benefits of Nuclear Energy, OECD, NEA, 2006

		(año 2005)
Estados Unidos	3	19
Total OECD ¹⁶	8,5	39
Venezuela	2,5	1
Argelia	2,5	3
Nigeria	3	1
Irán	15	3
Qatar	14,5	1,5
Arabia Saudita	4	2,5
Federación de Rusia	26,5	21,5

Pese a sus ventajas, hay que recordar que se trata de un recurso no renovable. Su uso a gran escala para la generación de energía eléctrica, especialmente en lugares donde otros modos de generación son posibles, puede traer problemas en el futuro si se extralimita su explotación.

Además, es muy probable que el papel excepcional del gas natural como combustible para la producción de energía traiga un aumento de su costo en el futuro cercano. En este contexto la tendencia es que el recurso sea cada vez menos competitivo para la producción de energía eléctrica.

La dinámica de precios del gas natural, proyectada al año 2030, se muestra en la Figura 1.7¹⁷.

¹⁶ OECD: Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OCE)

¹⁷ BP Energy Statistics, 2008

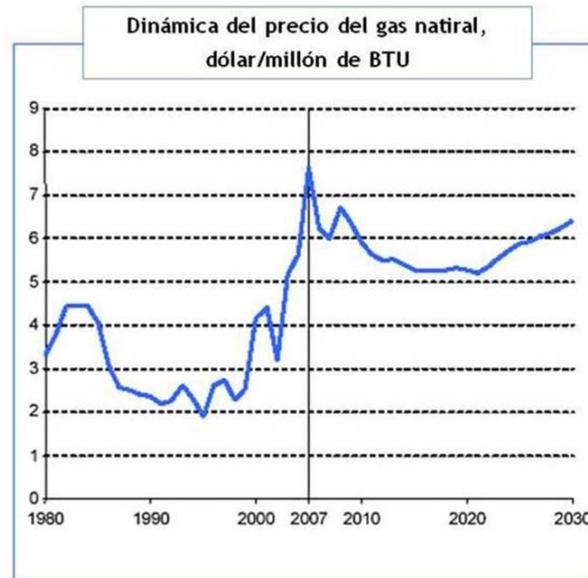


Figura 1.7 - Dinámica de precios del gas natural desde 1980 y proyección a 2030.

1.2.1.3. Petróleo

En el año 2004 el petróleo abastecía el 6 % de toda la producción mundial de energía eléctrica y todavía hoy en algunos países se utilizan grandes cantidades de petróleo con este objetivo. Los méritos del petróleo como combustible consisten en su alto calor específico durante el proceso de combustión, entre 44-46 Mega Julios/Kg., así como la simplicidad de su transporte. A pesar de que su precio ha disminuido en la actualidad, la tendencia mundial demuestra que el petróleo se hace cada vez más caro y necesariamente debe ser desplazado por otros tipos de fuentes de energía (ver Figura 1.8)¹⁸.

Sin embargo, el petróleo, al igual que el gas natural, es importante para otros usos, como por ejemplo, es el combustible por excelencia para el transporte cualquiera este sea y sirve de materia prima en la producción de plásticos y productos farmacéuticos. Por eso, en las regiones donde hay posibilidades económicamente justificadas para recurrir a otros combustibles, los productos de refinación del petróleo no se utilizan para la generación de energía eléctrica (ver Tabla 1.4).

¹⁸ IEA, World Energy Outlook, 2006

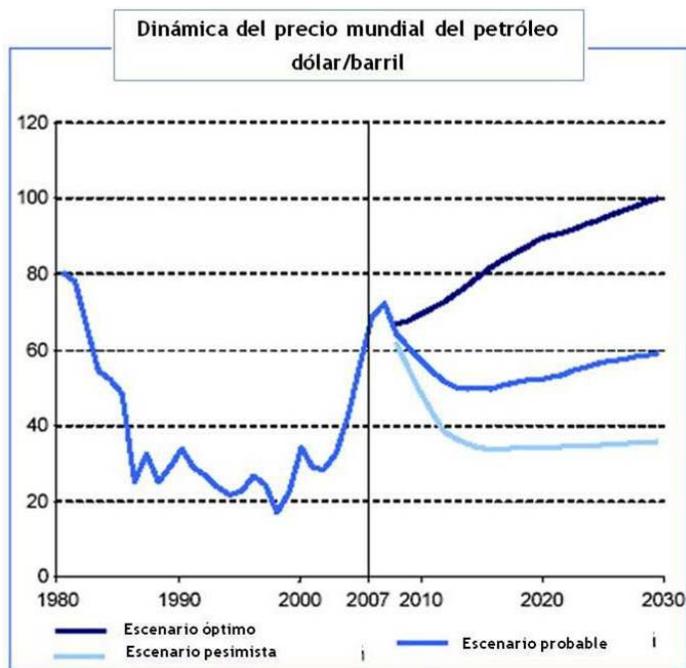


Figura 1.8 - Dinámica de los precios mundiales del petróleo.

Tabla 1.4 - Distribución geográfica de las reservas del petróleo y su extracción¹⁹.

País	% reservas comprobadas	% extracciones (año 2005)
Estados Unidos	2,5	3
Total Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OCED)	6,5	24
Venezuela	6,5	4
Libia	3,5	2
Nigeria	3	3

¹⁹ Risks and Benefits of Nuclear Energy, OECD NEA, 2006

País	% reservas comprobadas	% extracciones (año 2005)
Irán	11,5	5
Irak	9,5	2,5
Kuwait	8,5	3,5
Arabia Saudita	22	13,5
Emiratos Árabes Unidos	8	3,5
Kazajistán	3,5	1,5
Federación de Rusia	6	12

Otro hecho importante a tener en cuenta es que si bien desde los años 70 existe una política de conservación de las reservas naturales de petróleo crudo, los pronósticos recientes indican que en un plazo de 50 años más se agotarán todos los recursos de combustible orgánico, a excepción el carbón.

1.2.2. Recursos renovables²⁰

Las tecnologías que ponen al servicio del hombre las fuerzas de la naturaleza son conocidas desde hace mucho tiempo. De acuerdo con la opinión difundida, el uso de las fuentes renovables de energía es limpia para el medioambiente, ya que no está vinculada a la combustión de material orgánico y ni acompañada por el manejo de elementos radioactivos. La energía del sol, del viento, las olas, las aguas fluviales, la biomasa y los flujos de calor geotérmico de la Tierra son accesibles en cualquier momento. Sus reservas no dependen, en general, de la actividad del hombre.

Sin embargo, al examinar todas las etapas del ciclo de la generación de la energía eléctrica con el uso de fuentes renovables de energía, queda demostrado que las influencias nocivas no serán menores en comparación con las tecnologías tradicionales. Esto se debe a que las

²⁰ Ageev V.A., Fuentes no tradicionales y renovables de energía, Editora Universidad Saratov, Rusia, 2007.

fuentes renovables de energía tienen un factor de planta bajo en comparación con los combustibles fósiles y el combustible nuclear. En ciertas ocasiones - tema que aun está en discusión y en evaluación por parte de autoridades en la materia y el mundo científico - la obtención y operación de estas fuentes pueden tener impactos ambientales contrarios a lo esperado.

La verdad es que energía de fuentes renovables no necesariamente significa limpia, tampoco nulo impacto ambiental, ni seguridad de suministro y parece olvidarse que todo proyecto conlleva impactos. Los grandes proyectos de energía hidráulica, por ejemplo, están relacionados con la migración, la pérdida de los hábitats, el cambio del nivel de las aguas subterráneas y régimen de lluvia. En el caso de las celdas fotoeléctricas y los acumuladores, una parte considerable de los materiales usados son tóxicos y es necesario enfrentar como dicha industria se hará cargo de enfrentar el cierre de dichas plantas. Las fuentes geotérmicas frecuentemente están acompañadas de la eliminación de metales pesados, que pueden caer en aguas subterráneas, así como el riesgo de extinción del recurso geotermal si es mal manejado. Las instalaciones eólicas crean interferencias acústicas y electromagnéticas con posibles daños a la salud, que constituyen también obstáculos para la radiocomunicación. Se conocen casos en que el efecto de los aerogeneradores provoca el desvío de los pájaros hacia otras rutas en su migración y, en consecuencia, esto provoca cambios en los ecosistemas o una disminución de las cosechas en la región.

De todas las fuentes renovables de energía conocidas, para la generación de energía eléctrica a escala industrial solo se utiliza la hidráulica. La energía solar se usa cada vez más para suplir necesidades de calefacción y agua sanitaria, y puede tener un importante nicho de desarrollo en el futuro en dicha área.

La biomasa - por ejemplo, restos de la caña de azúcar, los desechos de la industria forestal y agrícola - es quemada para la obtención de energía. Incluso de algunos tipos de biomasa se puede obtener combustible para el transporte. Sin embargo estas formas aun dan una contribución pequeña a la generación de energía eléctrica mundial por ser tecnologías en desarrollo y resulta necesario monitorear su desarrollo para ver su efectividad real fuera de laboratorio. De más está decir, que la implementación práctica de proyectos emblemáticos en biomasa de la industria de celulosa ha resultado controversial en Chile y han sido cuestionados ambientalmente en el proceso.

Además, a pesar de la relativa accesibilidad y la amplia difusión de las fuentes renovables de energía, el pronóstico de su aplicación y resultados sigue siendo inestable e insuficiente. Esto significa que para su uso seguro es necesario fuentes que dupliquen la energía eléctrica o métodos que permitan la formación de grandes reservas. A excepción de la energía

hidráulica en la actualidad no existe ningún otro modo de la acumulación de la energía a gran escala.

A continuación se revisarán las principales características de las fuentes más difundidas de energía renovables.

1.2.2.1. Energía solar

“Solar sí, nuclear no”, es la consigna popular de distintos movimientos ecologistas que abogan por el uso directo del calor del sol. Aunque el costo de la energía eléctrica producida por las celdas solares es bastante baja, el camino para el aumento de su eficiencia hasta niveles económicamente aceptable es, por desgracia, aun muy lento. Las causas de esto son tanto técnicas como económicas con resultados inciertos. Lo concreto es que hoy las posibilidades son bastante limitadas, no por escasez de potencial en Chile, el cual sin duda es abundante, sino por la tecnología, los costos para implementarlo y lo que a veces es olvidado, que es el hecho que la población requiere energía mientras el sol enciende la celda y posterior a que se esconde, y para eso el almacenamiento para abastecer de manera continua encarece aun mas los costos.

Se calcula que 1 m² de superficie de la Tierra (tierra y océano) recibe cerca 0,16 KW de radiación solar. Esta cantidad es bastante significativa. Para toda la superficie de la Tierra la potencia total aproximada sería de 10¹⁴ KW. Esta potencia, y hasta mil veces menos, podría abastecer por completo las necesidades energéticas de la humanidad tanto para la generación de energía eléctrica como para calefacción.

En el primer caso los esfuerzos básicos están concentrados en dos direcciones:

- El uso de Convertidores Fotoeléctricos Semiconductores (CFS), capaces de transformar la energía del sol en eléctrica.
- La creación de instalaciones generadoras de vapor, en las cuales la caldera de vapor que trabaja con combustible orgánico, se sustituye por una caldera de solar.

En ninguna de estas dos direcciones se ha alcanzado una eficiencia tal que la tecnología solar garantice una alta penetración en el mercado de generación de energía eléctrica sin la presencia de altos subsidios por parte del Estado.

Los principales obstáculos para la aplicación de todas las formas de transformación de la energía del Sol, es la gran dispersión de la energía del astro sobre la Tierra y la irregularidad

de la radiación solar que alcanza a la superficie. Los flujos de energía solar se interrumpen durante la noche y cuando el cielo se encuentra cubierto. Esto provoca un coeficiente bajo de uso, habitualmente menor a 15 %.

Las instalaciones de helio sobre los convertidores fotoeléctricos (CF) se utilizan exitosamente en los dispositivos espaciales, como fuente de energía para las necesidades de la tripulación de las naves. Pero los requerimientos de estas son bajos, por lo tanto el bajo rendimiento de los convertidores fotoeléctricos en este caso no tiene gran significado.

La seguridad del funcionamiento de este tipo de instalaciones de helio, su peso y dimensiones son aceptables. Sin embargo esto se estrella con los altos costos que aún tiene el sistema, incluso para el uso doméstico.

Los sistemas solares autónomos tienen la necesidad de contar con un almacén donde se acumule durante el día la energía y de esta forma poderla utilizar en la noche o cuando haya nubosidad. Estos almacenes pueden ser baterías, también hidrógeno producido por la electrólisis, o materiales superconductores. En cualquier caso, son necesarias fases adicionales de transformación de la energía con pérdidas inevitables, lo cual disminuye el rendimiento general y aumenta los gastos. Algunas centrales eléctricas solares experimentales con potencias de 350 KW son incluidas en las redes eléctricas de Europa y los Estados Unidos. En las instituciones científicas se continúan las investigaciones con el objeto de reducir el tamaño de las fotoceldas y aumentar su eficiencia.

El esquema principal de la instalación para la generación de vapor solar se muestra más abajo (Figura 1.9). Se diferencia del esquema de una central termoeléctrica de combustible orgánico solamente por el mecanismo de la caldera. Para el enfoque de los rayos solares se usa un concentrador de helio (juego de espejos o lentes), permitiendo así dirigir los rayos solares a la caldera.

Comúnmente, el concentrador de helio es un reflector parabólico, que sigue el recorrido del sol durante el día. En el foco de este reflector está situado un absorbente que utiliza la energía solar para el calentamiento de un líquido especial (habitualmente un aceite sintético) hasta una temperatura de 400 grados Celsius. Este fluido, es enviado a la turbina y al generador. Actualmente existen algunas centrales eléctricas de este tipo en operación con bloques energéticos de 80 MW. Cada bloque ocupa un área de aproximadamente 500 Ha y exige sistemas de control muy precisos. A estas centrales solares se le adicionan centrales a gas, que producen alrededor de $\frac{1}{4}$ parte de la potencia total y conservan el régimen de trabajo por la noche.

A mediados de los años 90, centrales similares con una potencia de hasta 350 MW en el mundo producían alrededor de 80% de la energía eléctrica solar recibida en los concentradores de helio.

Los expertos sostienen que en el futuro, el rol fundamental de la energía solar estará en su uso directo para la calefacción.

El calor es la mayor necesidad energética de las personas. Por ejemplo, el suministro de agua caliente con una temperatura no mayor a 60°C, puede ser parcialmente satisfecho con el uso de la luz y el calor solar. Ya que la intensidad de la radiación solar depende de las condiciones del día y del tiempo, en las instalaciones de calefacción es necesario tener un acumulador de calor. El rol de estos acumuladores, es servir como depósitos del agua caliente. Sin embargo, la sustitución completa de la calefacción solar por la habitual, en la mayoría de los casos no es posible. No obstante, su uso tiene la ventaja de que permite un ahorro considerable de combustible orgánico.

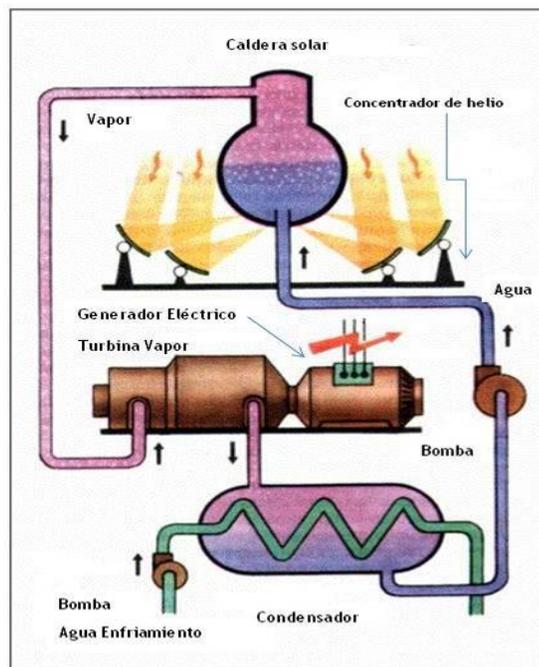


Figura 1.9 - Esquema principal de la instalación de un generador solar de vapor.

Aparentemente, en un futuro cercano será posible el uso comercial de la energía solar para el abastecimiento de calor a objetivos industriales. La realización práctica de ello disminuirá el consumo de energía eléctrica, reducirá el gasto del combustible orgánico e

influirá favorablemente sobre el estado del medioambiente. Y si se utilizan las bombas térmicas y tuberías con el aislamiento térmico confiable, es posible calentar los edificios con pérdidas mínimas de energía.

A fin de cuentas, hasta un diez por ciento de la energía total consumida en los países industrializados puede ser obtenida a través del uso racional de la energía del solar. Esto permitirá reducir los volúmenes de la generación de energía eléctrica que proviene de otros sistemas.

1.2.2.2. Energía eólica

Cerca del 2% de la energía solar que llega a la Tierra se transforma en energía eólica, vale decir, viento. Durante muchas décadas, en regiones lejanas, se usaron molinos de viento para generar energía eléctrica suficiente para las necesidades domésticas y recarga de baterías. Los módulos generadores (que alcanzan potencias de más de 1 MW) actualmente funcionan en muchos países.

La potencia de la energía eléctrica producida por una turbina eólica es proporcional al cubo de la velocidad del viento. Su uso es eficaz con velocidades del viento de entre 7 a 20 m/s (ó 25 a 70 Km/hora), pero no en todas las regiones del globo terrestre hay vientos de este tipo y que además sean constantes.

El problema de la energía eólica (así como la solar), es que requiere fuentes adicionales que dupliquen de energía eléctrica o de sistemas para su acumulación en los momentos en que no hay viento.

En el uso de la energía eólica hay dos modalidades:

- El uso de instalaciones pequeñas (con una potencia de hasta 15 KW), destinadas principalmente para la elevación y bombeo de agua, así como para la recarga de acumuladores eléctricos.
- El uso de sistemas eólicos potentes para la generación de energía eléctrica.

En la actualidad, las turbinas de viento que trabajan en distintas partes del mundo tienen una potencia total cercana a los 15.000 MW. En aquellas regiones alejadas se consideran como un elemento importante para la población y la pequeña industria. Los módulos más económicos, prácticos y comerciales tienen una potencia de aproximadamente 1 MW, agrupados en pequeñas centrales eólicas.

Sin embargo, en el uso del viento como fuente de energía eléctrica hay ciertos problemas cuya solución, al nivel del desarrollo actual de la tecnología, no parece posible:

- 1) Su funcionamiento está vinculado a la generación de interferencias, las cuales influyen de manera desfavorable en el trabajo de las redes de radio y televisivas. Por primera vez este fenómeno, ampliamente tratado por la prensa, fue señalado en Gran Bretaña, donde los habitantes de las islas Orkneys se quejaban de las interrupciones de recepción de las emisiones televisivas. Según los datos que hay, una instalación de energía eólica con una potencia de 0,1 MW puede llevar a la alteración de las radioseñales en un radio de hasta 0,5 Km.
- 2) Otra particularidad de las instalaciones eólicas se manifiesta en la generación de ruidos infrasonoros muy intensos, que actúan en el organismo humano de manera desfavorable, provocando un estado depresivo permanente, una fuerte inquietud inmotivada e inconformidad vital. Como ha demostrado la experiencia de operación de instalaciones eólicas en los Estados Unidos, el ruido afecta a animales y la migración de aves.
- 3) El defecto más importante de este tipo de energía, teniendo en cuenta la variabilidad de la velocidad del viento, es su baja producción por unidad de superficie, lo cual exige un territorio considerable para el montaje de la instalación eólica. De los cálculos realizados por especialistas, el diámetro óptimo para la instalación eólica es de 100 m. Con estas dimensiones geométricas y con una relación de la densidad de energía por unidad de superficie de la instalación eólica de 500 W/m^2 (la velocidad del viento es de 9,2 m/s) del flujo de viento, es posible obtener una potencia eléctrica próxima a 1 MW. En un área de 1 Km^2 es posible instalar 2-3 instalaciones con la potencia indicada, tomando en cuenta que las mismas deben encontrarse a una distancia igual a sus tres alturas, para no alterar el funcionamiento y rendimiento de la otra instalación.

En la URSS, en el año 1991 se encontraban en funcionamiento más de 18.000 instalaciones eólicas. Ya en el año 1930 a partir del Departamento de Motores Eólicos del Instituto Central Aerodinámico (ICA) fue creado el Instituto Central de Energía Eólica (ICEE) y en 1938 se organizó la Oficina de Diseños y Proyectos de Centrales de Energía Eólicas.

Entre las ventajas destaca que no influye en el calentamiento de la atmósfera de la Tierra; no consume oxígeno; no contamina con gas carbónico y otras emisiones; y tiene la posibilidad de su transformación en otros tipos de energía (mecánica, térmica, eléctrica). Entre sus desventajas se puede mencionar que la baja densidad de energía por unidad de superficie de una central eólica o los cambios imprevisibles de la velocidad del viento

durante el día y la temporada exigen dosificar el uso de la energía o almacenarla; además de la influencia negativa al medioambiente antes señalada y las interferencias en las comunicaciones, además de posibles daños a la salud humana que aun están en estudio. También la experiencia nacional y extranjera confirma la necesidad técnica de que la construcción y operación de centrales eólicas de baja potencia se realice en lugares lejanos a las líneas de alta tensión.

1.2.2.3. Energía hidráulica

La hidroelectricidad constituye el 19% de la generación de energía eléctrica mundial. Originariamente la energía hidráulica se usaba en la tracción de las maquinas de labor, tales como molinos, martillos, fuelles, etc. Con la invención de la turbina hidráulica, la máquina eléctrica y la transmisión de electricidad a grandes distancias, la energía hidráulica ha adquirido un nuevo significado. Las centrales hidroeléctricas son instalaciones energéticas que se distinguen por ser de las más ventajosas para incorporarlas a la matriz de de un país, por la cobertura que genera de las máximas demanda, su bajo costo y como reserva en caso de una avería en el sistema energético nacional.

La Figura 1.10 presenta el esquema de funcionamiento de una central hidroeléctrica.

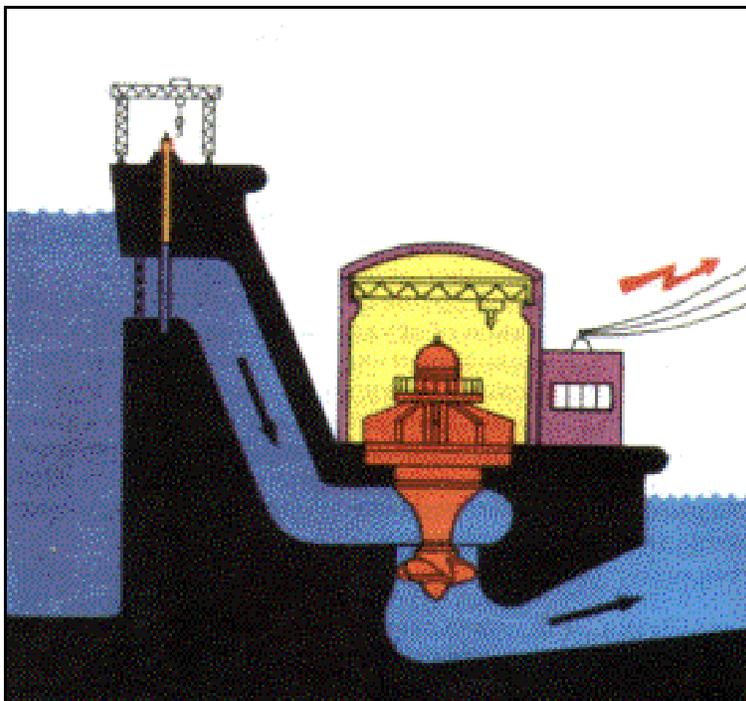


Figura 1.10 - Esquema de funcionamiento de una central hidroeléctrica.

La creación de desniveles de agua se logra por la construcción de represas (el elemento más importante y costoso en una central hidroeléctrica). El agua, corriendo del nivel superior al inferior, adquiere una gran velocidad y llega de esa forma a las paletas de las turbinas la que hace girar su rotor. La ventaja de muchos hidrosistemas consiste en la capacidad de compensar las cargas estacionales y máximas diarias en el consumo de energía eléctrica. A veces el uso de las reservas de agua se torna complicado por las demandas para el riego que pueden recibirse durante las cargas máximas. En algunas áreas, el uso de la hidroelectricidad se limita durante las lluvias estacionales. A pesar de las ventajas de este sistema, este no podrá aumentar la producción de la hidroelectricidad en el futuro, ya que la mayoría de las regiones del mundo donde es posible el uso de la energía potencial hidráulica, ya se encuentran en operación, o son inaccesibles por otras causas (por ejemplo, por las consideraciones de protección del medioambiente).

1.2.2.4. Energía de las mareas

El uso de la energía de las mareas en los golfos o las desembocaduras de los ríos fue realizado por primera vez en Francia y en Rusia a partir de 1966. El flujo y reflujo del agua que se mueve en dos direcciones se utiliza para hacer girar las turbinas. Durante la afluencia, el nivel de agua del mar se eleva y esto puede aprovecharse para el llenado de un recipiente cualquiera. En el trayecto de la corriente de agua es posible poner una turbina, que generará la energía eléctrica. La corriente de agua de retorno durante el reflujo puede hacer girar también la turbina si su construcción asegura la posibilidad del giro en las dos direcciones y la producción de energía eléctrica. El esquema se presenta en la Figura 1.11.

En el mundo no operan muchas centrales eléctricas experimentales de marea. Desde el año 1968 opera en Rusia la central eléctrica experimental de marea de Kislogubsk, en la costa del mar de Barents, en la cual hay instaladas dos turbinas de 400 KW cada una. Una gran estación de marea se encuentra en operación sobre el río La-Rans (Francia), su potencia es de 240 MW. Hay varios proyectos de construcción de otras estaciones semejantes. Por ejemplo, en la desembocadura del río Severi (Inglaterra), que tiene el más alto nivel de afluencias de la Tierra. La potencia de los turbogeneradores de esta estación es de 720 MW.

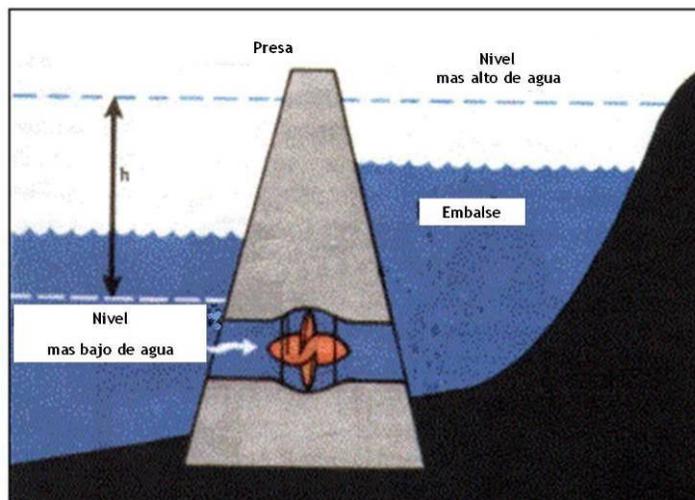


Figura 1.11 - Esquema simplificado del sistema de la central eléctrica mareomotriz

En el mundo esta tecnología se ha usado poco, porque para su aplicación son necesarias condiciones naturales especiales, únicas, por lo tanto, cabe concluir que sus posibilidades potenciales para la generación de energía eléctrica son muy limitadas, tanto por la detección de dichos lugares, aspecto en el que debe reconocerse que Chile tiene un potencial superior a otros países, no obstante, por ser una tecnología experimental que requiere probablemente décadas entre el desarrollo de la tecnología y operación comercial de gran escala, se observa como una opción aun poco viable.

1.2.2.5. Energía nuclear

Desde el comienzo de la revolución industrial, la civilización ha obtenido la mayor parte de su energía hirviendo agua para producir vapor. Los reactores nucleares representan el último paso en esta técnica. Básicamente, consiste en generar una reacción en cadena que produce calor, en lugar de reacciones químicas contaminantes, como en la combustión de material fósil.

La energía nuclear se basa en el poder del núcleo del átomo, la partícula más pequeña de un elemento químico. Ciertos elementos tienen la propiedad de transformarse por la desintegración natural de otros elementos, como resultado de modificaciones producidas en sus núcleos atómicos, emitiendo radiaciones corpusculares o electromagnéticas. Así, todos los elementos de número atómico superior a 83 son radioactivos, pero solo algunos de ellos, el Uranio y el Torio, se utilizan como fuente de energía para producir electricidad.

En la reacción nuclear se libera una extraordinaria cantidad de energía debido a que se produce una disminución neta de masa que se transforma directamente en energía, y está que puede producirse de dos maneras, de acuerdo a la famosa ecuación de Albert Einstein: $E = MC^2$ (Energía = masa por el cuadrado de la velocidad de la luz en el vacío):

- **Fisión:** Un elemento (neutrón) rompe un núcleo pesado en otros 2 más ligeros, liberando varios neutrones y gran cantidad de energía. La masa total de los productos es algo inferior a la del núcleo inicial, en el denominado “defecto de masa” que se transforma en energía.
- **Fusión:** Es la unión de 2 núcleos ligeros para formar otro más pesado con liberación de energía.

Los actuales reactores nucleares para generar electricidad funcionan a base de la fisión del átomo, utilizando principalmente Uranio como combustible natural, con un contenido isotópico en su estado natural de 0,71% en átomos de Uranio-235. Este elemento se encuentra en la naturaleza en una proporción del 0,004%, es decir, es unas 1.000 veces más abundante que el oro, unas 30 veces más abundante que la plata, y tanto como el plomo y el cobalto.

En rigor, existen dos combustibles nucleares naturales, el Uranio y el Torio, pero hay varios combustibles artificiales, el más importante de los cuales es el Plutonio 239. Un reactor nuclear típico durante su funcionamiento produce materiales fisionables, entre los cuales destaca el Plutonio 239, que se reutiliza en los llamados reactores rápidos, para producir nueva energía.

Por su parte el Torio es aún más abundante en la corteza terrestre que el Uranio y los científicos y especialistas rusos sostienen que va reemplazarlo en un futuro cercano, según los resultados obtenidos en investigaciones recientes que han dado origen ya a la puesta en marcha de reactores con este tipo de combustible.

Algunos especialistas sostienen que dentro de unos 25 años la industria nuclear va a estar en condiciones de generar electricidad por la **fusión** de dos núcleos ligeros (Litio y Deuterio) en uno más pesado (Helio), obteniéndose unas cuatro veces más energía que en la fisión. Esta reacción -que se produce de manera natural en el sol- requiere de temperaturas muy elevadas, unos 100 millones de grados. Los experimentos para replicar este proceso actualmente son dos, el primero y más prometedor es llamado Tokamak, desarrollado por Rusia, y consiste en el confinamiento magnético de plasma. El proyecto más importante relacionado con este método es el ITER (Internacional Termonuclear Experimental Reactor)

desarrollado por la Unión Europea Japón y Rusia y está actualmente construyendo una central nuclear por fusión.

El segundo proyecto, el NIF, se encuentra aún en etapa de investigación para definir la factibilidad de lograr la fusión mediante un láser de alta energía, usando confinamientos inerciales. Está siendo desarrollado en Estados Unidos.

El principio básico de la tecnología núcleo eléctrica usada actualmente es sencillo: la energía producida en el interior de un reactor mediante la fisión del combustible se manifiesta como calor, el que mediante un circuito apropiado se traspasa al agua que se transforma en vapor para poner en movimiento a una turbina. Esta a su vez accionará un alternador, generando energía eléctrica que puede transmitirse a través de la red de distribución. Enfriando nuevamente el fluido, este retorna al núcleo del generador, repitiendo el ciclo.

La energía obtenida de la fisión de un kilogramo de uranio es equivalente a la que se obtiene quemando 2.800 toneladas de carbón. En el proceso prácticamente no se liberan gases de ningún tipo a la atmósfera y la tecnología para reciclar el combustible permite su reutilización. El problema radica, como se verá más adelante, en el adecuado manejo de los desechos radioactivos, elementos de alta peligrosidad tanto para el medioambiente como para el ser humano.

1.3. La situación energética de Chile^{21, 22}

En la actualidad, Chile cuenta con una matriz energética que alcanza los 13.500 MW, potencia que debería ser duplicada hacia el año 2020, de acuerdo a las crecientes necesidades y el desarrollo económico. Algunos expertos del sector incluso sostienen que hacia el año 2030 el consumo incluso podría triplicarse. Al margen de los estudios y las eventuales variaciones entre una proyección y otra, lo cierto es que a corto y mediano plazo el sector energético chileno requiere aumentar de manera significativa su capacidad de producir electricidad.

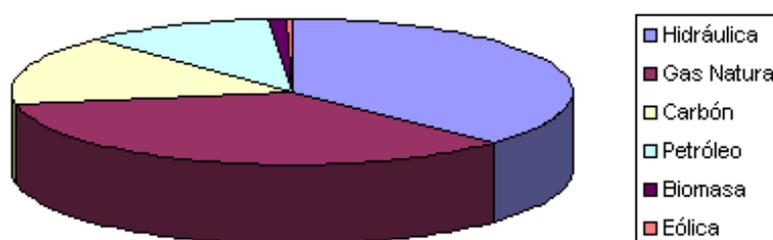
Por su especial geografía Chile ha debido configurar una matriz energética en la que predomina la generación hidráulica y en las últimas décadas se optó por el gas natural. En la práctica, ambas fuentes han demostrado ser insuficientes y sobre todo, incapaces de

²¹ Información estadística de la Comisión Nacional de Energía.

²² La Opción Núcleo-Eléctrica en Chile Informe, Grupo de Trabajo Núcleo-Electricidad, Gobierno de Chile, Septiembre 2007.

asegurar el suministro, ya que dependen de factores externos, como en régimen de lluvias en el primer caso, por lo que se ha visto no pocas veces complicada en periodos de sequía; y la estabilidad económica y política de Argentina, en el caso del gas, por ser nuestro principal proveedor.

Fuentes de origen fósil completan casi un tercio de la matriz y sin bien se han comenzado a desarrollar proyectos eólicos o solares, sus dimensiones aún son pequeñas por lo que su aporte es insignificante al sistema (ver Figura 1.14). Autoridades del ramo han señalado que las Energías Renovables No Convencionales (eólica, solar, geotérmica, etc.) podrían alcanzar el 10% del total de la energía eléctrica de Chile de aquí al 2020, por lo que el problema se mantiene.



Hidráulica: 37,2%

Gas Natural: 35,2%

Carbón: 15,4%

Petróleo: 10,8%

Biomasa: 1,3%

Eólica: 0,1%

Figura 1.14 - Principales fuentes de energía utilizadas en Chile para la generación de electricidad.

Se ha hecho un importante avance en promover políticas y buenas prácticas de eficiencia energética, involucrando activamente a la población, con lo cual se ha logrado una disminución interesante del consumo y las autoridades prevén que la política en esta materia podría hasta un 20% de ahorro en corto plazo, pero el desafío fundamental consiste en determinar cómo se va a producir energía para responder al aumento de la demanda. Hasta ahora, el principal avance en esta materia ha sido lograr consenso de que se requiere una matriz diversificada que considere los costos económicos, sociales, ambientales y de independencia geopolítica.

Muchos especialistas consideran que la opción más a la mano para aumentar la potencia del sistema es la generación hidráulica, seguida del carbón. Esto, sin duda, haciendo un poco caso omiso del impacto ambiental que representan, la primera por la modificación de los

ecosistemas de emplazamiento -algo que en el pasado reciente ha generado un profundo malestar social-, y en el caso del carbón, por los altos índices de contaminación atmosférica que produce. Además, ambas opciones tienen debilidades por el lado de la seguridad de suministro. En el caso de energía hidráulica dado que su rendimiento es muy variable, dependiendo de si es un año muy seco o muy lluvioso, llegando a variar hasta tres veces dependiendo de la pluviometría; en el caso del carbón si bien su precio es más estable que el petróleo o el gas natural, por ejemplo, es de esperar que en el corto plazo surjan importantes restricciones a su utilización por parte de la comunidad internacional, a causa de su directa incidencia en el cambio climático.

Según la IEA (International Energy Agency), la Generación Núcleo Eléctrica podría llegar a representar entre un 19% y un 22% de la matriz energética mundial hacia el año 2050. De ser así, se reducirían entre un 6% y un 10% las emisiones de CO₂ por ahorro de combustibles fósiles.

En el caso de Chile, uno de los factores importantes a considerar es la regla que establece que ninguna central nuclear debería proveer más del 10% de la potencia total del sistema, para evitar cortes de suministro en el caso de que deba detener su funcionamiento por alguna razón. Al margen de esto, las ventajas que representa para Chile deben equilibrarse principalmente con el factor costo y, sobre todo, el de la seguridad.

Conclusiones

El sol, el viento, las mareas, los ríos, son muy importantes en el desarrollo de energía en aquellas regiones de la Tierra donde existen condiciones especiales, a menudo únicas. Sin embargo, estas tecnologías aún no pueden sustituir al carbón, el gas o a la energía nuclear para producir los volúmenes de electricidad que se requieren. Sin duda son en su mayoría tecnologías mucho más limpias y amigables con el medioambiente y ya aportan su contribución a la energética mundial, pero no se puede pensar en que constituirán la base para satisfacer las necesidades de energías del planeta. Por desgracia, no hay muchos lugares que tengan las posibilidades para la construcción de represas necesarias para acumular agua, tal como el almacenaje de grandes cantidades de energía eléctrica en gigantescas baterías todavía no se han logrado.

Es evidente que las fuentes renovables de energía no pueden abastecer de forma suficiente la necesidad de energía eléctrica o compensar las máximas demandas. Pueden resolver el problema entre un 10-20% y si en el futuro la humanidad encontrara modos de almacenaje eficaces de la energía eléctrica recibida de estas fuentes aumentará indudablemente su contribución, pero todavía quedará por resolver otros aspectos complejos e incluso problemáticos de su uso, sobre los cuales se habló en este capítulo.

Por contrapartida, el análisis del estado y de las tendencias actuales permite concluir que, en una perspectiva de por lo menos 100 años, no hay riesgo de restricción al desarrollo de la energía nuclear por causa de limitación de los recursos de materias primas. El mercado mundial de combustibles para centrales nucleares y reactores de investigación está desarrollado y se encuentra en un estado estable. Las anteriores variaciones notadas en los precios del combustible fueron provocadas por los cambios de los pronósticos del desarrollo de la energía nuclear y en el mercado de productores. Durante medio siglo de utilización de la energía nuclear nunca ha habido casos de interrupción del suministro de combustible, relacionados con la falta de fuentes de materia prima. Al contrario, en concordancia con las restricciones anti monopólicas, en varias centrales nucleares se utiliza combustible de distintos proveedores. Dadas las circunstancias, esto es un estímulo adicional para el desarrollo de los ciclos de combustible y el aumento de la seguridad del mismo. Por ejemplo, se planea la transición de la central nuclear Temelin del combustible de la marca Westinghouse al combustible de la marca TVEL. A su vez, las centrales nucleares de Ucrania planean la ampliación del uso del combustible de la producción Westinghouse.

Cerca de los países que desarrollan de forma intensiva la energía nuclear (Rusia, India, Japón, etc.) y que poseen reservas limitadas de uranio, se estudian búsquedas alternativas

de la resolución del problema de abastecimiento de combustible a una perspectiva lejana, tales como la introducción del ciclo de combustible cerrado con el uso de reactores reproductores a neutrones rápidos; la elaboración del ciclo de combustible del torio; y la utilización de las reservas de las armas nucleares.

En 15 años de ejecución del Programa Internacional “Megatoneladas y megavattios” la mitad de las centrales nucleares de los Estados Unidos trabaja con combustible obtenido del uranio enriquecido ruso y Rusia ha recibido de los Estados Unidos más de 26 toneladas de uranio de baja calidad, que alcanza solo para la satisfacción de la energía nuclear rusa por un lapso de pocos años.

Según las estimaciones de expertos occidentales, la reducción de los programas militares traerá consigo la obtención de cerca de 750 toneladas equivalente de uranio natural para combustible de centrales nucleares. Conforme a la práctica mundial que se ha formado entre las centrales de energía nuclear y los reactores agua-agua (VVER), se devuelven a Rusia el combustible usado para su siguiente reprocesamiento y almacenaje, lo cual resuelve el problema posterior con el combustible nuclear gastado.

Dados los importantes desafíos que enfrenta la sociedad global en materia de energía y cuidado del medioambiente, el escenario parece propicio para profundizar en el perfeccionamiento de la tecnología nuclear. Sus eventuales inconvenientes, como quedó sentado en este capítulo y se demostrará en detalle en los posteriores, dicen relación con los sistemas de seguridad de su operación, antes que con la disponibilidad de recursos o materias primas y, he acá su gran ventaja, con el mínimo impacto ambiental que representan.

Bibliografía

- 1.1.- Risks and benefits of nuclear energy, OECD, NEA, 2006.
- 1.2.- OECD International Energy Outlook 2008.
- 1.3.- USGS, 2004.
- 1.4.- World Energy Outlook, IEA, 2006.
- 1.5.- BP Energy Statistics, 2008.
- 1.6.- BP Statistical Review of World Energy, June 2008.
- 1.7.- World Energy Outlook 2008, IEA 2008.
- 1.8.- Torio, sus recursos de materias primas, química y tecnología, Moscú, 1960.
- 1.9.- Zelikman A. N., Metalurgia de metales raros, torio y uranio, Moscú, 1961.
- 1.10.- Emeljanov V. S, Evstjuh y N. A. I., Metalurgia del combustible nuclear, Segunda Edición, Moscú, 1968.
- 1.11.- Siborg G. T, Kats de J., Química de los elementos actínidos, traducción del inglés. Moscú, 1960.
- 1.12.- Andrew Pikford, “Vía del desarrollo de la energética australiana”, Informe del Centro de Análisis Estratégico (Future Directions International), 6 de octubre del 2005, Pert, Australia.
- 1.13.- "Rusia en la política global", № 4, Julio - Agosto del 2006.
- 1.14.- ¿Va a haber más Torio?, Dinero, 03 de agosto del 2007.
- 1.15.- La India no se privara del torio, AtomInfo. Ru 25.09.2008.
- 1.16.- El primer AHWR-300 de torio puede ser construido cerca de Mumbai, AtomInfo. Ru 28.04.2008.
- 1.17.- Economía de la energía nuclear, MIFI, Moscú, 2004.

- 1.18.- La India y Sri Lanka pueden cooperar en la energética del torio, AtomInfo. Ru 16.10 Anil Kakodkar.
- 1.19.- Evolución del programa nuclear de la India: argumentos y perspectivas, AtomInfo. Ru 20.01.09.2008.
- 1.20.- La India comenzará la construcción de un reactor de torio a más tardar dentro de un año, AtomInfo. Ru 20.10.2008.
- 1.21.- A. N. Prasad, Transacción nuclear con los Estados Unidos puso a la India en una dependencia del uranio, AtomInfo. Ru 20.01.2009.
- 1.22.- Kakodkar: Torio, el mejor método contra el plutonio, AtomInfo. Ru 20.01.2009.
- 1.23.- Reactor AHWR - el primer paso de la India en el camino a la energética del torio, AtomInfo. Ru 20.01.2009.
- 1.24.- En la India celebran la puesta en marcha del reactor de investigación de torio. AtomInfo. Ru 20.01.2009.
- 1.25.- El primer comprador de la tecnología de torio será un país novato. AtomInfo. Ru 20.01.2009.
- 1.26.- India - status actual de la energética del torio, AtomInfo. Ru 20.01.2009.
- 1.27.- Una compañía de los Estados Unidos propone a la India reactores de torio, que no necesitan transformación química CND (Combustible Nuclear Desechable), y son capaces de garantizar la independencia energética de la India, AtomInfo. Ru 20.01.2009.
- 1.28.- J. I. Korjakin. Alrededores de la energía nuclear de Rusia: nuevas llamadas, Moscú: Editorial GUP NIKIET. 2002.
- 1.29.- Libro Blanco de la Energética Nuclear. Bajo la redacción del Prof. E. O. Adámov. Moscú: Editorial GUP NIKIET. 2001
- 1.30.- Política Energética de la Federación Rusa: Resumen, París, Agencia Internacional de Energía. 1996.

- 1.31.- Programa de desarrollo de la energía nuclear de la Federación Rusa en los años 1998-2005. Perspectiva hasta el año 2010. Moscú: TSNII de Dirección, Economía e Información, 1977.: Resumen. París: Agencia Internacional de Energía. 1996.
- 1.32.- Eficiencia de la tecnología de la energía nuclear: criterios del sistema de la dirección del desarrollo / S.I. Rachkov. Moscú: EUFE (Empresa Unitaria Federal Estatal) TSNIATOMINFORM. 2008.

Capítulo 2

Energía Nuclear

2.1. Aspectos generales

En más de medio siglo de desarrollo de la tecnología nuclear, la industria para la generación de energía núcleo-eléctrica tiene en la actualidad una importancia similar a la hidroeléctrica en el balance mundial. No obstante, desde finales del siglo XX la comunidad internacional está tomando cada vez mayor conciencia sobre el medioambiente y al estudiar las ventajas de la energía nuclear en comparación con otras tecnologías, ésta ha comenzado a cobrar creciente atención y protagonismo.

Para un grupo importante de países (entre ellos Francia, Japón y Estados Unidos) la falta de recursos propios de petróleo o gas ha sido motivo suficiente para integrar la tecnología nuclear en la estructura de su matriz energética. Otras naciones consideran la opción nuclear para diversificar su matriz o simplemente para lograr una independencia total en esta área. Además, un hecho sobre el que existe un amplio consenso es que el desarrollo de la industria nuclear es una forma limpia y segura de obtener hidrógeno, el cual permitirá, en el futuro cercano, reemplazar el combustible fósil usado por los distintos medios de transporte (terrestre, marítimo y aéreo). Esto en breve tiempo más será atractivo para las distintas organizaciones ecologistas, por cuanto se sabe que un tercio de los gases de efecto invernadero son de exclusiva responsabilidad del transporte, en todas sus formas. Actualmente no se ha hablado mucho sobre la materia, dado que, por un lado los esfuerzos se han encaminados a mitigar y reducir las emisiones de gases de la industria estacionaria y, por otro lado, aún falta desarrollar en forma comercial los motores que permitan usar hidrógeno. Pero solo es cuestión de tiempo.

Otro punto relevante es la necesidad de considerar el potencial de la tecnología nuclear como un instrumento para el desarrollo de la economía mundial. Hoy con el uso de los actuales reactores (no de última generación) y considerando el llamado “ciclo abierto” de combustible (que no utiliza el reciclaje del Uranio gastado, por lo que el ciclo termina con su depósito en contenedores especiales de lenta degradación, la industria internacional dispone de aproximadamente 100 años en reservas de Uranio a precios razonables (Figura 2.1 y Figura 2.2)²³.

²³ Elaboración propia de Rosatom, Federación de Rusia.

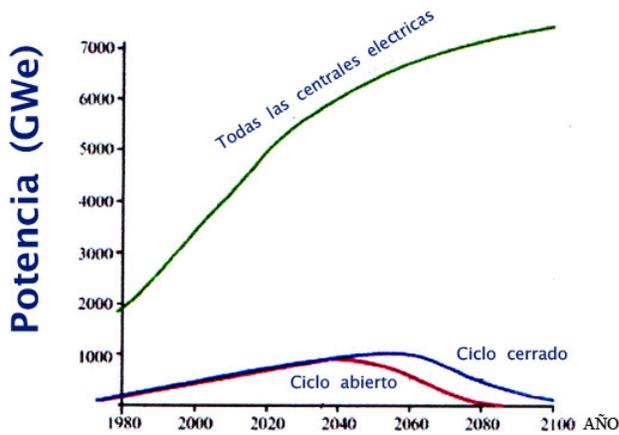


Figura 2.1 - Escenario aproximado del crecimiento de la potencia de generación nuclear sin reactores rápidos (con las reservas potenciales del uranio empobrecido ~ 10 millones de toneladas)

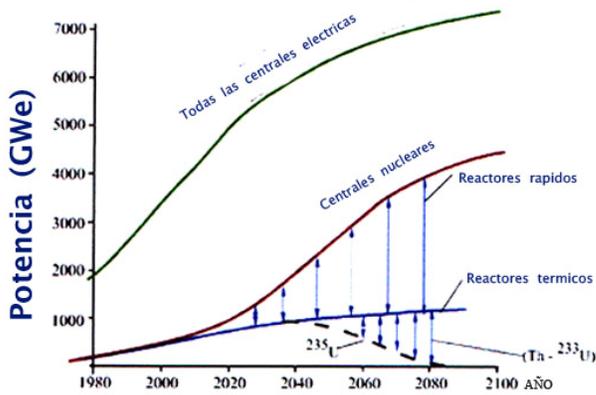


Figura 2.2 - Escenario aproximado del crecimiento de la potencia de generación nuclear, incluyendo los reactores rápidos (con reservas potenciales de uranio empobrecido - 10 millones de toneladas)

Sin embargo, la tendencia que está cobrando relevancia consiste en usar tecnología de última generación y “ciclo cerrado” de combustible, el cual permite procesar el Uranio para ser reutilizado nuevamente en sus reactores, lo que aumenta su rendimiento, fortalece el suministro en el mercado internacional sin una variación significativa en los precios y, además, reduce notablemente la cantidad de desechos resultantes, por lo que el impacto

ambiental es considerablemente menor. A esto debemos sumar la opción de utilizar Torio en reemplazo del Uranio, alternativa ya disponible en Rusia y Estados Unidos, la cual permite obtener rendimientos aun mayores y multiplicar por lo menos seis veces el período de uso de la actual reserva de combustible nuclear (es decir de 100 aumenta a 600 años esta reserva).

Basados en estos elementos -alta tecnología, ciclo cerrado de combustible y un adecuado mix Torio/Uranio- algunos científicos e investigadores que estudian el cambio climático y la incidencia que tienen en este hecho la actual industria energética, se atreven a considerar a la energía nuclear como renovable, opinión a la que suscriben también algunas organizaciones ambientalistas.

Después de un periodo de estancamiento en los años 90, tanto en su evolución tecnológica como en la construcción de nuevas centrales nucleares, hoy se observa un resurgimiento de la energía nuclear, especialmente en los países más industrializados, tales como China, India, Rusia, Estados Unidos, Francia y Finlandia.

En Estados Unidos se planea la presentación de solicitudes de licenciamiento de 25 nuevos reactores, en Canadá fueron presentadas dos solicitudes para la preparación de los emplazamientos. En Gran Bretaña, las nuevas centrales nucleares están incluidas en los planes de la estrategia energética. Conjuntamente la Comisión Reguladora Nacional (NRC) de Estados Unidos certificó el proyecto AP-1000 con sistemas pasivos de seguridad de la firma Westinghouse para la construcción de nuevas centrales nucleares en territorio estadounidense.

En el 2003, India comenzó la construcción de un reactor a neutrones rápido de 500 MW de potencia con inicio de operación en 2010, y para el 2020 se planea introducir en operación cuatro reactores en base a combustible metálico de 1.000 MW cada uno.

En el marco del proyecto internacional del desarrollo de innovación de la energía nuclear (INPRO), se acordó perfeccionar el uso del combustible reciclado y el manejo de los residuos radiactivos en países que no disponen de territorio suficiente o adecuado, así como la seguridad de la operación de las centrales nuclear en un sistema energético de potencia limitada.

Los nuevos reactores de neutrones rápidos y el ciclo cerrado de combustible, además de las continuas mejoras en la seguridad de la industria, elevan cada vez más la eficiencia y competitividad de la energía nuclear frente a otras alternativas actualmente en uso.

A partir del año 2000, la Federación Rusa ha incentivado el que los principales países poseedores de la tecnología nuclear -entre los cuales destacan Estados Unidos, Francia y Rusia- adopten una estrategia de cooperación internacional mutua, basada en distintos acuerdos, algunos al amparo de la ONU (Nueva York, septiembre del 2002), otros al amparo del OIEA, como el Proyecto INPRO, y el más conocido, el proyecto ITEM, que significó la asociación de los principales países nucleares para desarrollar un ambicioso proyecto que permitirá a las futuras generaciones producir energía nuclear por “fusión” y no fisión, como actualmente esta se realiza, lo que permitirá prácticamente eliminar la producción de desechos nucleares de los actuales reactores en uso.

Todo esto permitió a esta industria diferenciarse del modo que había actuado hasta el año 2000, especialmente en el área de la eficiencia del uso del combustible, de la seguridad, el manejo de los desechos y la investigación y desarrollo de nuevos reactores eficientes.

Por su parte Estados Unidos, en su Política Energética Nacional, estableció las bases para la consolidación de un grupo importante de países con tecnología nuclear, durante el IV Foro Internacional de la Generación Eléctrica (GIF), ocasión en la que se seleccionaron seis modelos de reactores recomendados para ser usados en esta industria. Un trabajo similar fue realizado con posterioridad en Rusia, donde se seleccionó como uno de los reactores importantes para el futuro de la generación núcleo-eléctrica el reactor a “neutrones rápidos en base a plomo como refrigerante”, el cual también fue replicado en el proyecto Internacional (GAINS) que sugiere desarrollar el ciclo cerrado de combustible nuclear (reciclaje del uranio utilizado) tanto en los reactores térmicos como en los rápidos.

En el transcurso de la historia de la industria nuclear, que es relativamente corta, ya que abarca apenas 50 años, esta se ha caracterizado por un crecimiento explosivo en su inicio, alcanzando un crecimiento del orden del 30% anual en los años 70, para luego decaer a partir de los años 80. Este descenso se produjo en parte por la oposición de sectores ambientalistas, que en la práctica significó el aumento de las exigencias en el proceso de licenciamiento de las centrales en construcción, lo cual aumentaba los gastos, demoraba el retorno de los recursos invertidos y disminuía por lo tanto el negocio financiero del tema. También influyó el bajo costo -en aquella época- de los combustibles fósiles, que significó la detención del crecimiento nuclear y esto a su vez provocó rápidamente un alza desmedida en el consumo de combustibles fósiles para satisfacer la creciente y constante demanda de energía tanto por la población como por la industria en general.

A comienzos de los años 80 Estados Unidos detuvo la construcción de nuevas centrales nucleares. La causa más evidente de esta decisión fue la avería en la central nuclear Three Mile Island-2.

El grave accidente en la central nuclear de Chernobyl ocurrido en 1986 amplió la oposición a la energía nuclear, especialmente en Europa. También la tendencia en algunos países industrializados a renunciar a la regulación estatal sobre la producción de energía, originó la aparición de potencia sobrante en el mercado libre, esto a su vez influyó en el crecimiento de los precios de la electricidad, descenso de los ingresos de las compañías energéticas y al aumento del riesgo en las inversiones en las centrales eléctricas.

En cuanto a la inversión en nuevos proyectos se hizo relevante el índice del plazo del retorno de capital, justamente el eslabón débil de la industria nuclear por entonces, ya que para la construcción de una central eran necesarios plazos largos y gastos iniciales considerables. En contra partida estaba presente en esa época la alternativa del gas natural. Era muy atractivo por su bajo precio y cantidades aparentemente ilimitadas, asociado también a la errónea idea de que esa fuente de energía era un combustible limpio. Todo esto llevó en definitiva, a la reorientación de las inversiones de la industria nuclear hacia la del gas natural.

Si bien la falla en la central nuclear de Chernobyl y la consiguiente eliminación, en muchos países, del apoyo estatal a esta industria le valieron una mala imagen ante la opinión pública, el hecho es que terminó siendo una coincidencia de factores positivos, puesto que potenciaron la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías de seguridad y eficiencia, algo que resultaría determinante posteriormente para la consolidación de esta tecnología como una fuente segura, estable y económicamente atractiva para la generación eléctrica.

Sin embargo a partir del 1990, gradual y sostenidamente se volvió a recuperar el entusiasmo inicial. Esta vez no en base a la novedad, como en los años 60, sino al considerarla una herramienta tecnológica eficaz para, en primer lugar, permitir disponer de un sistema que produce gran cantidad de energía en una pequeña superficie de terreno, en segundo lugar, no producir gases de invernadero que inciden en el cambio climático y, en tercer lugar, hacerlo a un costo razonable y estable en el tiempo. Sumando estos tres factores, varios gobiernos han concluido, que esta industria, con los avances señalados, permite a una nación proyectar su economía sobre cifras conocidas y estables y paralelamente cumplir con las obligaciones ambientales internacionales, como lo es el “Protocolo de Kyoto”

Actualmente se observan mercados globalizados muy competitivos con un ritmo extremadamente rápido en la renovación de las distintas tecnologías que usa la población y la industria, tales como, celulares, automóviles, computadores, etc., lo cual involucra un crecimiento cada vez mayor del consumo de energía, especialmente en los países en vías de desarrollo (no tanto en los desarrollados, como Estados Unidos, Alemania y Japón, que alcanzaron ya su “peak”). Los futuros escenarios en relación al consumo de energía mundial predicen que esta cifra deberá duplicarse durante los próximos 50 años. Entonces, la

pregunta, que cualquier experto en la materia se haría es: ¿Cómo enfrentará la humanidad esta creciente demanda sin llegar al nivel de producción de gases de efecto invernadero que implique llegar a un límite en que sea irreversible el proceso del calentamiento global el que actualmente está en proceso?.

En respuesta a esta pregunta, la mayoría de los expertos coincide que solo se puede hacer mediante la adopción de las siguientes medidas:

- Mejorar la eficiencia en el uso de la energía eléctrica actualmente generada.
- Incentivar el uso de fuentes renovables de energía, tales como: la energía eólica, solar, geotérmica y la biomasa.
- Capturar las emisiones de carbono en las centrales eléctricas que trabajan en base a combustibles fósiles, en particular las de carbón.
- Optar por la energía nuclear.

De estos cuatro métodos, el único que aporta en forma significativa, gran cantidad de energía al sistema y en condiciones y forma ya explicadas, es la energía nuclear. Todas las anteriores son importantes de aplicar en la medida que sea posible y se dispongan los recursos, pero serán insuficientes si se quiere controlar las emisiones de gases de efecto invernadero en un plazo razonable, a fin de poder revertir la incontrolable tendencia actual en este aspecto.

En los acuerdos internacionales desarrollados por los principales países que detentan esta tecnología, especialmente en los proyectos INPRO y GIF, se llegó a la conclusión que la energía nuclear es hoy una alternativa real y sería para combatir el cambio climático, por ser esta una tecnología que emite una cantidad insignificante de gases de efecto invernadero. Pero también por contrapartida, se llegó a la conclusión que la industria nuclear, para que se desarrolle en gran escala como un medio para combatir el cambio climático, debe a la brevedad responder a cuatro aspectos claves:

- **Costos.** En la actualidad en el mercado libre, no siempre esta transparentado el costo real de la generación de energía eléctrica generada por las centrales nucleares. Se dice que no es competitivo en comparación con la generada en las centrales de carbón y de gas natural. Sin embargo se sabe y lo cual hay que precisar, que con la introducción en la operación de los reactores de IV generación, esta diferencia puede ser reducida, especialmente a expensas de una disminución razonable de la inversión inicial por la disminución en los tiempos de construcción

(de 12 años a 7 años para un reactor de 1.000 MW, y de 8 años a 5 años para un reactor de 400 MW) y a la reducción en los gastos de explotación. También hay que considerar, el gran costo ecológico que generan las centrales a carbón y a gas, cifras que se deben cuantificar para en definitiva compararlas adecuadamente con la generación eléctrica nuclear.

- **Seguridad.** La industria nuclear es considerada por una parte importante de la sociedad como una amenaza a su seguridad, al medioambiente y a la salud. Hay también una preocupación por un transporte confiable y seguro de los materiales nucleares, así como también por la protección de las centrales nucleares frente a eventuales ataques terroristas. Por lo tanto es imprescindible dar a conocer a la sociedad la realidad estadística existente respecto a los riesgos inherentes al uso del átomo en la generación eléctrica y las medidas adicionales que se están tomando hoy día. Una adecuada información despejará muchas dudas a la población en este terreno.
- **Desechos.** Debe demostrarse fehacientemente que el depósito de los desechos finales, aquellos que no pueden ser reciclados, es una operación que no produce impacto negativo al medioambiente en donde estos son depositados y los riesgos, si bien existen, como en toda industria humana, estos son acotados y controlados. También se debe destacar las ventajas del ciclo cerrado de combustible: mejor rendimiento, aumento del suministro en el mercado internacional e impacto ambiental considerablemente menor.
- **Armas Nucleares:** Es un tema que hay que considerar, especialmente debido al terrorismo. El problema radica principalmente en que cuando un país o una empresa llega a disponer de tecnología de reprocesamiento de combustible nuclear, accede también a la posibilidad de extraer y reprocesar plutonio, elemento con cual se puede -siempre y cuando se tenga los conocimientos y elementos tecnológicos necesarios- crear un arma nuclear no autorizada. Sin embargo, esta tecnología está hoy en día disponible solo en aquellos países autorizados que reprocesan el combustible nuclear, es decir, Estados Unidos, Francia, Inglaterra, China y Rusia, hecho que reduce, aunque no lo elimina, el riesgo de un uso inadecuado de este conocimiento.

La industria nuclear ya tiene 50 años de vida, los reactores que se han construido hasta la fecha, la mayor parte son de antigua generación, y ya están llegando al final de su vida útil. Los diseños originales estaban la mayoría proyectados para 30 años, en muchos casos este rango ya se ha prolongado por modernizaciones realizadas al reactor, pero, las fechas igual

están llegando a su límite. Esto significa que se tendrá, en las próximas décadas una renovación importante de centrales nucleares, la que va ser satisfecha por medio de reactores de nuevas generaciones, de los cuales los de IV generación, actualmente ya existentes, han mejorado significativamente su eficiencia especialmente en lo relacionado al uso de nuevos tipos de combustibles, y al reciclaje de estos, lo que permite alejar el temor a que el combustible nuclear es una limitante para la expansión de esta industria. Una representación esquemática de este proceso se puede apreciar en la Figura 2.3²⁴.



Figura 2.3 - Desarrollo de los reactores nucleares.

De acuerdo con el informe del OIEA, en el 2007, en un escenario optimista la potencia instalada de las centrales nucleares en el mundo hasta 2030²⁵ crecerá hasta 670 GWT, tomando en cuenta las unidades que se encuentran actualmente activas, también las que se van a renovar y los nuevos proyectos que se pondrán en marcha.

En la Tabla 2.1 se presentan los datos de la potencia eléctrica instalada de las Centrales Nucleares y la parte de la energía eléctrica generada por estas en el 2006, en los países de la OECD²⁶. En Rusia²⁷, por su parte, El 17% de la generación proviene de 31 unidades nucleares que están en operación actualmente. Sin embargo, en el año 2008, el parlamento de la Federación Rusa instruyó al Ministerio de Energía nuclear ROSATOM, incrementar este porcentaje a un 25 %, en un plazo de 15 años. En Ucrania hay 15 bloques de generación núcleo-eléctrica que generan el 50% del total de la energía eléctrica. En Lituania y Armenia

²⁴ Figura tomada del Foro Nuclear Español, España.

²⁵ Energy, Electricity and Nuclear Power Plants for the period up to 2030, IAEA, Vienna, 2007.

²⁶ NEA 2006 Annual Report, OECD Nuclear Energy Agency, 2007.

²⁷ Programa del desarrollo de la energía nuclear de la Federación de Rusia en 1998-2005 y la perspectiva hasta 2010.

la parte de las centrales nucleares en la generación de la energía eléctrica esta cerca del 70%.

Tabla 2.1 - Potencia eléctrica instalada de las centrales nucleares y la parte de la energía eléctrica generada por las centrales nucleares en 2006.

Países	Cantidad de unidades	Potencia instalada [GW]	Necesidad de uranio [t]	% de energía eléctrica generada por las Centrales Nucleares
Bélgica	7	5,8	880	54
Canadá	20	12,5	1.600	16
República Checa	6	3,5	664	32
Finlandia	4	2,7	467	28
Francia	59	63	7.184	78
Alemania	17	20	3.400	27
Hungría	4	1,8	379	38
Japón	55	47	8.352	34
México	2	1,4	200	4,7
Países Bajos	1	0,5	65	3,7
Corea	20	17	3.600	39
Eslovaquia	5	2,0	491	58
España	8	7,3	1.726	20
Suecia	10	8,9	1.600	45
Suiza	5	3,2	270	38
Gran Bretaña	19	11	2.165	19

Países	Cantidad de unidades	Potencia instalada [GW]	Necesidad de uranio [t]	% de energía eléctrica generada por las Centrales Nucleares
EE.UU.	104	100	22.890	19
Total OECD	346	308	55.933	23

En China e India, países con alto índice de crecimiento, aunque la proporción de la energía eléctrica generada por las centrales nucleares actualmente es pequeña, sin embargo estos países tienen considerado en sus planes a corto plazo expandir el uso de esta tecnología para diversificar su matriz eléctrica y satisfacer de esta forma su demanda futura aportando al sistema no menos de un 20% de energía nuclear.

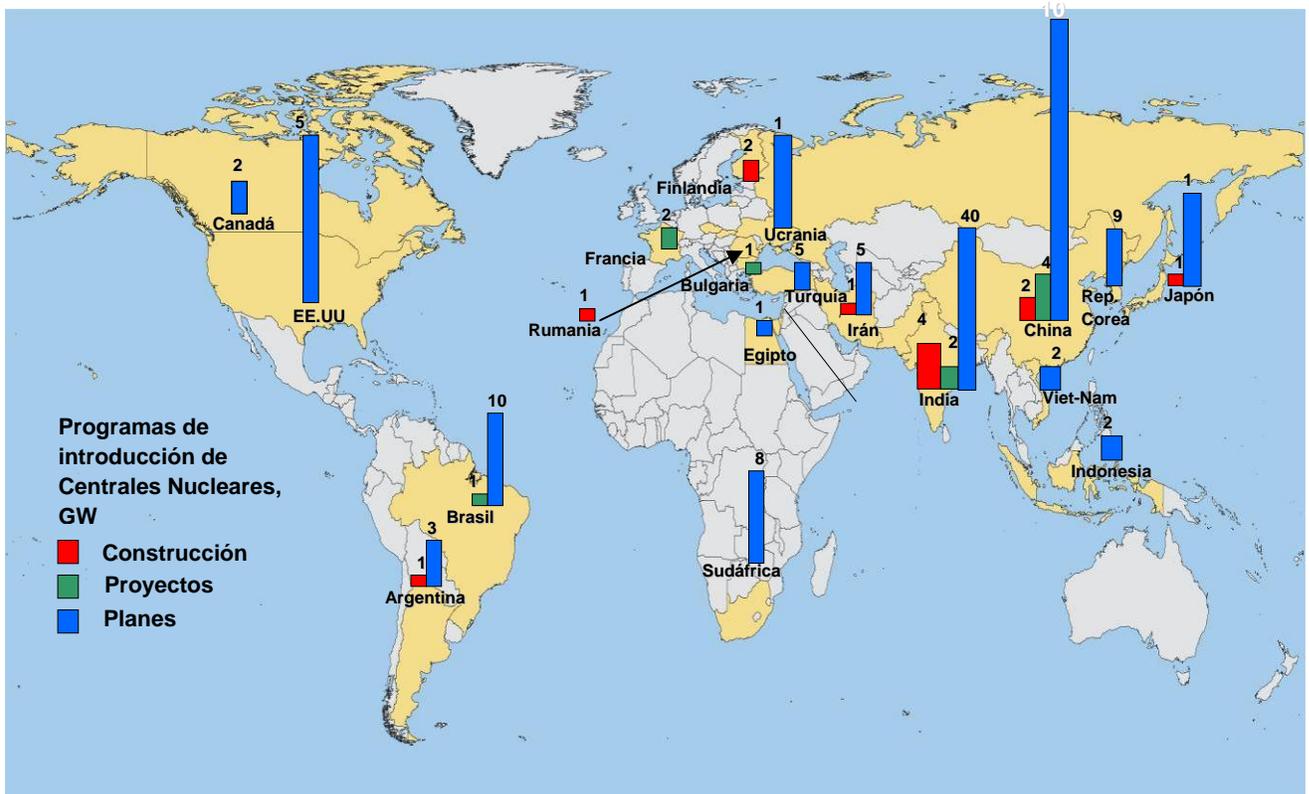


Figura 2.4 - Programas de puesta en marcha de Centrales Nucleares en varios países.

2.2. El combustible nuclear

En la industria nuclear el problema del abastecimiento de combustible se ha resuelto mejorando la tecnología a expensas del reprocesamiento de los materiales de desecho (empleando el ciclo cerrado de combustible, se trata en el Capítulo 4) y al uso de nuevos combustibles como el Plutonio, que se obtiene del reciclaje y de las armas nucleares y del torio, que se encuentra en la naturaleza en una mayor proporción que el uranio y su eficiencia es mayor que este. Esto asegura abastecimiento de combustible para la Industria Nuclear para 600 años y más.

A continuación se presenta un resumen analítico de los datos actuales acerca de las reservas de Uranio y Torio, además de la dinámica de sus precios.

2.2.1. Perspectivas para el uso del Uranio

De acuerdo con la “Lista Roja del Uranio” (Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OCED), 2005), en 2004 se extrajeron 41.250 toneladas de uranio, 440 reactores comerciales consumen 67 mil de toneladas del uranio por año. La producción del uranio abastece el 60 % de su consumo, ya que la otra parte se extrae de antiguas ojivas nucleares.

Según la información de las fuentes pesimistas, las reservas mundiales descubiertas de uranio bastarán para cubrir las necesidades de combustible nuclear solo por 80 años, sin embargo los especialistas discrepan de esta afirmación por las siguientes razones:

- Esta estimación está hecha sólo en base a los yacimientos antiguos descubiertos en proceso de explotación. No se consideran nuevos descubrimientos, por ejemplo, en Australia, India y Brasil. En particular, en este último país, se realizaron solo prospecciones en un tercio de la superficie, falta hacer prospección en más de la mitad del país.
- La valoración dada está referida sólo a los reactores con neutrones térmicos y con el ciclo tradicional abierto de combustible. No se considera el uso del ciclo cerrado de combustible.
- No se consideró el perfeccionamiento de la tecnología química y el aumento de los precios del uranio que garantiza la rentabilidad del procesamiento de minerales relativamente pobres.

- No se consideraron las reservas mundiales acumuladas en el plutonio de las armas que aseguran una producción considerable de combustible para los reactores nucleares energéticos (cerca del 25 % de los requerimientos actuales).

La Tabla 2.2 presenta información ilustrativa sobre las reservas mundiales de uranio. A su vez.

Tabla 2.2 - Reservas mundiales de uranio²⁸.

País	Toneladas Uranio	% de reservas mundiales
Australia	1.243.000	23
Kazajastán	817.000	15
Federación de Rusia	546.000	10
República Sudafricana	435.000	8
Canadá	423.000	8
Estados Unidos	342.000	6
Brasil	278.000	5
Namibia	275.000	5
Nigeria	274.000	5
Ucrania	200.000	4

²⁸ OECD/NEA and IAEA, Uranium 2007: Resources Production and Demand (“Libro Rojo”).

Uzbekistán	111.000	2
India	73.000	1
Mongolia	62.000	1
China	68.000	1
Otros	210.000	4
Reservas mundiales	5.469.000	

Para la carga del reactor nuclear son necesarias algunas decenas de toneladas de combustible. Según la World Nuclear Association, en el año 2007 en el mundo operaban 440 reactores nucleares, 32 - se encontraban en construcción, 288 - se planeaban construir. Un reactor promedio para su primera carga completa necesita 600 t de uranio y consume en lo sucesivo entre 150 y 200 t por año (FINANCE.UA 30.08.2007).

La necesidad de uranio en la energética nuclear mundial, está determinada en aproximadamente 80 mil toneladas por año. La extracción de uranio constituye cerca de 60 mil toneladas, y las otras 20 mil toneladas son completadas por el uso repetido de materiales altamente enriquecidos, obtenidos del desmantelamiento de las ojivas nucleares.

El precio del óxido natural del uranio U_3O_8 puede alcanzar 200 dólares de los Estados Unidos por kilogramo y oscila en el mercado mundial cerca de 100 dólares de los Estados Unidos por libra, según la información de la compañía UXC. Conforme a los datos del Banco Augonaut Securities el precio medio del uranio en contratos a largo plazo es de 80 dólares de los Estados Unidos por libra.

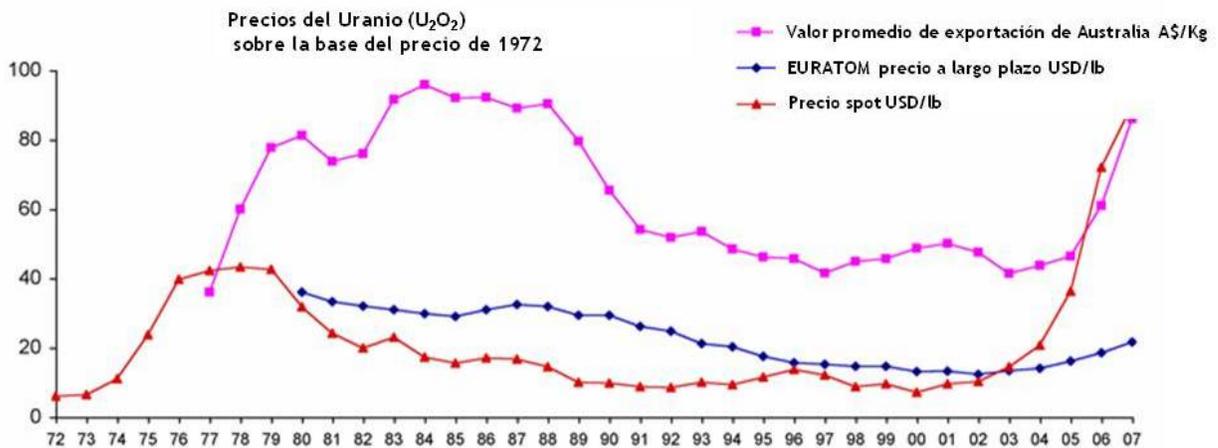
La fase más costosa de la producción del combustible nuclear es el proceso del enriquecimiento de uranio o su división isotópica, o sea el aumento del contenido del isótopo uranio-235, que en el uranio natural es de 0,711%, hasta 3-5% en el combustible energético. Los gastos de este proceso superan el 60% del costo total de la caseta de combustible cargada en el reactor, mientras que el costo del uranio natural consumido y el costo de la fabricación de la caseta de combustible constituyen menos del 25% del costo total.

Los precios mundiales del uranio sufren variaciones dependiendo de la demanda y los cambios de las perspectivas de la energía nuclear. La firma Trade Tech LLC sigue de cerca los precios del uranio desde el año 1968. En el periodo 2003-2007 las acciones de 12 compañías de extracción de uranio han subido 5 veces de precio. A mediados del 2008 el costo del metal fue de \$129 por libra. Conforme a las apreciaciones de RBC Capital Markets del Banco Real de Canadá, en el 2008 la compañía Cameco y otros productores de uranio pudieron producir 46.000 toneladas o 120 millones de libras de metal en comparación con su producción de 39.655 toneladas en el 2007, según la Asociación Mundial Nuclear.

Con el aumento de los precios del combustible fósil ha aumentado el costo del uranio en relación con el renacimiento de la industria nuclear. Desde comienzos del 2008 el costo del uranio crecía, pero según el fondo JP Morgan Asset Management, que dirige los activos de materias primas, debe disminuir hasta costar 70 dólares de los Estados Unidos por libra.

Las compañías energéticas compran habitualmente el uranio según contratos con un plazo de ejecución de cinco a diez años para garantizar los futuros suministros y el nivel de costos. Con estas condiciones el costo de la libra del uranio está cerca de \$95, según Ux Consulting Co. En el 2007 según los contratos a largo plazo se vendieron cerca de 200 millones de libras de uranio.

Según el pronóstico del OIEA hasta el año 2030²⁹ la potencia de la energía mundial nuclear alcanzará los 519 GW, y además el costo del uranio llegará hasta 200 dólares de los Estados Unidos por libra (Macquarie Bank).



²⁹ Energy, Electricity and Nuclear Power Plants for the period up to 2030, IAEA, Vienna, 2007.

Figura 2.6 - Dinámica del precio de uranio tomando como base el año 1972. (Fuente: Asociación Nuclear Mundial: <http://world-nuclear.org/info/inf22.html>).

Tabla 2.3 - Distribución geográfica de los recursos de uranio y su extracción.

País	% de reservas comprobadas*	% de extracciones (año 2005).
Australia	24	22
Canadá	9,5	28,5
Estados Unidos	7	2
Total OECD	43	53,5
Brasil	6	1
Namibia	6	7
Níger	5	8
África del Sur	7	2
Kazajistán	17	10
Federación Rusa	3,5	8
Uzbekistán	2,5	5,5

* Recursos generales determinados, explotados por menos de 130 dólares por tonelada de uranio.

2.2.2. Perspectivas del uso del Torio

El torio posee una serie de ventajas en comparación con el uranio para ser usado como combustible en los reactores nucleares, gracias a las diferencias de sus características y por su mayor abundancia en la naturaleza. El contenido del torio en la litosfera y la corteza terrestre es tres veces más alto que el de uranio. En la parte superior de la corteza

terrestre – la capa de granito y en su capa sedimentaria se contiene medianamente y respectivamente $1,8 \cdot 10^{-3}\%$ и $1,3 \cdot 10^{-3}\%$ de masa total. El torio natural consiste prácticamente de un isótopo de vida media largo: el ^{232}Th con un período de semi desintegración de $T_{1/2} = 1,39 \cdot 10^{10}$ años. El contenido del isótopo ^{228}Th , que se encuentra en equilibrio con éste, es muy pequeño: $1,37 \cdot 10^{-8}\%$.

El torio es una fuente ideal de energía de alta densidad por unidad de volumen. Durante su uso mejora la calidad del combustible nuclear en comparación con la utilización de uranio y disminuye el peligro potencial de la contaminación del aire, el agua y el suelo. De esta manera, con el uso del torio la formación de desechos es mucho menor y más fácil su control. Además, se puede pasar del uranio al torio en una central nuclear con Reactores VVER³⁰ con tan solo la modernización de la zona activa del reactor

Además pequeños reactores de torio son útiles para el trabajo de turbinas a vapor, se puede usar el vapor también para procesos tecnológicos, tales como la desalinización y limpieza del agua o para la síntesis de hidrógeno. El torio junto con el uranio ya se usa en los reactores energéticos de Alemania, los Estados Unidos, Brasil y la India.

Las principales ventajas del torio ante el uranio son las siguientes:

- Su ventaja económica está relacionada con el alto coeficiente de reproducción. Los reactores en base a torio pueden trabajar sin recarga por un período más prolongado.
- Un nivel elevado de seguridad. Los reactores en base a torio excluyen casi por completo los accidentes severos.
- Prácticamente una ausencia total de la formación de elementos transuránicos peligrosos para el medioambiente.
- El torio se somete a la fisión nuclear bajo la influencia de los neutrones rápidos y puede usarse en calidad de material reproductor para la obtención del uranio.
- El ciclo de combustible del torio, a diferencia del de uranio no lleva a la generación de plutonio y también se distingue por la baja cantidad de desechos radioactivos.

³⁰ VVER- Vodo Vodianoi Energeticheskii Reaktor (reactor ruso), traducible por Reactor de Energía Agua-Agua.

Según las estimaciones de especialistas de Rusia y los Estados Unidos los yacimientos de torio deben alcanzar para 600 años. La Tabla 2.4 presenta las reservas mundiales de torio descubiertas hasta hoy³¹.

Tabla 2.4 - Reservas mundiales de torio (aseguradas razonablemente y recursos recuperables inferiores a 80 dólares de los Estados Unidos por Kg de Torio).

País	Toneladas	% del Total
Australia	452.000	18
Estados Unidos	400.000	16
Turquía	344.000	13
Venezuela	300.000	12
India	319.000	12
Brasil	302.000	12
Egipto	100.000	4
Federación de Rusia	75.000	3
Groenlandia	54.000	2
Canadá	44.000	2
República Sudafricana	18.000	1
Otros países	33.000	1
Reservas mundiales	1.200.000	

³¹ Datos tomados de Uranium 2007: Resources, Production and Demand, Nuclear Energy Agency (June 2008), NEA #6345 (ISBN 9789264947662)

2.3. Tipos de centrales nucleares

Las centrales nucleares se pueden clasificar según distintos indicadores que abarcan desde el rango energético de los neutrones que se utilizan para la fisión, por su construcción, por el tipo de refrigerante que utilizan, el destino de la producción de calor y por la magnitud de la potencia del reactor.

Según el tipo de reactor: están los reactores de neutrones térmicos, de neutrones rápidos, los reactores termonucleares y los reactores subcríticos que usan fuentes externas de neutrones. Según la construcción del reactor: de cuerpo o de canal. Por el tipo de refrigerante: agua, grafito, gas o metales líquidos. Para mejorar la eficiencia de absorción del neutrón por los núcleos de los átomos del combustible, en los reactores a neutrones térmicos se usan moderadores especiales (grafito, agua ligera o pesada).

Según la estructura de la zona activa se pueden clasificar también en:

- Heterogéneo: tienen el moderador interpuesto de forma discontinua en la masa activa de los elementos de combustible. Este tipo de reactor es el que se encuentran en estos momentos en operación en el mundo.
- Homogéneo: tienen el moderador mezclado con la masa activa de los elementos de combustible de modo íntimo y homogéneo. Se encuentra en fase de estudio y ensayo de algunos prototipos.

Por el tipo de energía generada las centrales nucleares se dividen en:

- Centrales nucleares destinadas a la generación de energía eléctrica.
- Centrales nucleares que producen energía eléctrica y energía térmica.
- Centrales nucleares de energía térmica destinadas para la calefacción.

Según su destino final también pueden clasificarse:

- Electricidad.
- Calefacción.
- Investigación.
- Transporte (submarinos y barcos).
- Multifuncionales (por ejemplo: generación de energía eléctrica y desalinización de agua de mar).

A continuación, se revisan en general las diferentes tecnologías de reactores disponibles comercialmente, las cuales se diferencian esencialmente por el grado de enriquecimiento del uranio que utilizan y, por ende, del tipo de moderador con que cuentan.

Los más usuales son los LWR (Light Water Reactor: Reactores con Agua Liviana) y dentro de ellos se distinguen los de tipo PWR y BWR. Sus principales características son:

- **PWR** (Pressurised Water Reactor: Reactor con Agua Presurizada). Tanto el refrigerante como el moderador son agua ligera presurizada. El refrigerante transfiere su calor a un fluido de un circuito secundario que acciona las turbinas. El combustible utilizado es óxido de uranio (UO_2) enriquecido. Para recargar el combustible requiere detener la central cada 18 meses. La versión rusa de esta tecnología es el reactor **VVER**³².
- **BWR** (Boiling Water Reactor: Reactor con Agua en Ebullición): Tanto el refrigerante como el moderador son agua ligera. No posee circuito secundario, el refrigerante acciona directamente a las turbinas. El combustible utilizado es también óxido de uranio (UO_2) enriquecido.

El segundo tipo más común de reactor es:

- **PHWR** (Pressurised Heavy Water Reactor: Reactor con Agua Pesada Presurizada); más conocido con el nombre de CANDU³³. Tanto el refrigerante como el moderador son agua pesada (D_2O) presurizada. El refrigerante transfiere su calor al fluido de un circuito secundario que acciona a las turbinas. El combustible utilizado es óxido de uranio (UO_2) natural. Para recargar el combustible no se requiere parar la central, sino que puede realizarse durante la operación.

Existe un reducido número de otros tipos de reactores de potencia, funcionando mediante otras tecnologías. Algunos de estos se encuentran aún en proceso de desarrollo:

- **GCR** (Gas Cooled Reactor: Reactor Refrigerado a Gas). El refrigerante es anhídrido carbónico moderado con grafito. Los exponentes más destacados de esta tecnología lo constituyen el Magnox³⁴ y el AGR³⁵. El combustible es uranio natural metálico y dióxido de uranio (UO_2) enriquecido.

³² VVER - Vodo Vodianoi Energetichskii Reaktor, traducible por Reactor de Energía Agua-Agua.

³³ Canada Deuterium Uranium.

³⁴ El nombre MAGNOX proviene de la aleación constituida por magnesio, con pequeñas cantidades de aluminio y otros metales, usadas para revestir las vainas de combustible.

³⁵ AGR - Advanced Gas-cooled Reactor, Reactor refrigerado a gas Avanzado.

- **LWGR** (Light Water Graphite Reactor: Reactor Refrigerado con Agua ligera y Moderado con Grafito). También conocido por su sigla en ruso RBMK³⁶. El combustible utilizado es óxido de uranio (UO₂) enriquecido. Otro modelo, e, GBWR, puede considerarse como un subgrupo. Se utiliza para la producción de calor y potencia. El combustible utilizado es también óxido de uranio (UO₂) enriquecido.
- **FBR** (Fast Breeder Reactor; también conocido como Fast Neutron Reactor, Reactor de Neutrones Rápidos). Refrigerado con sodio líquido, sus componentes son básicamente los mismos que los de un reactor tradicional, salvo por la ausencia de moderador y la presencia de una zona llamada blanket (manta) que rodea al núcleo, ubicada entre el núcleo y el reflector. En ella se disponen tubos conteniendo uranio natural o uranio empobrecido proveniente de plantas de reprocesamiento. El propósito es que el uranio 238 absorba los neutrones rápidos que se fugan del núcleo, obteniendo así plutonio 239 (²³⁹Pu) fisible. El combustible utilizado es óxido de plutonio (PuO₂) y dióxido de uranio (UO₂).

La Tabla 2.2.1³⁷ muestra la distribución de los diversos tipos de reactores, así como los principales países que los poseen.

Tabla 2.2.1 - Reactores nucleares en operación en el mundo a finales del 2007

Tipo de Reactor	Principales Países	Cantidad	GW _e	Combustible	Refrigerante	Moderador
Reactor de Agua a presión (PWR/VVER)	EE.UU, Francia, Japón, Rusia, Brasil	265; 66 son VVER	251,6	UO ₂ enriquecido	agua	agua
Reactor de Agua en ebullición (BWR)	EE.UU, Japón, Suecia, México	94	86,4	UO ₂ enriquecido	agua	agua
Reactor Enfriado a Gas (Magnox & AGR)	Gran Bretaña	18	10,8	U natural (metal), UO ₂ enriquecido	CO ₂	grafito
Reactor de Agua	Canadá,	44	24,3	UO ₂ natural	agua pesada	agua

³⁶ RBMK - Reaktor Bolshoy Moshtchnosti Kanalniy, traducible por Reactor de Potencia de tipo canal.

³⁷ Nuclear Engineering International Handbook 2008.

Tipo de Reactor	Principales Países	Cantidad	GW _e	Combustible	Refrigerante	Moderador
Pesada Presurizada "CANDU" (PHWR)	India, Argentina					pesada
Reactor de Agua y Grafito (LWGR/RBMK/)	Rusia	12	12,3	UO ₂ enriquecido	agua	grafito

Tipo de Reactor	Principales Países	Cantidad	GW _e	Combustible	Refrigerante	Moderador
Reactor de Neutrones Rápidos (FBR)	Francia, Rusia, Japón	4	1,0	PuO ₂ y UO ₂	sodio líquido	ninguno
Otros	Rusia	4	0,05	UO ₂ enriquecido	Agua	grafito
	TOTAL	441	386,5			

De los 33 reactores nucleares actualmente en construcción, 24 son del tipo PWR, 2 del tipo BWR, 4 del tipo PHWR, 2 del tipo FBR y 1 del tipo LWGR.

Los reactores más difundidos en el mundo son aquellos que usan como refrigerante agua a presión, denominados PWR. A esta clase pertenecen también los reactores nucleares de procedencia rusa, los de agua-agua, también denominados VVER. En varios países (Estados Unidos, Japón, Suecia y otros) están en operación reactores nucleares de cuerpo refrigerados con agua en ebullición, denominados también BWR. En Gran Bretaña están en operación reactores nucleares que utilizan gas como refrigerante.

En Canadá son construidos reactores de canal con agua pesada (CANDU) que también se usan en otros países. En Rusia y Lituania también se explotan reactores de canal con moderador de grafito de tipo RBMK.

La primera central nuclear en el mundo con fines pacíficos, fue diseñada y construida por la Unión Soviética y fue puesta en operación el 27 de junio de 1954 en la ciudad Obninsk,

situada en la región de Kaluga y corresponde a una central de 5 MW de potencia. La segunda central nuclear para uso industrial, con una potencia de 46 MW, fue puesta en operación en el año 1956 en Calder-Hall (Gran Bretaña). La tercera central nuclear, con una potencia de 60 MW de potencia, fue puesta en servicio en Shippingport (EE.UU) en el año 1957.

Los líderes mundiales en la generación núcleo-eléctrica son Estados Unidos (790 mil millones de Kw-h/año), Francia (430 mil millones KWh/año), Japón (275 mil millones KWh/año), Alemania (160 mil millones KWh/año) y Rusia (155 mil millones KWh/año).

La mayor central nuclear de Europa es la de Zaporozhnie, en Ucrania, donde operan 6 reactores nucleares VVER-1000 con una potencia total de 6 GW. Y la mayor central nuclear en el mundo, es Kashiwazaki-Kariwa, con una potencia total de 8,2 GW. Esta central se encuentra en la ciudad japonesa Kashiwazaki y tiene en operación 7 reactores nucleares de agua en ebullición (BWR), incluyendo dos reactores nucleares avanzados (ABWR).

Los diferentes tipos de reactores y el estado actual de las unidades que se encuentran en operación y conectadas al sistema eléctrico o están en proceso de cierre definitivo por término del período de vida de operación, se presentan en la Tabla 2.3.2.

Tabla 2.3.2 - Información sobre el estado de las unidades de energía por países³⁸.

Países	En funcionamiento		En construcción		Cierre definitivo	
	Cantidad de unidades energéticas	Potencia eléctrica total, MW	Cantidad de unidades energéticas	Potencia eléctrica total, MW	Cantidad unidades energéticas	Potencia eléctrica total, MW
Argentina	2	935	0	0	0	0
Armenia	1	376	0	0	1	376
Bélgica	7	5.712	0	0	0	0
Bulgaria	4	2.722	0	0	0	0
Brasil	2	1.901	0	0	0	0

³⁸ Nuclear Power Reactors in the World, 2008 Edition, IAEA, Vienna, 2008.

Países	En funcionamiento		En construcción		Cierre definitivo	
	Cantidad de unidades energéticas	Potencia eléctrica total, MW	Cantidad de unidades energéticas	Potencia eléctrica total, MW	Cantidad unidades energéticas	Potencia eléctrica total, MW
Gran Bretaña	19	11.207	0	0	0	0
Hungría	4	1.755	0	0	0	0
Alemania	17	20.173	0	0	1	296
India	14	2.550	8	3602	0	0
Indonesia	1	0	0	0	0	0
Irán	0	0	1	915	0	0
España	8	7.324	0	0	0	0
Kazajstán	0	0	0	0	1	52
Canadá	20	12.571	0	0	0	0
China	9	6.587	0	0	0	0
Lituania	1	1.185	0	0	0	0
México	2	1.360	0	0	0	0
Países Bajos	1	450	0	0	0	0
Pakistán	2	425	0	0	0	0
Rusia	31	21.743	5	4525	2	482
Rumania	1	650	1	650	0	0
Corea Norte	0	0	1	1040	0	0

Países	En funcionamiento		En construcción		Cierre definitivo	
	Cantidad de unidades energéticas	Potencia eléctrica total, MW	Cantidad de unidades energéticas	Potencia eléctrica total, MW	Cantidad unidades energéticas	Potencia eléctrica total, MW
Eslovaquia	5	2.408	2	776	0	0
Eslovenia	1	676	0	0	0	0
EE.UU.	104	99.840	0	0	6	1162
Taiwán	5	0	2	0	0	0
Ucrania	14	12.157	2	1900	1	925
Finlandia	4	2.641	1	0	0	0
Francia	59	62.563	1	1450	0	0
Rep. Checa	6	3.472	0	0	0	0
Suiza	5	3.202	0	0	1	9
Suecia	10	8.837	0	0	0	0
África Sur	2	1.821	0	0	0	0
Corea Sur	20	17.460	0	0	0	0
Japón	55	46.770	0	0	1	148

2.4. Proyectos en desarrollo³⁹

³⁹ A. V. Zrodnikov. La energética nuclear del siglo XXI. La sexta conferencia Internacional científica-técnica de consorcio "Rosatom" - MNTK-2008, Moscú, 21-23.05.2008. AC10. Petrov E. L., Suglobov D. N., Jakovlev R. M. Reactor-2020. La Estrategia XXI atómica, № 24, agosto de 2006

Luego de la descripción de los diferentes tipos de reactores realizada en el apartado anterior, es necesario distinguir cuatro generaciones de reactores nucleares. La **Generación I** comprende a los primeros diseños y construcciones de reactores de potencia. Puede establecerse, con el fin de determinar un inicio, que los primeros reactores de esta clase comenzaron a operar desde 1954. A partir de la experiencia adquirida y utilizando los nuevos recursos tecnológicos desarrollados en distintas áreas, a comienzos de la década de 1960 se introdujeron nuevos diseños y se construyeron reactores mejorados, dando inicio así a la **Generación II**. Como fecha de inicio de esta segunda etapa puede establecerse el año 1970.

El proceso de investigación y desarrollo sobre centrales nucleares se frenó hacia fines de la década de los 80, cuando se redujo el crecimiento de la energía nucleoelectrónica mundial, demorando la aparición de la **Generación III**. Esta considera reactores cuyas características de operación, seguridad y gestión de combustible en el núcleo mejoran sustancialmente respecto de la Generación II, incorporando avances tecnológicos y economías de escala. Como fecha de inicio de esta tercera podría establecerse el año 1995. La próxima fase, llamada **Generación III+**, presenta algunas mejoras respecto a la Generación III especialmente respecto a la seguridad.

Las Generaciones I y II corresponden a reactores actualmente en funcionamiento, la III y III+ a los actualmente en construcción o en funcionamiento reciente. Si bien se seguirán comercializando reactores de generación II, a corto plazo la mayoría de las nuevas centrales nucleares tendrán reactores de diseños evolutivos, a partir de sistemas ya probados de Generación III y III+.

A más largo plazo la atención estará centrada en los diseños innovadores, la Generación IV. Estos diseños se orientan a incrementar las ventajas en las áreas de seguridad radiológica y seguridad física, de no proliferación, de gestión de residuos y de utilización y economía del recurso, así como a ofrecer una variedad de productos y flexibilidad de diseño, de localización y de opciones de combustible. Actualmente se encuentran todavía en fase de diseño, previendo su comercialización dentro de aproximadamente 20 ó 30 años.

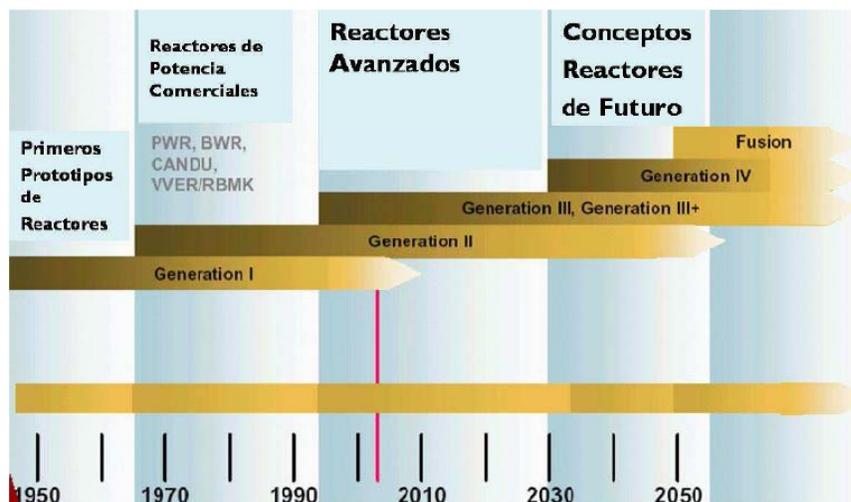


Figura 2.7 - Evolución histórica de la energía nuclear: pasado, presente y futuro (Fuente: Foro Nuclear Español).

A continuación se presentan con mayor detalle los tipos de reactores de generación III y III+ que se han desarrollado o se encuentran en vías de desarrollo.

Generación III

- **ABWR** (Advanced Boiling Water Reactor: BWR Avanzado) el primer reactor de Generación III. Desarrollado por General Electric (GE), Hitachi Ltd. y Toshiba Corp., con una potencia del orden de los 1.300 MW.
- **AP600** (Advanced Passive 600: reactor Pasivo Avanzado) reactor tipo PWR diseñado por Westinghouse con una potencia de 600 MW.
- **System 80+**, reactor tipo PWR desarrollado por ABB. Constituye la base de los reactores APR1400 (Advanced Power Reactor) desarrollados por la República de Corea en cooperación con Estados Unidos.

Generación III+

- **EPR** (European Pressurized Reactor, Reactor Presurizado Europeo en su versión europea o Evolutionary Pressurized Water Reactor, Reactor Presurizado Evolucionario en su versión americana). Se trata de un reactor tipo PWR de desarrollo franco-alemán, con una potencia de unos 1.600 MW. La primera unidad EPR está siendo construida en Olkiluoto, Finlandia y se ha resuelto la construcción de una segunda unidad en Francia.

- **AP1000** (Advanced Passive 1000), reactor tipo PWR desarrollado por Westinghouse, con una potencia de unos 1.000 MW.
- **ESBWR** (Economic Simplified BWR o European Simplified BWR) desarrollado por General Electric e Hitachi Nuclear Energy, con potencia de unos 1.500 MW. Aún no hay ninguno instalado.
- **ACR Series** (Advanced Candu Reactor) con potencias de 700 MW y 1.200 MW.
- **AHWR** (Advanced Heavy Water Reactor), reactor desarrollado por India con una potencia de 300 MW. El combustible posee torio 233 (^{233}Th) y plutonio (Pu). Su vida útil es de unos 100 años. Se desconoce el estado de avance del diseño.

Por otra parte, existe otra clasificación de reactores en cuanto a su potencia: se denominan Reactores Pequeños a aquellos cuya potencia eléctrica es inferior a los 300 MW y Reactores Medianos a aquellos cuya potencia eléctrica está entre 300 y 700 MW. Ambos grupos constituyen la familia de los SMRs: Small and Medium Reactors (Reactores Pequeños y Medianos). A los de potencias mayores se los denomina simplemente Reactores.

En el mundo se encuentran en operación alrededor de 140 reactores pequeños y medianos, con una potencia total instalada de unos 61 GW, lo que corresponde a un 16% de la potencia mundial instalada de generación nucleoelectrónica. En general, se trata de reactores de Generaciones I y II todavía en operación, además de algunos prototipos. En construcción se registra aproximadamente una decena.

Existe un conjunto importante de reactores pequeños en proceso de desarrollo, de Generaciones III, III+ y IV. Del análisis de la documentación se desprende que estos deberían estar comercialmente disponibles a partir del 2018. Aquellos cuyo estado de avance parece más promisorio son los siguientes:

- **IRIS** (International Reactor Innovative and Secure). Se lo considera el diseño puente entre la Generación III+ y la IV. Westinghouse dirige el consorcio que lo desarrolla como el proyecto líder de los reactores de Generación III+. Se trata de un reactor PWR de 335 MW (podría ser también menos, 100 MW) con los generadores de vapor y el circuito primario de refrigeración contenidos en el recipiente de presión. El combustible es en principio similar a los de cualquier LWR, pero con un enriquecimiento superior, del 5-9 %. Esto permitiría que los intervalos de recarga de combustible sean mayores, de 3 a 3,5 años. Se

encuentra en etapa de licenciamiento en Estados Unidos y se espera que ésta culmine hacia 2015. Asimismo, se estima que el primer reactor comercial estaría disponible hacia 2018 ó 2019.

- **SMART** (System-Integrated Modular Advanced Reactor), desarrollado por la República de Corea. Se trata de un reactor de tipo PWR de 90 MW. Funcionaría con U_2O levemente enriquecido. Un primer prototipo estaría funcionando en 2009, pero no existe fecha estimativa de puesta en funcionamiento de un primer reactor comercial de este tipo.
- **CAREM** (Central Argentina de Elementos Modulares). Se trata de un modelo PWR, de 27 ó 300 MW, de diseño argentino, cuyo proceso de desarrollo estuvo detenido durante muchos años. Funcionaría con U_2O ligeramente enriquecido. Recientemente se ha resuelto retomar los trabajos, previéndose la construcción de un prototipo de 27 MW. No existe aún una fecha estimada para la puesta en marcha de un reactor comercial.
- **PBMR** (Pebble Bed Modular Reactor). Es un diseño novedoso de tipo HTGR (High Temperature Gas Reactor, es decir, reactor a gas de alta temperatura), utilizando helio como sustancia refrigerante. Se trata de un proyecto Sudafricano en colaboración con otros países. El combustible posee también un diseño novedoso. La potencia sería de 165 MW. El hecho de funcionar a alta temperatura presenta la ventaja de poder producir hidrógeno, que podría comenzar a reemplazar a los derivados del petróleo en el transporte. Hasta ahora no se ha podido terminar de comprobar experimentalmente el funcionamiento del diseño, ni se conoce una fecha estimada de puesta en marcha de un reactor comercial.

La Tabla 2.3.3 presenta un listado completo de los proyectos en desarrollo de reactores pequeños y medianos (SMRs) con diseño innovador.^{40, 41, 42}

Tabla 2.3.3 - Reactores pequeños innovadores en desarrollo.

⁴⁰ Progress in Design and Technology Development for Innovative Small and Medium Sized Reactors. IAEA. 2 July 2007.

⁴¹ Innovative Small and Medium Sized Reactors: Design Features, Safety Approaches and R&D Trends. Final report of a technical meeting held in Vienna, 7-11 June 2004. IAEA-TECDOC-1451, Vienna, 2005.

⁴² Status of Innovative Small and Medium Sized Reactor Designs 2005: Reactors with Conventional Refuelling Schemes. IAEA-TECDOC-1485, Vienna, 2006.

NOMBRE	PAIS	TIPO	POTENCIA [MW]	Opción básica combustible
SMART System-integrated Modular Advanced Reactor	República de Corea	PWR	90	Ciclo abierto, U ₂ O levemente enriquecido
IRIS International Reactor Innovative and Secure	EE.UU.	PWR	335	Ciclo abierto, U ₂ O levemente enriquecido
CAREM Central Argentina de Elementos Modulares	Argentina	PWR	27/300	Ciclo abierto, U ₂ O levemente enriquecido
MARS Multipurpose Advanced Reactor, Inherently Safe	Italia	PWR	150	Ciclo abierto, U ₂ O levemente enriquecido
SCOR Simple Compact Reactor	Francia	PWR	630	Ciclo abierto, U ₂ O levemente enriquecido
IMR Integrated Modular water Reactor	Japón	LWGR	350	Ciclo abierto, U ₂ O levemente enriquecido
VVER-300 Water cooled modular power reactor	Rusia	PWR	295	Ciclo abierto, U ₂ O levemente enriquecido
VK-300 Water cooled and moderated natural circulation BWR	Rusia	BWR	250	U ₂ O enriquecido al 4,4%
CCR Compact Containment	Japón	BWR	300	Ciclo abierto, U ₂ O levemente

NOMBRE	PAIS	TIPO	POTENCIA [MW]	Opción básica combustible
boiling water Reactor				enriquecido
RMWR Reduced Moderation Water Reactor	Japón	BWR	330	Ciclo cerrado, U, MOX
AHWR Advanced Heavy Water Reactor	India	LWHWR	300	Ciclo abierto con Pu-Th
RUTA-70 Reactor facility for district heating with atmospheric pressure in the primary circuit	Rusia	LWR	No genera electricidad, solo calor	Ciclo abierto, U ₂ O levemente enriquecido en forma de micro partículas en una matriz metálica
KAMADO Concept of a safety reactor	Japón	LWR Flujo directo y tubos de presión	300	Ciclo abierto, U ₂ O levemente enriquecido
PBMR Pebble Bed Modular Reactor	Sudáfrica	HTGR	165	Ciclo abierto, U ₂ O recarga en operación
GT-MHR Gas Turbine Modular Helium Reactor	EE.UU.-Rusia	HTGR	287	Ciclo abierto, U ₂ O
HTR-PM High Temperature gas cooled Reactor-Pebble Bed Module	China	HTGR	160	Ciclo abierto, U ₂ O recarga en operación
FAPIG-HTGR	Japón	HTGR	100	Ciclo abierto, U ₂ O

NOMBRE	PAIS	TIPO	POTENCIA [MW]	Opción básica combustible
FAPIG-High Temperature Gas cooled Reactor				recarga en operación
ACACIA Advanced atomic cogeneration for industrial applications	Holanda	HTGR	18,1 - 23,2	Ciclo abierto, U2O recarga todo el núcleo cada vez
KALIMER Korean Advanced Liquid Metal Reactor	República de Corea	Reactor Rápido refrigerado con sodio	150	Ciclo cerrado, U
BMN-170 Modular plant with sodium cooled fast reactor	Rusia	Reactor Rápido refrigerado con sodio	170	Ciclo cerrado, U, Pu
MDP Modular Double Pool liquid metal cooled fast breeder reactor	Japón	Reactor Rápido refrigerado con sodio	325	Ciclo cerrado, U, Pu
RBEC-M Lead-bismuth cooled reactor with high level of natural circulation	Rusia	Reactor Rápido refrigerado con plomo-bismuto	340	Ciclo cerrado, U, Pu
PEACER-300/550 Liquid metal cooled fast reactor for waste transmutation and power production	República de Corea	Reactor Rápido refrigerado con plomo-bismuto	300 (550)	Ciclo cerrado, U

NOMBRE	PAIS	TIPO	POTENCIA [MW]	Opción básica combustible
Medium Scale Lead-bismuth Cooled Reactor Modular	Japón	Reactor Rápido refrigerado con Pb-Bi ⁴³	710	-
AHTR Advanced High Temperature Reactor	EE.UU.	No convencional	300 - 1.200	Ciclo abierto

2.5. La industria nuclear rusa⁴⁴

Rusia, fue el primer país en el mundo que inició el uso pacífico de la energía atómica, en el año 1954. Para la generación de electricidad construyó centrales nucleares con diferentes tipos de reactores en su propio territorio así como en el extranjero. El espectro de la tecnología nuclear rusa abarca distintas direcciones, incluyendo los reactores de canal y de cuerpo, los reactores a neutrones térmicos y rápidos, los reactores con agua ligera en ebullición como refrigerante y los de sodio a presión, también los reactores con metal líquido (fundido) como refrigerante.

A continuación se detallan los principales reactores usados actualmente en Rusia, así como los proyectos en curso.

2.5.1. Reactores de gran potencia

2.5.1.1. Reactor VVER - 1000

Hasta el momento se han construido 66 reactores tipo VVER con tecnología rusa, 59 de ellos operan en países de Europa y Asia. La mayoría de las centrales nucleares que actualmente operan en el mundo, más de un 60%, son de este tipo, que en el caso de ser rusos, su

⁴³ Pb-Bi: Plomo-Bismuto.

⁴⁴ Todo este desarrollo es elaboración propia del Consorcio Ruso "ROSATOM", formulado en base a su experiencia en el diseño, construcción y operación de reactores nucleares (ver: <http://www.rosatom.ru/>).

denominación es VVER y si es occidental su denominación es PWR. Entre estas dos tecnologías las diferencias no son significativas, ambos son reactores con agua a presión.

Sin embargo, la experiencia de operación ha mostrado algunas ventajas de la central nuclear con los reactores VVER en comparación con las unidades de energía PWR y también con respecto a otros tipos de centrales nucleares. Por ejemplo, el análisis tecnológico ha demostrado un rendimiento económico mayor en la operación de la central nuclear con reactor VVER en comparación por ejemplo, con centrales nucleares con reactores CANDU y también con respecto a los reactores PWR. El motivo principal, es la mayor eficiencia de los generadores de vapor de la central nuclear con reactores VVER. Esta circunstancia esencialmente está condicionada por los distintos materiales de construcción y el régimen químico del agua del primer circuito del VVER. En particular, la aparición de fisuras por corrosión en los tubos de los generadores de vapor y una serie de otros componentes en medio del refrigerante del primer circuito, es uno de los procesos básicos de degradación de la central nuclear con reactores tipo PWR. Por el contrario, en la central nuclear con VVER la experiencia acumulada ha demostrado que el primer circuito prácticamente no presenta fisuras por corrosión.

En Rusia y otros países se construyen versiones avanzadas de reactores de la serie VVER-1000 (V-320) que operan con éxito en varios países. Dos nuevas unidades VVER-1000 (V-392) se construyeron con éxito en China durante el año 2006. Y nuevas unidades VVER-1000 se construyen actualmente en China, India, Irán y Bulgaria.

2.5.1.2. Reactor VVER - 1200

Actualmente ya existe en el mercado la última versión de este modelo: el reactor **VVER - 1200**, cuya principal diferencia radica en que su coeficiente de rendimiento fue aumentado hasta en un 36%, lo cual se explica por los siguientes motivos:

- Aumento de la potencia térmica del reactor hasta 3.200 MW.
- Aumento de la potencia eléctrica hasta 1.160 MW.
- Aumento del período de vida de servicio hasta 60 años.
- Aumento del coeficiente de la utilización de la potencia instalada (factor de planta) hasta 90%.

En Rusia hay dos centrales de este tipo en construcción en la actualidad.

Respecto a la seguridad, en el modelo VVER-1200 los sistemas pasivos pueden cumplir de modo autónomo todas las funciones críticas sin la participación de los sistemas activos y del operador en situación de corte de suministro de energía de producción interna, externa y de emergencia. Los sistemas activos, a su vez, garantizan el suministro constante de energía y el control por parte del operador. La envoltura de protección doble con el juego circular es ventilada por los sistemas activos y pasivos autónomos. El sistema pasivo de extracción de calor de los generadores de vapor garantiza de manera continua la extracción del calor generado por el reactor, sin intercambiadores especiales. En caso de pérdida del refrigerante, los sistemas pasivos de suministro complementario aseguran la recarga del agua borada (que contiene ácido bórico) desde el recipiente, por gravedad.

Tabla 2.4.1 - Comparación del modelo VVER-1000 con el VVER-1200.

Características	VVER-1000	VVER-1200	Diferencia %
Potencia eléctrica, MW	1.020	1.170	+ 14,7
Generación anual, Miles de MWh	7,5	9,0	+ 20,0
Vida útil (proyectada), años	30	50	+ 66,7
Reducción del tiempo promedio anual de detención planificada, días	40	25	- 37,5
Coefficiente de disponibilidad, unidad relativa	0,80	0,92	+ 15,0
Área específica, m ² /KW	13,1	11,9	- 9,1
Volúmenes específicos de obras de construcción, m ³ /MW	620	512	- 17,4
Volumen del combustible nuclear gastado (CNG) en forma de caseta (fuel assembly), t /Miles de MWh	5,5	3,5	- 36,4

Se prevé para el VVER-1200 un sistema de seguridad para el evento de fusión completa de la zona activa, para lo cual debajo del cuerpo del reactor se ubican instalaciones que permiten la retención del material fundido. La probabilidad de fusión completa de la zona activa es de $1,0 \cdot 10^{-7}$ /reactor-año.

En general, el mejor rendimiento económico del VVER - 1200 se logra gracias a una mayor eficiencia en el costo de seguridad activa, a la reducción del consumo de concreto y metales por un mejor diseño de la central, a la disminución de los gastos de operación de la central y al aumento del período de vida útil.

2.5.1.3. Reactores MKER⁴⁵

Es un reactor de potencia tipo canal refrigerado con agua ligera y moderado con grafito, asegura la generación de electricidad, calor y producción de radioisótopos. Existen 3 modelos, el MKER-800, MKER-1000 y el MKER-1500, cuyas características técnicas fundamentales se presentan en la Tabla 2.4.2.

Tabla 2.4.2 - Comparación de los tres modelos MKER.

Característica	MKER-800	MKER-1000	MKER-1500
Potencia del reactor, MW:			
Térmica	2.450	3.000	4.260
Eléctrica	860	1.068	1.500
Calor para la calefacción, MWt (Gcal/h)	105 (90)	130 (112)	230 (200)
Coeficiente de rendimiento:			
Bruto	35,1	35,6	35,2 (36,8)
Neto	33,5	34,0	33,3 (34,7)
Combustible	UO ₂	UO ₂	UO ₂ , MOX
Enriquecimiento del combustible, %	2,4	2-2,4	2-3,2
Profundidad media del quemado, MW·día/kg	26-28	28	30-45
Refrigerante	Agua	Agua	Agua

⁴⁵ S. E. Gmyrko, et al., Los reactores del tipo de canal como la parte integrante de la energética nuclear del país, Energía Atómica, 2007, t. 103, ed. 1, con. 29-36.

Característica	MKER-800	MKER-1000	MKER-1500
Moderador y reflector	Grafito	Grafito	Grafito
Temperatura del agua de alimentación, °C	187	233	229
Temperatura del refrigerante a la entrada, °C	275	265,6	274
Gasto del refrigerante a través del reactor, t/h	23.300	25.309	30.804
Producción de vapor t/h	4.600	5.891	8.600 (8.270)
Presión del vapor en los separadores, MPa	7	6,5	7,5
Contenido medio de vapor a la salida, %	19,7	23,3	27,9 (26,9)
Altura de la zona activa, m	6	6	7
Diámetro de la zona activa, m	11	12,1	14
Número de los canales de combustible	1.580	1.824	1.824
Número de canales del Sistema de Mando y Protección	221	233	219
Temperatura máxima del grafito, °C	510	590	640
Temperatura máxima del canal de combustible, °C	301	300	317
Temperatura máxima del combustible, °C	945	1.050	1300 (1263)

En los reactores MKER-800 y MKER-1000 se realiza la circulación natural del refrigerante intensificado con bombas de agua, y en el reactor MKER-1500 se usa la circulación forzada del refrigerante. La envoltura interior se calcula para resistir el excedente de presión, de 0,2 MPa en caso de emergencia, y la exterior, hecha de hormigón armado, para soportar impactos exteriores extremos. La recarga de combustible y la producción de radioisótopos puede realizarse con el reactor en funcionamiento, sin disminución de potencia. La probabilidad de daño de la zona activa del MKER-1500 es $\sim 10^{-6}$ 1/reactor-año, mientras que la probabilidad de escape de los radionúclidos al medioambiente es de $\sim 10^{-7}$ 1/reactor-año.

2.5.2. Reactores de mediana potencia

2.5.2.1. Reactor VVER-440

Anteriormente se realizó el análisis de los reactores tipo VVER de una potencia igual o mayor a los 1.000 MW, el diseño de ese reactor resultó del desarrollo posterior y perfeccionado de su reactor base, el VVER-440, que viene ser el diseño original de los reactores agua a presión ampliamente difundido en el mundo entero.

En la actualidad están en operación en Rusia, Finlandia, Hungría, República Checa, Eslovaquia, Ucrania y Bulgaria. En total 66 bloques energéticos con un potencia total de 29.331 MW.

Las características técnicas fundamentales son:

Características	Valor
Potencia nominal, MW	440
Generación anual de electricidad, GWh	3,5
Eficiencia, %	33,9
Numero de lazos de refrigeración	6
Presión de trabajo, bar	123
Temperatura de entrada del refrigerante, °C	267
Temperatura de salida del refrigerante, °C	296
Tipo de combustible	UO ₂
Enriquecimiento, %	3,6
Número de casetes combustibles	313
Cantidad de combustible enriquecido, t	37,3
Recarga anual, t	14,5
Duración nominal del ciclo de recarga, h	7.800

2.5.2.2. Reactor ASER-300⁴⁶

Con la tecnología de reactores nucleares VVER se ha desarrollado también un reactor para bloques energéticos de mediana potencia que pueden ser utilizados en países cuyos sistemas eléctricos poseen una potencia instalada baja o media. Las principales características de diseño de este reactor nuclear son las siguientes:

1. Utiliza tecnologías asimiladas de los reactores nucleares con destino a la propulsión naval.
2. Utiliza los principios básicos de construcción y operación de los modelos VVER-440.
3. Incrementa los sistemas de seguridad en regímenes de operación normal y de emergencia.

La diferencia fundamental entre el ASER-300 y el VVER-440 radica en la posibilidad de sustituir durante los trabajos de mantención o reparación cualquier equipo o parte de la instalación del reactor. Por cuanto al ASER-300 utiliza los principios tecnológicos aplicados a los submarinos nucleares, que durante el lanzamiento de un misil, experimentan movimientos extremos equivalente a un terremoto cercano al grado 18, es que le ha dado a este reactor una especial característica antisísmica, por lo cual es recomendado por especialistas rusos para aquellos países ubicados en la línea roja sísmica del planeta. Las características técnicas más relevantes de este reactor son:

Característica	Valor
Potencia térmica, MW	945
Potencia eléctrica nominal, MW	300
Cantidad de lazos de enfriamiento	2
Cantidad de generadores de vapor	2 x 200 MW
Gasto de refrigerante a través de la zona activa, t/h	15.975
Presión del refrigerante a la salida de la zona activa, MPa	15,7

⁴⁶ Kostin V. I., et al., VVER-300 reactor system and power-generating units for regional nuclear power production. Atomic Energy 2007; 102(1): 36-41.

Característica	Valor
Temperatura media del refrigerante a la entrada de la zona activa, °C	293
Temperatura media del refrigerante a la salida de la zona activa, °C	329
Peso de la vasija, t	200
Combustible utilizado	UO ₂
Cantidad de casetes de combustible en la zona activa	320
Peso de la primera carga de combustible, t	27,5
Gasto anual de combustible, t/año	8,8
Precio estimado de generación de 1 MW, USD/MWh	22-25

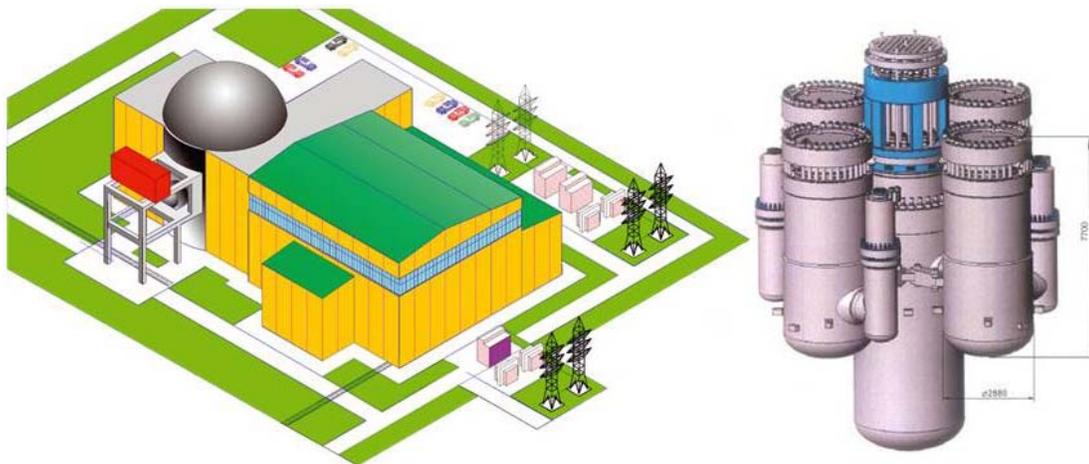


Figura 2.8 - Izquierda maqueta de la central con reactor ASER-300 y **derecha** su reactor.

2.4.5.3. Reactor VK-300 (calefacción)⁴⁷

⁴⁷ B. A. Gabaraev, et. al, La instalación de calefacción nuclear - la perspectiva y la solución. Energía Atómica, 2007, t. 103, ed.1, con. 36-40.

El modelo VK-300 es un modelo de agua en ebullición, de innovación simplificada, orientado a la calefacción. La instalación de reactor VK-300 posee un circuito de enfriamiento con una potencia eléctrica de 250 MW, para la producción de 400 Gkal/h de calor para calefacción, utilizando la circulación natural del refrigerante. En el desarrollo del reactor VK-300 se utilizó la experiencia acumulada de muchos años de operación del reactor VK-50, con circulación natural del refrigerante. En el proyecto VK-300 fueron incorporadas aplicaciones sencillas de sistemas pasivos de seguridad. La presencia de dos sistemas que actúan sobre la reactividad (barras y líquido) aseguran el control pasivo de la reacción en cadena de la fisión y la detención automática del reactor en caso de emergencia.

El estudio de factibilidad técnico-económico para la construcción de 4 reactores de este tipo en Rusia está concluido. Su construcción está prevista en la región de Arjánguelsk, con una potencia total de 1.000 MW y una producción de calor de 1600 GCal/h.

2.5.3. Reactores de baja potencia⁴⁸

2.5.3.1. Modelos SVVER-75/100, VVER-150 y KLT-40C

Son una alternativa especialmente interesante para aquellos lugares de difícil acceso, en donde obtener energía por medios tradicionales resulta complicado. La baja inversión y la rápida puesta en marcha de este tipo de centrales son factores atractivos para empresas que operan en aquellas zonas en que no se dispone de suficientes alternativas de suministro energético.

El reactor SWBER-75/100 es enfriado por una aleación de plomo y bismuto, con una potencia de 101,5 MW, y la recarga de combustible se realiza con intervalos de 6 a 9 años.

El reactor WBER-150 es una versión simplificada del modelo VVER-300 y funciona con un intervalo de 8 años de recarga de combustible.

Por su parte, el modelo KLT-40C^{49, 50}, conocido como “la central flotante” (Figura 2.4.4), es un reactor diseñado y construido para ser transportado sobre una embarcación, a fin de que

⁴⁸ Velihov E. P., Kuznetsov V. P., Chernilin Ju. F. Perspectivas del desarrollo de las Centrales Nucleares de potencia media (Energética atómica Regional), MNTK-2008, Moscú, 21-23.05.2008.

⁴⁹ Panov et al 2006, Floating Power Sources Based on Nuclear reactor Plants. EktronJS, EktronA

⁵⁰ Panov YuK, Sandler NG. Nuclear vessel Ural: a floating electric power plant, (FBISUST-97-016). Atomnaya Energiya 1997: 149-151.

pueda trasladarse por vía fluvial o marítima, según el caso, a zonas apartadas. A esta ventaja se suma al hecho de que la disponibilidad del suministro eléctrico que entrega no está sujeta a periodos de construcción, sino simplemente al tiempo que demora su llegada al lugar de destino.

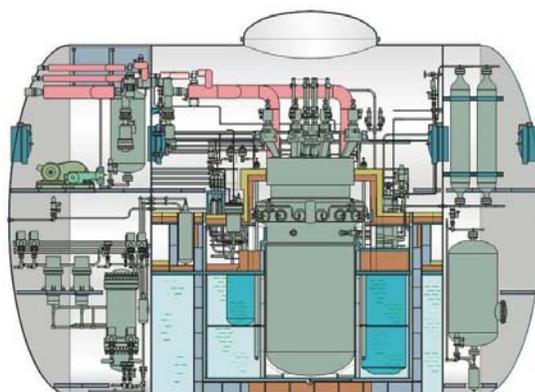


Figura 2.9 - Diagrama del reactor de la Central flotante KLT-40C

Tabla 2.4.3 - Características básicas la Central Nuclear flotante KLT-40C.

Potencia eléctrica nominal, MW	30-70
Potencia térmica nominal, GCal/h	50-147
Precio, MM Rublos ⁵¹	9-10
Tiempo de construcción, años	3
Generación de energía eléctrica, millones KWh/año	455
Generación de calor, miles Kcal/año	900
Longitud, m	140
Ancho, m	30

⁵¹ 1 Rublo = 0.03035 dólares de los Estados Unidos al cambio del 1 de Mayo del 2009.

Altura de la borda, m	10
Calado, m	5-6
Desplazamiento, t	21.000



Figura 2.10 - Aspecto exterior de la Central Nuclear flotante KLT-40C.

Conclusiones

Existe un amplio consenso internacional sobre los grandes desafíos que el presente y el futuro inmediato imponen a la industria energética. Aquellos años en que el suministro de electricidad estaba sujeto únicamente a las leyes del mercado, siendo su principal fuente de conflicto las fluctuaciones entre oferta y demanda, han terminado hace tiempo. Hoy nos enfrentamos al hecho cierto de que los recursos no renovables se encuentran sobre explotados y además, de que el uso y abuso de combustible de origen fósil, sumado a un modelo erróneo de gestión, están causando efectos inevitables en el delicado equilibrio medioambiental de nuestro planeta. El cambio climático, producto del calentamiento global de la atmósfera por el exceso de gases de efecto invernadero, es solo el más evidente de estos.

A la luz de estos hechos no cabe duda de que uno de los grandes desafíos mundiales del siglo XXI será conciliar las necesidades energéticas necesarias para mantener el progreso social y económico, con los desafíos ambientales y sociopolíticos derivados de estos. Se estima que la demanda energética mundial crecerá 2,5 veces hacia el 2050.

Los antecedentes contenidos en este capítulo dan cuenta de que, durante los últimos años, se ha hecho evidente que la energía nuclear permite satisfacer una parte importante del aumento previsto en la demanda de electricidad y, al mismo tiempo, contribuye decididamente a mitigar la mayor parte de los efectos perjudiciales -ambientales, políticos y económicos- que ocasiona el uso de combustibles fósiles. A pesar de ello, todavía muchos creen que esta tecnología tiene más riesgos que ventajas. Así, la próxima tarea de la industria nuclear y de los gobiernos que tienen la intención de optar por ella es despejar todas las preocupaciones reales o aparentes: seguridad, eliminación de residuos, clausura de las centrales, proliferación y seguridad física, además de costos asociados, directa o indirectamente.

Hoy se observa un resurgimiento de la energía nuclear, especialmente en los países más industrializados y destacan tres iniciativas internacionales para el desarrollo de una tecnología nuclear segura, sostenible y resistente a la proliferación de armas, con ventajas económicas, fiabilidad y con una generación mínima de residuos: el GIF, que tiene su Secretaría Técnica en la Agencia de Energía Nuclear; la “Alianza Mundial para la Energía Nuclear” dirigida por los Estados Unidos, y el “Proyecto Internacional sobre Reactores Nucleares y Ciclos de Combustible Innovadores” coordinado por el OIEA. Estas iniciativas buscan garantizar un adecuado equilibrio entre el avance del desarrollo tecnológico, impulsado por las necesidades apremiantes de suministro, y las regulaciones necesarias para

asegurar también el bienestar de la población y la estabilidad económica y política de las naciones que integren la energía nuclear a su matriz. Desde el punto de vista técnico, los reactores de nueva generación destacan por sus prestaciones de alto nivel en este sentido, y serán la base del desarrollo de la energía nuclear de los próximos dos o tres decenios. La cooperación internacional en materia de diseño de reactores y ciclos del combustible promete avances aún más notables en el futuro.

Así pues, existen argumentos para que la opinión pública, que en el pasado tuvo razones justificadas para mantener reticencias y temores, pueda hoy comprender las ventajas de la energía nuclear. Por su parte, los gobiernos y autoridades responsables tienen a su disposición tecnología de vanguardia, capacidad y experiencia, desarrollada por diversas naciones, para incluir esta tecnología en su matriz energética con garantías de seguridad. Esto considera también la posibilidad de dar un salto significativo en su desarrollo económico, científico y social, lo que sin duda será una ventaja competitiva relevante en los complejos escenarios del mundo por venir.

Bibliografía

- 2.1.- E. O. Adamov, Los proyectos de innovación de los reactores nucleares ¿el capricho de los científicos o un imperativo estratégico? El sitio oficial del NIKIET N. A. Dollezhalja (nikiet.ru).
- 2.2.- J. S. Cherepnin. Un nuevo siglo - una nueva etapa en la energética atómica. El sitio oficial del NIKIET. (nikiet.ru).
- 2.3.- Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2030. IAEA, Vienna, 2007.
- 2.4.- V. G. Asmolov. Los programas de prioridad del complejo energético nuclear de Rusia. La sexta conferencia Internacional científica-técnica de consorcio "ROSENERGOATOM" - MNTK-2008, Moscú, 21-23.05.2008.
- 2.5.- Velihov E. P., Kuznetsov V. P., Chernilin Ju. F. Perspectivas del desarrollo de las Centrales Nucleares de potencia media (la Energética atómica Regional). MNTK-2008, Moscú, 21-23.05.2008.
- 2.6.- A. V. Zrodnikov. La energética nuclear del siglo XXI. La sexta conferencia Internacional científica-técnica de consorcio "Rosenergatom" - MNTK-2008, Moscú, 21-23.05.2008. AC10. Petrov E. L., Suglobov D. N., Jakovlev R. M. Reactor-2020. La Estrategia XXI atómica, № 24, agosto de 2006
- 2.7.- Nóvikov V. M., Ignatiev V. V., Fedulov V. I., Cherednikov V. N., Instalaciones energéticas nucleares de soluciones líquidas de sales: las perspectivas y el problema. Moscú: Energoatomizdat, 1990, 192 pág.
- 2.8.- Kuzjakin J. I., Jakovlev R. M. Instalaciones energéticas nucleares de transporte de soluciones líquidas de sales. La colección de los informes NTK "la energética de barco nuclear - la mirada en el siglo XXI" Octubre de 2001, Nizni Nóvgorod: OKBM.
- 2.9.- Yakovlev R. M., Kusyakin Yu. I., Suglobov D. N. and Rodionov Y. I., MSR of Average and Low Power with the Lengthened Campaign., Abstr., 10-th International Seminar on Advanced Nuclear Fuel Cycle for the XXI Century, 24-27 September, 2007, p. 94, Nizhny Novgorod, Russia.

- 2.10.- Yakovlev R. M., Kusyakin Yu I. and Suglobov D. N., Homogeneous Molten Metal Reactor on Fast Neutrons (HMMR) with Dispersed Fuel, Abstr., 10-th International Seminar on Advanced Nuclear Fuel Cycle for the XXI Century, 24-27 September, 2007, p. 94, Nizhny Novgorod, Russia.
- 2.11.- La Información expreso de la Entidad federal “Instituto de Investigación Científica y de Construcción de Técnica Energética. A. Dollezhalja” según los materiales de la prensa nacional y extranjera. Serie: los reactores nucleares de innovación y los ciclos de combustible. La ed. № 1 (12). 2008.
- 2.12.- Nuclear Technology Review 2007. IAEA. GC (51)/INF/3. 2 July 2007.
- 2.13.- Progress in Design and Technology Development for Innovative Small and Medium Sized Reactors. IAEA. 2 July 2007.
- 2.14.- Innovative Small and Medium Sized Reactors: Design Features, Safety Approaches and R&D Trends. Final report of a technical meeting held in Vienna, 7-11 June 2004. IAEA-TECDOC-1451, Vienna, 2005.
- 2.15.- Status of Innovative Small and Medium Sized Reactor Designs 2005: Reactors with Conventional Refuelling Schemes. IAEA-TECDOC-1485, Vienna, 2006.
- 2.16.- Status of Small Reactor Designs without On-Site Refuelling 2007. IAEA-TECDOC-1536, Vienna, 2007.
- 2.17.- Common Technologies and Issues for Small and Medium Sized Reactors//Nucl. Power Newsletter, 2007, vol. 4, No. 3, p. 24-25.
- 2.18.- Competitiveness of Small, Medium-Sized Reactors//Nucl. News, 2007, vol. 50, No. 3, p. 85-86.
- 2.19.- Y. Sokolov et al. IAEA International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles. Collaborative Projects of Phase 2//Trans. ANS, 2007, vol. 97, p. 11-12.
- 2.20.- J. Perera. Steering INPRO//Nucl. Eng. Int., 2007, vol. 52, No. 638, p. 6.
- 2.21.- Coordination of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO)//Nucl. Power Newsletter, 2007, vol.4, No. 3, p. 1820.

- 2.22.- El S de E. Gmyrko etc. los Reactores del tipo de canal como la parte integrante de la energética nuclear del país//la Energía atómica, 2007, t. 103, ed. 1, con. 29-36.
- 2.23.- V. Generalov. More Russian Evolution//Nucl. Eng. Int., 2007, vol. 52, No. 639, p. 20-21.
- 2.24.- Y. Nakano et al. Conceptual Design Study of 180 MWt Small-Sized Reduced-Moderation Water Reactor Core//J. Nucl. Sci. Technol., 2006, vol.43, No. 12, p. 1471-1480.
- 2.25.- B. A. Gabaraev, et. al, La instalación de calefacción nuclear - la perspectiva y la solución. Energía Atómica, 2007, t. 103, ed.1, con. 36-40.
- 2.26.- IAEA-TECDOC-1536 Status of Small Reactor Designs Without On-Site Refuelling 2007. IAEA, Vienna, January 2007, p. 319-322.
- 2.27.- J. G. B. Saccheri, et al., Design and Economic Evaluation of on Advanced Tight-Lattice Core for the IRIS Integral Primary System Reactor//Nucl. Technol., June 2007, vol. 158, No. 3, p. 315-347.
- 2.28.- A. G. Glazov, et. al., El Reactor BREST y el ciclo nuclear de combustible anexo a la central. Energía atómica, 2007, t. 103, ed. 1, con. 15-21.
- 2.29.- Tae W. Kim et al. Conceptual Design of Modular Optimized Brayton Integral System//Trans. ANS, 2007, vol. 97, p. 43-44.
- 2.30.- Nam H. Kim et. al. Conceptual Design of Naval Application Vessel Integral System//Trans. ANS, 2007, vol. 97, p. 855-856.
- 2.31.- K. Petrunik. Ready for the Market//Nucl. Eng. Int., 2007, vol. 52, No. 639, p. 16-18.
- 2.32.- Y. Chikazawa et. al., A Feasibility Study on a Small Sodium Cooled Reactor as a Diversified Power Source//J. Nucl. Sci. Technol., 2006, vol. 43, No. 8, p. 829-843.
- 2.33.- Y. Chikazawa et. al., A Modular Metal-Fuel Fast Reactor with One-Loop Main Cooling System//Nucl. Technol., 2007, vol. 159, No. 3, p. 267-278.

- 2.34.- K. Metachi, T. Yomamoto, Three-Region Core Design for 200 MWe Molten-Salt Reactor with Thorium-Uranium Fuel//Nucl. Technol., June 2007, vol. 158 No. 3, p. 348-351.
- 2.35.- Análisis para la eventual puesta en marcha de un programa nuclear para la generación eléctrica en Uruguay. Octubre de 2008.
- 2.36.- Art. de N. Alekseev et. al., La energética nuclear pequeña y los recursos del combustible orgánico//Energía: la economía, la técnica, la ecología, 2007, ed. 7, con. 21-29.
- 2.37.- A. G. Ishekov et. al., el Análisis de la eficiencia económica de las centrales nucleares de la potencia baja//la Energía atómica, 2007, t. 102, ed. 6, con. 331-336.
- 2.38.- A. Isaev. Las perspectivas de la aplicación de los reactores de baja potencia con la duración grande de la campaña//la técnica Nuclear (Atómica) al extranjero, 2007, ed. 6, con. 11-18.
- 2.39.- NEA 2006 Annual Report. OECD Nuclear Energy Agency. 2007.

Capítulo 3

Seguridad Nuclear

Para evaluar adecuadamente el impacto y el riesgo que representa la opción nuclear para generar electricidad, hay que considerar que su seguridad se basa en el aspecto tecnológico y el conocimiento científico desarrollado durante más de 50 años de estudio y experiencia práctica, en ámbitos de vanguardia internacional. Por ello, se ha considerado necesario proveer en este capítulo la información necesaria para los análisis que se realizarán con posterioridad en el desarrollo de este estudio.

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 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.

Ciertamente la radiación en altas dosis resulta nociva para los organismos. Sin embargo, el medioambiente natural está lleno de radiación de diverso origen, incluyendo la de equipos creados por el hombre y tan cotidianos como el horno microondas o el teléfono celular. La radiación es muy útil en la medicina, por ejemplo, campo que se sirve de una amplia variedad de sistemas tecnológicos para operar al nivel nuclear y materiales que emiten de radiación. Todos alguna vez nos hemos expuesto a la radiación al hacernos un examen de rayos X y muchas personas se enfrentan al cáncer sometiéndose a terapia de radiación. Cada uno de nosotros recibe la radiación del sol, que es un verdadero reactor nuclear: los procesos que se registran en el sol son en cierta medida similares a los que se recrean en una central núcleo eléctrica, claro que los del sol corresponden a “fusión” y lo nuestro de hoy es “fisión”.

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 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 continuación se revisa detalladamente estos aspectos.

3.1. Principales requerimientos de seguridad en las centrales nucleares^{52, 53,54}

El objetivo fundamental de la Seguridad Nuclear es el de proteger la población y el medioambiente contra los efectos de eventuales emisiones de sustancias radiactivas. La máxima de esta industria es que “La presencia de una central nuclear en un emplazamiento no debe constituir un riesgo para los habitantes de su entorno”. Esto significa que:

- En funcionamiento normal, las dosis recibidas por los trabajadores y el público en general, deben ser tan bajas como sea posible y siempre inferiores a los límites fijados por las normas las que a su vez, se basa en los índices de radiación normales a los cuales el ser humano se somete a diario por la naturaleza.
- En caso de un accidente hipotético, los sistemas de seguridad existentes deben evitar que la fuga radioactiva afecte a 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 3.1), 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.

⁵² Elaboración propia en base a la experiencia del Consorcio Rosatom de la Federación de Rusia.

⁵³ Basic Principles for Nuclear Power Plants (75-INSAG-3 Rev. 1), A report by International Nuclear Safety Advisory Group (INSAG-12), IAEA, Vienna, 1999.

⁵⁴ Safety Culture (75-INSAG-4), a report by International Safety Advisory Group, IAEA, Vienna, 1991

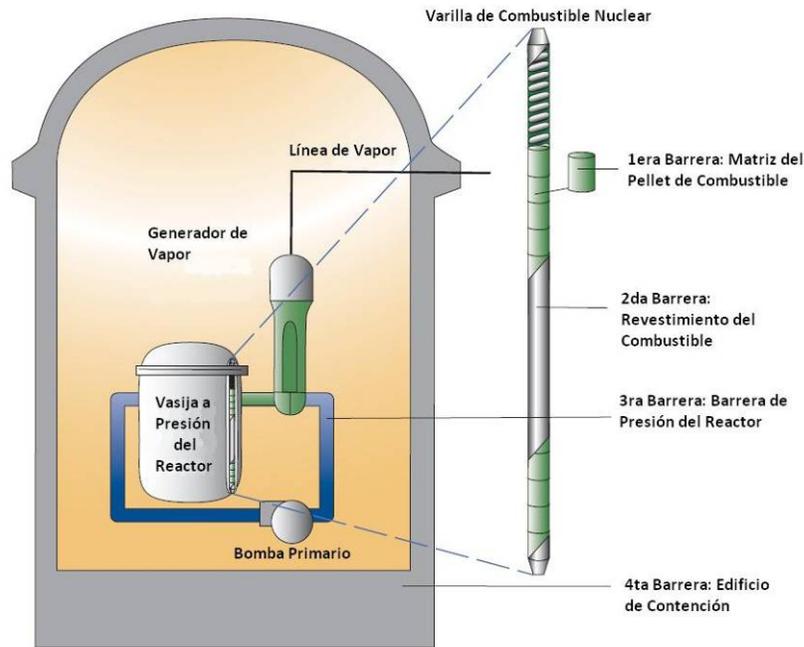


Figura 3.1 - Barreras de contención típicas para el confinamiento de los materiales radioactivos del primer circuito de una central nuclear⁵⁵.

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

⁵⁵ Figura tomada de: Nuclear Energy Today, Nuclear Energy Agency/OECD, Paris, 2005.

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 3.2 se muestra esquemáticamente todos los elementos considerados para garantizar la seguridad de una central nuclear (o cualquier instalación nuclear).

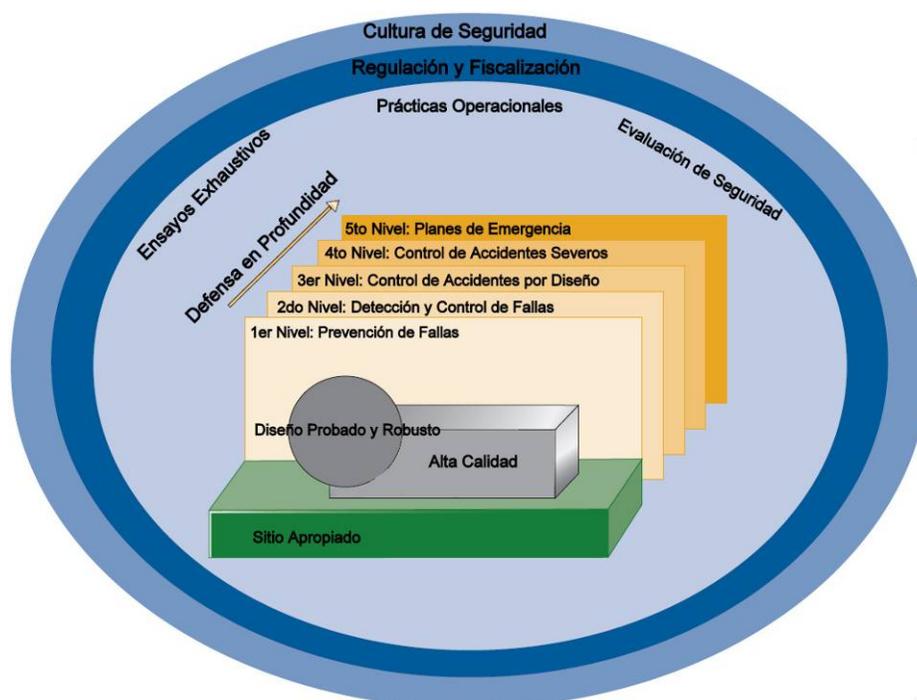


Figura 3.2 - Representación de los elementos considerados en la seguridad nuclear de una central nuclear⁵⁶.

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

⁵⁶ Figura tomada de: Nuclear Energy Today, Nuclear Energy Agency/OECD, Paris, 2005

- 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.

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. Por ejemplo, para detener la reacción en cadena en el núcleo del reactor se pueden bajar las barras de control o introducir agua borada, ambas detienen la reacción.

El concepto de seguridad en profundidad, presente en las actividades nucleares, exige tener siempre prevista una eventualidad improbable, y tener preparada una solución ante ese hecho poco probable si es que llegase a ocurrir.

Es por esta razón que antes de iniciar un proyecto nuclear, hay que considerar que un grupo no menor de personas piensan que los riesgos, básicamente un accidente tipo Chernobyl, si llegase este a ocurrir, significa que va a contaminar una gran zona durante mucho tiempo, por lo tanto concluyen “que los riesgos de la industria nuclear son mayores que los beneficios, ya que las ventajas que reporta a la sociedad la energía eléctrica que produce, no compensa a esa posibilidad cierta de ocurrir un accidente que contamina toda el área”.

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.

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. Más adelante, se presenta las características principales que tienen estas actividades que se recogen en el Plan de Emergencia de la central nuclear.

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”.

En los “reactores con seguridad intrínseca” no hay necesidad de diferenciar los accidentes “de proyecto” de los accidentes “fuera de proyecto”. En tales reactores, la seguridad no se basa en el incremento de las defensas técnicas, y en el aumento de la cantidad y requerimientos de la calificación y disciplina del personal (y, por consiguiente, el aumento del costo), sino en la utilización de leyes naturales, gracias a las cuales se le dio ese nombre. Así, por ejemplo, en los reactores a neutrones rápidos puede ser físicamente excluida la posibilidad de repetición del accidente de Chernobyl que significó la fuga del reactor de neutrones instantáneos o en el accidente en la central nuclear Three Mile Island por pérdida de refrigerante. Se puede también excluir la posibilidad de combustión descontrolada de los materiales (elementos) a cuenta de la utilización del grafito y el sodio. La diferencia en los enfoques examinados se presenta en Figura 3.3⁵⁷.

⁵⁷ E. O. Adamov, Proyectos innovadores de los reactores nucleares - ¿Capricho de científicos o un imperativo estratégico?, Sitio oficial NIKIET de N. A. Dollezhal (www.nikiyet.ru).

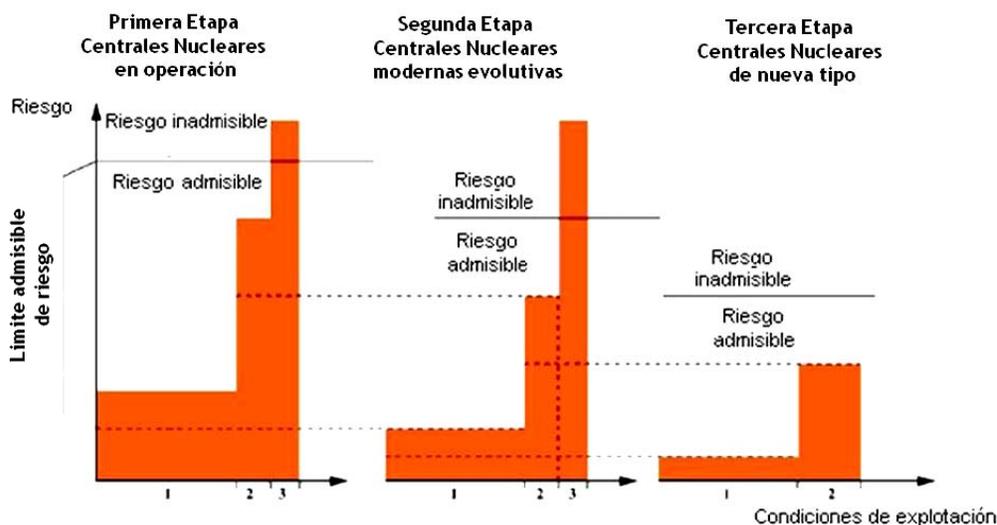


Figura 3.3 - Seguridad de las centrales nucleares en categorías de riesgo: 1) explotación normal; 2) Accidentes de proyecto; 3) accidentes fuera de proyecto (incluyendo fallas severas)⁵⁸.

Más adelante en la Tabla 3.1 se recogen los accidentes e incidentes ocurridos en las centrales nucleares en correspondencia con la Escala Internacional de Eventos Nucleares (INES por sus siglas en inglés) aprobada por el OIEA. Además se dará una breve explicación de los accidentes de Chernobyl y Three Mile Island, los más grandes ocurridos en la industria nuclear (sección 3.3).

3.2. Clasificación de incidentes y accidentes

En 1989 el OIEA y el Instituto de Energía Nuclear de la OECD diseñaron la “Escala Internacional de Eventos Nucleares y Radiológicos”^{59, 60} (INES, por su sigla en inglés). El objetivo fundamental de esta clasificación es la de facilitar la comunicación y el entendimiento entre la comunidad técnica, los medios de comunicación y la población sobre

⁵⁸ E. O. Adamov, Proyectos innovadores de los reactores nucleares - ¿Capricho de científicos o un imperativo estratégico?, Sitio oficial NIKIET de N. A. Dollezhal (www.nikiyet.ru).

⁵⁹ The International Nuclear and Radiological Event Scale, Information Services/Division of Public Information 08-26941/E, Vienna, IAEA, Nuclear Energy Agency (OECD). (<http://www.iaea.org/Publications/Factsheets/English/ines.pdf>)

⁶⁰ The International Nuclear Event Scale (INES) User’s Manual, Edition 2001, IAEA/OECD/NEA, Vienna, February 2001. (<http://www-ns.iaea.org/downloads/ni/ines/INES-2001-E.pdf>).

los eventos de importancia vinculado con la seguridad de las instalaciones nucleares (industria nuclear en toda su extensión) y radiológicas (centros de investigación, aplicaciones industriales, medicina).

La clasificación tiene en cuenta tres elementos:

- El impacto sobre la llamada “defensa en profundidad”, es decir, sobre el conjunto de medidas diseñadas para prevenir accidentes.
- El impacto sobre las barreras de seguridad radiológica y los sistemas de control de la instalación, con efectos dentro de la misma.
- El impacto sobre la persona y el entorno fuera del lugar de la instalación.

La Tabla 3.1, presentada anterior, se recoge la Escala INES, así como los eventos que han sido reportados al OIEA.

Tabla 3.1 - Esquema de los distintos niveles de eventos y ejemplos en cada nivel.

NIVEL DESCRIPTOR		DESCRIPCION	EJEMPLOS
ACCIDENTES	7 ACCIDENTE GRAVE	<ul style="list-style-type: none"> • Liberación de una gran parte del material radioactivo de una instalación grande (por ejemplo, el núcleo de un reactor de potencia). Ello comprendería típicamente una mezcla de productos de fisión radioactivos de corta y larga vida. • Posibles efectos agudos para la salud; efectos retardados para la salud en una amplia zona que abarcase posiblemente más de un país; consecuencias a largo plazo para el medioambiente, como resultado de esa liberación. 	Un único ejemplo en la industria nucleoelectrica: Chernobyl, Ucrania, 1986
	6 ACCIDENTE IMPORTANTE	<ul style="list-style-type: none"> • Liberación externa relevante de material radioactivo. Probable puesta en práctica plena de las contramedidas previstas en los planes locales para casos de emergencia a fin de limitar efectos severos para la salud. 	Ningún ejemplo en la industria nucleoelectrica
	5	En un accidente de este nivel se produce al menos una de las siguientes situaciones:	Un único ejemplo en la industria

NIVEL DESCRIPTOR		DESCRIPCION	EJEMPLOS
	ACCIDENTE CON RIESGO FUERA DEL EMPLAZAMIENTO	<ul style="list-style-type: none"> Liberación externa de material radioactivo. Probable puesta en práctica parcial de las contramedidas previstas en los planes para casos de emergencia, a fin de reducir la probabilidad de efectos sobre la salud. Daños graves en la instalación nuclear, que puede incluir daños graves en una gran parte del núcleo de un reactor de potencia, un accidente de criticidad importante o un incendio o explosión importante que libere grandes cantidades de radioactividad dentro de la instalación. 	nucleoeléctrica: Three Mile Island, EE.UU., 1979
	4 ACCIDENTE SIN RIESGO SIGNIFICATIVO FUERA DEL EMPLAZAMIENTO	<p>En un accidente de este nivel se produce al menos una de las siguiente situaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> Liberación externa de radioactividad que tenga como resultado una dosis al individuo más expuesto fuera del emplazamiento del orden de algunos milisieverts (es decir, del orden de la radioactividad natural). Baja probabilidad de que se requieran medidas de protección fuera del emplazamiento con excepción de un posible monitoreo local de los alimentos. Daños significativos en la instalación nuclear, los que podrían comprender daños en la central nuclear que originasen problemas de recuperación en el emplazamiento, tal como la fusión parcial del núcleo en un rector de potencia. Irradiación de uno o más trabajadores que podría traducirse en una sobreexposición con probabilidad alta de muerte temprana. 	Plata de elaboración de Windscale, Reino Unido, 1973 Saint Laurent Francia, 1980 Conjunto Crítico de Buenos Aires, Argentina, 1983
INCIDENTE	3 INCIDENTE	<p>En un incidente de este nivel se produce al menos una de las siguientes situaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> Liberación externa de radioactividad superior a los límites autorizados que dé 	Central Nuclear Vandellos I (España, 1986)

NIVEL DESCRIPTOR		DESCRIPCION	EJEMPLOS
	IMPORTANTE	<p>por resultado una dosis al individuo más expuesto fuera del emplazamiento del orden de décimas de milisievert (menor que la radioactividad natural) Posiblemente no se requieran medidas de protección fuera del emplazamiento.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dosis recibidas por los trabajadores en el emplazamiento suficiente como para causar efectos agudos en la salud. • Fuerte difusión de contaminación liberada en una contención secundaria en que el material pueda llevarse de vuelta a una zona de almacenamiento satisfactoria. • Incidentes en los que un eventual fallo ulterior de los sistemas de seguridad podría dar lugar a condiciones de accidente o a una situación en la que los sistemas de seguridad no pudiesen impedir un accidente si se produjeran ciertos sucesos iniciadores. 	
	2 INCIDENTE	<p>En un incidente de este nivel se produce al menos una de la siguientes situaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fallo significativo de las disposiciones de seguridad pero en los que subsiste una defensa en profundidad suficiente para hacer frente a otros fallos. • Dosis recibida por un trabajo que exceda al límite de dos anual establecido y/o un suceso que cause la presencia de cantidades significativas de radioactividad en la instalación en zonas no previstas según diseño y que requiera medidas correctivas. 	<p>Los dos incidentes producidos en España en las Centrales Nucleares Trillo, 1982 y Vandellos II, 2004</p>

NIVEL DESCRIPTOR		DESCRIPCION	EJEMPLOS

DESVIOS	0 DEBAJO DE LA ESCALA	<ul style="list-style-type: none"> • Sin significado para la seguridad. • Desvío de los límites y condiciones operacionales no se exceden y que son manejados apropiadamente siguiendo procedimientos adecuados. Como ejemplo se incluye: una única falla aleatoria en un sistema redundante detectado durante la inspección o chequeo periódico, inserción de las barras de control planificada evolucionando normalmente, iniciación espuria de los sistemas de protección sin consecuencias significativas, perdidas dentro de los límites operacionales, contaminación menor dentro de áreas controladas sin mayores implicancias para la cultura de seguridad. 	
----------------	--------------------------------------	---	--

3.3. Los accidentes más relevantes de la industria núcleo-energética

La industria nuclear a la fecha ha tenido dos accidentes severos, Three Mile Island (Grado 5) y el más grave, Chernobyl (grado 7).

3.3.1. Three Mile Island⁶¹

La central nuclear Three Mile Island está ubicada a 16 Km. Al sudeste de Harrisburg (60.000 habitantes), en el estado de Pensilvania, EE.UU. Esta central poseía 2 reactores: TMI-1 y TMI-2. En 1979 se produjo allí el único accidente en la historia de la generación núcleo eléctrica comercial norteamericana. Este accidente está catalogado dentro de la escala INES como 5.

La unidad accidentada, TMI-2, era un PWR estándar. El accidente se debió a una falla producida en el sistema refrigerante estando el reactor operando al 97% de su potencia nominal. Se trató de una falla mecánica en una bomba, combinado con una serie de errores humanos de mantenimiento y fallas institucionales.

El combustible se fundió pero las barreras de contención funcionaron, liberándose menos del 1% del inventario total de productos de fisión. Hasta el momento no ha sido posible demostrar un impacto de este accidente sobre la salud del público.

⁶¹ <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html>.



Imagen 3.1 - Vista de la Central Nuclear Three Mile Island, Estados Unidos⁶²

Si bien el reactor se destruyó, nadie resultó herido. El accidente dejó en evidencia deficiencias importantes en los procedimientos de operación del reactor, en el entrenamiento de los operadores y en la gestión de la información al público. Estos aspectos han sido incorporados como aprendizaje y tenidos en cuenta de ahí en adelante.

3.3.2. Chernobyl

La central nuclear Chernobyl está ubicada en las cercanías de la ciudad de Prypiat en Ucrania.

La central poseía cuatro reactores RBMK-1000, cada uno con una potencia de 1.000 MW. El 26 de abril de 1986 ocurrió un accidente en el reactor número 4 de la central que ha sido catalogado como el peor accidente en la historia de la industria nuclear (grado 7). Como

⁶² 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.

consecuencia, el reactor 4 resultó completamente destruido y actualmente se encuentra confinado dentro de un sarcófago de concreto para evitar el escape de radiación.



Imagen 3.2 - 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.

Sin embargo, cabe resaltar que a pesar del accidente, los otros reactores de la central continuaron funcionando. El último fue dado de baja definitivamente en diciembre del año 2000.

El accidente tuvo múltiples causas, todas ellas evitables. En primer lugar, el diseño del reactor era intrínsecamente inestable, era de diseño militar y por lo tanto proclive a este tipo de accidentes. En segundo término, el accidente se produjo por varios errores humanos, al intentar realizar una prueba para determinar la respuesta del reactor en caso de cierto tipo de falla y mejorar así su seguridad. En tercer lugar, existieron errores y omisiones de procedimiento durante la prueba. Por otro lado, algunos equipos no eran “redundantes” en su funcionamiento (es decir, no existía un segundo equipo capaz de sustituir su función en caso de operación defectuosa) fallaron en medio del procedimiento. Por último, y lo que tal vez resulte más difícil de explicar, el reactor de Chernobyl carecía de la cuarta coraza protectora que se describió anteriormente por lo que, al fundirse el reactor, las sustancias radioactivas se liberaron inmediatamente al ambiente.

En 2003, un conjunto de organismos internacionales (entre ellos el OIEA, la OMS, FAO, PNUMA, OCAH-UN, UNSCEAR y el PNUD), así como los gobiernos de Rusia, Ucrania y Bielorrusia, crearon el Foro Chernobyl, en el que un conjunto de científicos estudiaron las consecuencias del accidente, 20 años después de ocurrido. El trabajo realizado se basa en los estudios llevados a cabo por UNSCEAR, cuyas conclusiones fueron presentadas en el año 2000⁶³, así como por varios cientos de artículos publicados en revistas científicas internacionales.

A continuación se presenta la radiación recibida por distintos estratos de la población en ocasión de este accidente. Varios obreros de la central, próximos al lugar del accidente, así como los bomberos que apagaron el incendio (un total de 500 personas), recibieron dosis por encima del umbral de 1 Sv. Los llamados “liquidadores”, es decir las 200.000 personas que se alternaron durante meses para fabricar el sarcófago alrededor de los restos de la porción afectada del bloque recibieron, en promedio, unos 100 mSv cada uno. La población que habitaba a escasa distancia de la central, y que fue (mal y tardíamente) evacuada unos días después del accidente, unas 115.000 personas, recibió, en promedio, 10 mSv. Esta dosis es sólo unas 5 veces mayor que la radiactividad natural. Las 270.000 personas que habitaban a una distancia un poco mayor de la central, y que no fueron evacuadas recibieron, en media, unos 50 mSv. Por último, las decenas de millones de personas que habitan a distancias mayores de Chernobyl, pero en regiones donde ha logrado medirse algún aumento de la radiactividad natural (unas 5 millones de personas) han recibido en promedio alrededor de 10 mSv debido al accidente.

En base a estos estudios, el Foro Chernobyl presentó un informe^{64 65} que analiza los efectos sobre la salud, a medio plazo, que han ocurrido sobre los afectados por el accidente. El informe, editado por la OMS, concluye que, además de las 32 personas que fallecieron en el momento del accidente, de las 600.000 personas más expuestas, unas 4.000 podrían fallecer por cáncer originado como consecuencia del accidente. Más allá de las víctimas, la consecuencia ambiental más notable del accidente es que los suelos, en un radio de 30 Km. alrededor de la central, quedaron inutilizados para uso agrícola durante unos 30 años.

El análisis del accidente de la Central Nuclear de Chernobyl puso en evidencia las deficiencias constructivas de los reactores tipo RBMK y los errores del personal.

⁶³ UNSCEAR, Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiación Atómica, Vol. 1, Informe del año 2000 a las Naciones Unidas.

⁶⁴ <http://chernobyl.undo.org/english/docs/chernobyl.pdf>, “Chernobyl’s legacy: health, environmental and socio-economic impacts”, 2005.

⁶⁵ Comunicado de prensa del OIEA, Chernobyl: La verdadera escala del accidente”, septiembre de 2005.

Posteriormente a este accidente, los reactores de este modelo fueron retirados de servicio y los que quedaron fueron modernizados los sistemas de seguridad.

Estas averías, especialmente la de Chernobyl dio importantes lecciones para corregir procedimientos, normas de seguridad, y aplicación de nuevas tecnologías de seguridad, lo que permitió posteriormente elevar notablemente los estándares de seguridad de las centrales nucleares de todo el mundo. Básicamente los nuevos procedimientos repercutieron en:

1. Disminuyó el porcentaje de fallas a tasa insignificantes
2. Se mejoró la integridad de la vasija del reactor.
3. Los productos de fisión desprendidos en una eventual avería no salen fuera de los límites del bloque y del reactor.
4. Mejoraron notablemente los principios de defensa en profundidad de los reactores para la protección de la población y el medioambiente.
5. Se descubrieron y eliminaron alrededor de 200 lados “débiles”, lo que disminuyó considerablemente las detenciones del reactor por fallas de seguridad.
6. La elaboración de procedimientos adecuados para el desmontaje y desactivaciones del proceso nuclear, aseguraron un desmantelamiento fácil de las unidades de la central nuclear.
7. Se crearon institutos especializados en la operación de centrales nucleares lo cual mejoró la eficiencia y seguridad de las mismas.
8. Los órganos de regulación incluyeron los requerimientos especiales y medidas de seguridad rigurosas para la población en caso de emergencias.

Esto llevó a que el riesgo de accidentes en las centrales nucleares fuera notablemente inferior comparado a otras operaciones industriales incluida la producción de energía eléctrica por otras fuentes.

3.4. Colaboración internacional

Desde hace años viene funcionando en el seno del Organismo Internacional de energía Atómica, la Convención sobre Seguridad Nuclear, en la que participan países de todo el mundo en donde se revisan y evalúan los programas nucleares de cada Estado parte. En el año 1997 se incorporó la Convención conjunta sobre la seguridad en la gestión del combustible gastado y sobre la seguridad en la gestión de los residuos radiactivos.

El seguimiento del cumplimiento por los miembros de las obligaciones contraídas es responsabilidad directa de los Estados partícipes.

Periódicamente, cada país presenta un informe en el que, entre otros temas, se incluye:

- Una exposición de la política nacional en materia nuclear.
- Relación y detalle de los programas nucleares en curso o previstos a futuro.
- Descripción de los principales temas de seguridad pendiente.
- Relación de las instalaciones nucleares.
- Basándose en la Convención sobre Seguridad Nuclear, una evaluación de las iniciativas tomadas para cumplir con los requisitos de la Convención. Esto cubre aspectos de legislación, cooperación internacional, planes a futuro, etc.
- Como aspecto particularmente importante del informe se incluye una propuesta de las actividades que pueden mejorar la seguridad nuclear.

Los informes son analizados por todos los Estados parte en la Convención en donde se discuten. Después de un intercambio de opiniones, comentarios y propuestas, los miembros del grupo emiten un documento o informe final que se presenta en la sesión plenaria de la reunión para su revisión y aprobación.

Entre los temas que se tratan en las reuniones pueden destacarse:

- La evaluación del funcionamiento de centrales antiguas.
- La política de gestión ante eventuales accidentes.
- La independencia de los organismos reguladores.

Este proceso implica la participación de todos los países que han ratificado la Convención, la presentación de la situación interna de cada Estado, el tratamiento y solución de diferencias entre países y la mejora unilateral en los temas tratados a partir del diálogo constructivo entre los países miembros.

3.5. Principios fundamentales para garantizar la seguridad en las centrales nucleares⁶⁶

Como se ha señalado anteriormente, La seguridad de las centrales nucleares se garantiza a través de la realización consecutiva de la concepción de la defensa en profundidad, basada en el uso de sistemas de barreras físicas en el trayecto de la propagación de la radiación ionizante y de sustancias radioactivas al medioambiente y, de sistemas de medidas técnicas y organizativas de protección de las barreras y la conservación de su eficiencia, así como de la protección del personal, la población y del medioambiente. Este concepto de seguridad prevé distintos niveles que fueron mencionados de forma general al principio de este capítulo, por lo que aquí se realizará un análisis más detallado de ellos.

El nivel 1 de la concepción de la defensa en profundidad considera las siguientes condiciones para la ubicación de la central nuclear y la eliminación de las desviaciones de las condiciones normales de operación:

- evaluación y selección del área apropiada para la ubicación de la central nuclear;
- establecimiento de la zona sanitaria de protección y de la zona de vigilancia alrededor de la central nuclear;
- diseño del proyecto basado en un enfoque conservativo con el desarrollo de propiedades internas de autoprotección de la instalación del reactor;
- aseguramiento de la calidad exigida a los sistemas (elementos) de la central y de la ejecución de los trabajos;
- operación de la central nuclear en correspondencia con las exigencias de los documentos autorizados, los reglamentos tecnológicos e instrucciones de operación;
- mantenimiento en buen estado de todos los sistemas de seguridad vigentes que detectan los defectos y la presencia de partes y piezas gastadas de todos los equipos en funcionamiento de una central;
- selección y mantenimiento del nivel de calificación necesario del personal de la central nuclear para las acciones durante la operación normal y durante las desviaciones del régimen normal de operación, incluyendo las situaciones previas y

⁶⁶ Idem 51, 52 y 53.

durante las averías, formando con ello una cultura de seguridad permanente y altamente exigente.

El Nivel 2 prevé la prevención de las averías de proyecto con los sistemas de la explotación normal:

- Detectar a tiempo las desviaciones de las condiciones normales de operación y su corrección inmediata;
- Saber operar la central en presencia de desviaciones de las condiciones normales de operación.

Para el Nivel 3 se prevé la prevención de accidentes fuera de proyecto con los sistemas de seguridad:

- prevención a la presencia de sucesos iniciadores en averías de proyecto y en averías fuera de proyecto;
- atenuación de las consecuencias de las averías, que no se han podido prevenir, mediante la localización de sustancias radioactivas de fisión.

En el Nivel 4 se prevé el control de las averías fuera de proyecto:

- prevención del desarrollo de los accidentes fuera de proyecto y el control de sus consecuencias;
- protección de la barrera hermética de la destrucción durante los accidentes fuera de proyecto y mantenimiento de su capacidad de trabajo;
- retorno de la central nuclear a un estado de control, durante el cual se detiene la reacción de fisión en cadena, se asegura la refrigeración constante del combustible y la retención de sustancias radioactivas en los límites establecidos.

El Nivel 5 prevé la preparación del plan de medidas contra averías y la realización (si es necesario) de los planes de emergencia en el emplazamiento de la central nuclear y sus alrededores.

3.6. La seguridad en las centrales nucleares modernas⁶⁷

Las iniciativas de los países desarrollados conjuntamente con la colaboración internacional, ha dado lugar a la realización de programas para disponer de diseños avanzados de centrales nucleares. Algunos de ellos ya han sido aplicados y actualmente existen reactores de nuevo diseño en funcionamiento y construcción.

A las actuales centrales nucleares, los que están en construcción y los que se encuentran en la etapa de diseño, cualquiera sea este el modelo o país que lo construya, todos coinciden en cumplir los siguientes requisitos esenciales:

- La seguridad ante todo.
- La reducción de residuos a su máximo nivel tecnológico posible.
- Incorporar en el diseño inicial los planes de desmantelamiento y manejo de combustible gastado.
- Simplificación del diseño para favorecer una operación más segura.
- Reforzar los diseños y normas para impedir el uso indebido por terceros de los productos radiactivos (no proliferación).
- Desarrollar diseños en los que el error humano tenga una mínima incidencia sobre la seguridad.

Como se vio en el capítulo 2, existen en el mundo diversos proyectos de reactores avanzados y de su aplicación en una sociedad futura en donde los combustibles disponibles no siempre serán los mismos que se ocupaban en el pasado. Se trata de evaluar la competitividad de la energía nuclear en esos momentos y tomar las acciones necesarias para asegurar hoy una respuesta acorde con las demandas de seguridad, eficiencia y competitividad de nuestra sociedad en un horizonte de 30 a 50 años. Proyectos como INPRO y GE IV, en los que participan un gran número de países, son un ejemplo real de lo anterior.

Los sistemas de seguridad tienen diseños especiales a prueba de fallas, incluyendo las fallas dependientes y fallas por causa común, y son capaces de cumplir sus funciones sin el suministro de energía.

⁶⁷ Idem 51, 52 y 53.

Para las nuevas centrales con reactor del tipo VVER o PWR, que son los más numerosos en el mundo, se establecen los siguientes requerimientos:

- cada sistema de seguridad tiene no menos de cuatro canales, cada uno de los cuales es capaz de realizar la función de seguridad asignada;
- la reserva de canales partiendo de la ejecución del principio de falla única, así como la salida del canal para mantenimiento, si esto es posible durante el trabajo del reactor a potencia;
- en la composición de los sistemas de protección de seguridad, que cumplen funciones de refrigeración por emergencia y de la extracción del calor residual de la zona activa, se utilizan partes activas y pasivas;
- sistema de seguridad de localización también se incluye en su composición los sistemas y elementos pasivos y activos ;
- el sistema de localización de seguridad también incluye en su composición sistema y elementos pasivos y activos;
- la división espacial de canales de los sistemas de seguridad para eliminar la posibilidad de ocurrencia de fallas por causa común (incendios, inundaciones);
- el sistema de mando de seguridad está diseñado a partir de la condición de que la falla en el sistema inicie acciones, encaminadas garantizar la seguridad;
- con el fin de la protección a errores del operador, se utilizan los sistemas automatizados para el inicio de acciones defensivas y el bloqueo de los mandos del operador, que violan las funciones de seguridad;
- los sistemas de seguridad se alimentan con la energía eléctrica de fuentes independientes, hechas según requerimientos de los sistemas de seguridad.

El principio de la autoprotección interna para limitar el desarrollo de los sucesos iniciadores y sus consecuencias dentro de los límites de los criterios de seguridad del proyecto por largo tiempo sin la participación del personal y la ayuda exterior, se aseguran en el proyecto con:

- las propiedades de autolimitación de liberación de la energía en la zona activa por medio de un coeficiente negativo de reactividad por temperatura del combustible por potencia en todo el rango de los parámetros de operación;

- el accionamiento de órganos de regulación en régimen de protección contra averías basado en la fuerza de la gravedad;
- la utilización en el proyecto de un compensador de presión de gran volumen con colchón de vapor ;
- la composición de equipos y geometrías del primer circuito de la instalación del reactor;
- la ausencia de penetraciones y orificios por debajo de tubuladura de la vasija del reactor y, correspondientemente, por debajo de cota superior de la zona activa;
- un volumen considerable de agua en los generadores de vapor del segundo circuito;
- el uso de elementos pasivos, de dispositivos de corte, de limitación y de alivio;
- la ejecución de la concepción “fuga antes de la destrucción”;
- el uso de masas inerciales de rotación en las bombas principales de circulación para garantizar la circulación de agua a través de la zona activa en casos de no disponer de energía eléctrica.

La evaluación de seguridad de las centrales nucleares tipo VVER o PWR incluye un análisis del comportamiento de la central durante el régimen normal de operación y durante la ocurrencia de fallas de los equipos.

Los regímenes proyectados para la operación en situación de desviación de las condiciones normales de categoría 2, ocurren en las centrales nucleares con una frecuencia mayor a 10^{-2} reactor/año. En el peor de los casos pueden conducir a la parada del reactor, después de la cual la central puede nuevamente entrar en funcionamiento. Tales estados, no tienen tendencia a la proliferación, la amenaza de la aparición de fallas más graves, o sea de estados proyectado de categorías 3 y 4.

A los accidentes de proyecto o regímenes de categoría 3 le corresponden situaciones que pueden ocurrir con una frecuencia desde 10^{-2} hasta 10^{-4} reactor/año. En estas situaciones es posible el daño sólo de una parte limitada de las barras de combustible (no más de 1% del total de elementos de combustible).

A los regímenes de proyecto de la categoría 4 le corresponden situaciones que durante el período de servicio no son esperados, sino eventuales pero pueden provocar la liberación de

gran cantidad de materiales radioactivos. Los regímenes de proyecto de la categoría 4 son los más graves de todos los regímenes de proyecto, contra los cuales deben preverse por proyecto todas las medidas de protección correspondientes.

Los accidentes fuera de proyecto son potencialmente más graves, que los accidentes de proyecto. En esos casos, es necesaria la acción de medios especiales para limitar la dosis de irradiación de la población y del personal de la central nuclear a límites permitidos.

El análisis estadístico de la seguridad para los nuevos proyectos de las centrales nucleares tipo VVER-1200 demostró, la eficiencia y suficiencia del funcionamiento de los sistemas de seguridad y de los sistemas importantes para la seguridad, dentro de las bases del proyecto, el funcionamiento seguro de la central nuclear en regímenes con desviación en las condiciones normales de operación y durante las averías de proyecto. Según el análisis probabilístico de seguridad, la frecuencia total de los deterioros de la zona activa de los reactores VVER satisface al valor límite de destino de 10^{-6} /año.

Tabla 3.2 - Principales características de un bloque energético VVER⁶⁸.

Potencia térmica del reactor	3.200 MW
Potencia eléctrica	1.150 MW
Diapasón de regulación	20 -100%
Presión de vapor vivo	7,0 MPa
Quemado máximo del combustible nuclear	Hasta 70 MW.día/Kg de Uranio
Eficiencia bruta	36,4 %
Tiempo de duración de equipo no reemplazable	60 años
Coefficiente de utilización de la potencia instalada	0,9
Inversión específica	No mayor de 35.500 rublos/KW
Costo de generación ⁶⁹	No mayor de 0,45 rublos/KWh
Resistencia sísmica	7 grados de la escala MSK-64
Caída de un avión con un peso de	Hasta 5,7 t

⁶⁸ Los análisis de seguridad para la Central Nuclear-2006, Seminario de la AER y EDF, Moscú, Mayo, 2008.

⁶⁹ 1 Rublo = 0,03035 dólares de los Estados Unidos al cambio del 1 de Mayo del 2009.

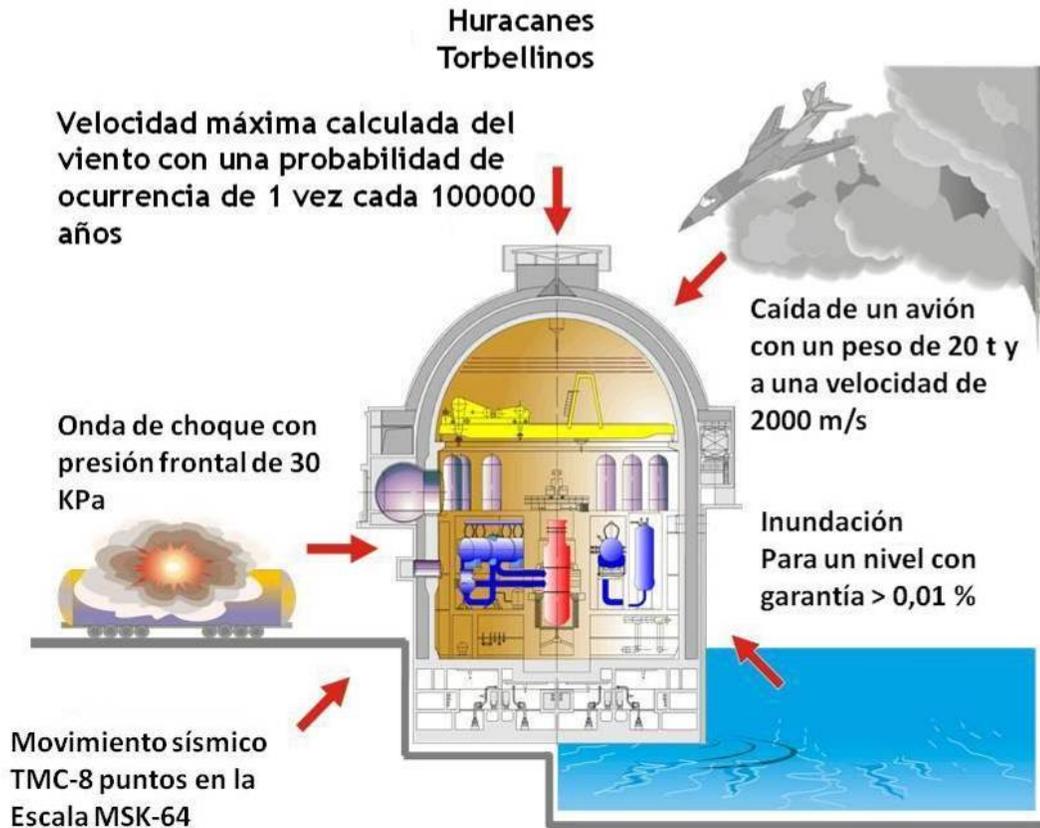


Figura 3.4 - Representación de eventos externos considerados en el diseño de los modelos de los reactores VVER.

3.6.1. Seguridad radiológica de las centrales nucleares⁷⁰

La ley establece las bases jurídicas para la garantía de la seguridad radiológica de la población y del personal con el fin de proteger su salud. Establece las nociones, las normativas y el orden de regulación principales en el campo de la garantía de la seguridad radiológica, las medidas necesarias para la seguridad radiológica, las atribuciones del Gobierno y de las personas en el campo de la garantía de seguridad radiológica.

La norma rusa NRB-99 establece los requerimientos y normativas de la acción de las radiaciones ionizante y en ella se reglamenta:

⁷⁰ Informe Nacional de la Federación de Rusia sobre el cumplimiento de las obligaciones originada por la Convención de Seguridad Nuclear, Moscú, 2007.

- la exposición radioactiva del personal y la población en condiciones de operación normal de las fuentes tecnológicas de radiación ionizante;
- la exposición radioactiva del personal y la población en condiciones de accidente radiológico;
- la exposición radioactiva de los empleados de empresas industriales y de la población con fuentes naturales de radiación ionizante;
- la exposición radioactiva de la población por tratamientos médicos.

Las principales Reglas Sanitarias de Seguridad Radiológica reglamentan los requerimientos para la protección de las personas contra la influencia de la radioactividad bajo todas las condiciones de irradiación de fuentes ionizantes y reglamenta la ejecución de los requerimientos higiénico-sanitarios para la protección radiológica del personal, la población y el medioambiente contra la acción de las radiaciones ionizantes durante el diseño, la construcción y la operación de las centrales nucleares.

Considerando el nivel alcanzado por la seguridad de la central nuclear en régimen de operación normal, el riesgo radiológico para la población es indudablemente aceptable ($<10^{-6}$ por año). A este respecto, los valores de emisión admitidos y las descargas posibles, de acuerdo con la norma rusa "SP AS-03", se calculan basándose en la dosis de exposición de la población de 10 mSv por año.

De acuerdo con las evaluaciones anuales, la situación radiológica en todas las centrales nucleares de Rusia está en correspondencia con las exigencias de la documentación normalizativa y la Convención de Seguridad Nuclear.

La norma de seguridad radiológica en la mayoría de los países con industria nuclear, establecen el límite de dosis permitido: 20 mSv por año en promedio en 5 años consecutivos, pero nunca mayor a 50 mSv por año.

La disminución de la exposición del personal en las centrales nucleares se obtuvo a cuenta de mejoras tecnológicas y de control, dirigidas al perfeccionamiento de la protección radiológica, al aumento del nivel de la cultura de seguridad, al mejoramiento de la organización de trabajo. El resultado de este trabajo fue una disminución anual de exposición del personal de las centrales nucleares actuales en funcionamiento.

En las Tablas 3.3 y 3.4 se puede apreciar que los límites establecidos para la exposición del personal en las centrales nucleares de Rusia no sobrepasan la norma.

Tabla 3.3 - Promedio de las dosis individuales de exposición en las centrales nucleares de Rusia en los años 2004-2006⁷¹.

Central Nuclear, Bloques de la central, tipo de reactor	2004		2005		2006	
	Dosis promedio , [mSv/año]	% hasta 20 mSv	Dosis promedio, [mSv/año]	% hasta 20 mSv	Dosis promedio [mSv/año]	% hasta 20 mSv
Centrales Nucleares con reactores VVER						
Balákov, 1-4, VVER-1000	0,67	3,3	0,67	3,3	0,60	3,0
Volgodón, 1, VVER -1000	0,08	0,40	0,077	0,38	0,078	0,39
Kalinin, 1-3, VVER -1000	0,42	2,1	0,54	2,7	0,46	2,3
Kolsk, 1-4, VVER -440	1,63	8,2	1,15	5,8	1,09	5,5
Novovorónezh, 3,4, VVER -440; 5, VVER -1000	1,95	9,8	2,40	12,0	1,34	6,7
Valor medio ponderado para el VVER	0,95	4,8	1,00	5,0	0,74	3,7
Centrales Nucleares con reactores RBMK						

⁷¹ Informe Nacional de la Federación de Rusia sobre el cumplimiento de las obligaciones originada por la Convención de Seguridad Nuclear, Moscú, 2007

Kursk, 1-4, RBMK-1000	2,96	14,8	2,70	13,5	3,3	16,5
Smolensk, 1-3, RBMK-1000	3,54	17,7	2,46	12,3	2,91	14,6
Leningrado, 1-4, RBMK-1000	2,20	11,0	2,02	10,1	1,82	9,1
Valor medio ponderado para RBMK	2,89	14,5	2,4	12,0	2,68	13,4
Centrales Nucleares con bloques no seriados						
Beloyarsk, 3, FBR-600	0,49	2,5	0,42	2,1	0,46	2,3
Bilibinsk, 1-4, EGP-6	4,49	22,5	3,69	18,5	3,60	18,0
Valor medio ponderado	1,95	9,8	1,68	8,3	1,67	8,4
Valor medio ponderado	2,00	10,0	1,75	8,8	1,80	9,0

Tabla 3.4 - Dosis colectivas anuales de exposición (S) para un bloque energético⁷².

⁷² Informe Nacional de la Federación de Rusia sobre el cumplimiento de las obligaciones originada por la Convención de Seguridad Nuclear, Moscú, 2007

Central Nuclear	(S): persona·Sv/bloque		
	2004	2005	2006
Centrales Nucleares con VVER			
De Balákov	0,61	0,60	0,52
De Volgodón	0,14	0,13	0,13
De Kalíninsk	0,88	0,78	0,60
De Kolsk	0,94	0,66	0,65
De Novovorónezh (tres unidades activas)	1,98	2,49	1,26
Valor medio ponderado	1,00	1,00	0,69
Centrales Nucleares con RBMK			
De Kursk	4,55	3,88	4,70
De Smolensk	5,70	3,80	5,00
De Leningrad	2,82	2,48	2,47
Valor medio ponderado	4,23	3,35	4,00
Centrales Nucleares no seriadas			
De Beloyarsk (Bloque energético No. 3)	0,54	0,47	0,52
De Bilíbinsk	0,71	0,63	0,65
Valor medio ponderado	0,68	0,60	0,62
Valor medio ponderado	2,13	1,77	1,84

En las Tablas 3.5 y 3.6 se presentan los valores medios absolutos y relativos (en porcentaje del límite admitido) de las liberaciones gaseoso-aerosólicas diarias y anuales de las centrales nucleares de Rusia en el año 2006.

Tabla 3.5 - Valores absolutos y relativos en por ciento del nivel de control (NC) de las liberaciones gaseoso-aerosólicas de las centrales nucleares de Rusia en el año 2006⁷³.

Denominación de la central nuclear	Gases inertes radioactivos		¹³¹ I	
	GBq	% NC	MBq	% NC
De Balákov	0,4	0,02	0,26	0,5
De Volgodón	0,7	0,03	0,1	0,2
De Kalíninsk	59	3,1	2,5	5,1
De Kolsk	2,0	0,1	0,05	0,1
De Novovorónezh	124	6,5	5,2	11
De Kursk	921	9,1	7,1	2,8
De Smolensk	299	3,0	1,6	0,6
De Leningrad	1800	18	2,4	0,96
De Beloyarsk	33	1,8	Por debajo del nivel de detección	-
De Bilíbinsk	972	18		-

Tabla 3.6 - Liberaciones gaseoso-aerosólicas anuales de gases nobles radioactivos (GIR) y de radionúclidos de yodo, cesio y cobalto en las centrales nucleares de Rusia en el año 2006⁷⁴.

Denominación	GIR	¹³¹ I	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co

⁷³ Ídem 71.

⁷⁴ Ídem al 71.

Central Nuclear	TBq/a	%LA	MBq/a	%LA	MBq/a	%LA	MBq/a	%LA	MBq/a	%LA
De Balákov	0,15	0,02	95	0,5	1,81	0,2	4,4	0,2	3,5	0,05
De Volgodón	0,24	0,03	37	0,2	0,2	0,02	0,44	0,02	2,6	0,03
De Kalíninsk	22	3,1	913	5,1	0,4	0,04	2,2	0,1	4,1	0,05
De Kolsk	0,75	0,1	19	0,1	*	-	8,2	0,4	80	1,1
De Novovorónezh	45	6,5	1900	10,6	38	4,2	71	3,6	290	3,9
De Kursk	336	9,1	2585	2,8	9,6	0,7	63	1,6	179	7,2
De Smolensk	109	3,0	589	0,6	*	-	12	0,3	134	5,4
De Leningrad	656	18	889	0,96	37	2,7	170	4,2	196	7,8
De Beloyarsk	12	1,8	-	-	*	-	57	2,9	0,21	0,003
De Bilíbinsk	355	18	*	-	*	-	*	-	*	-
* Liberaciones menores que la actividad mínima detectada de radionúclidos										

LA - Límite admisible; a - Año

Las liberaciones de las centrales nucleares causan dosis muy pequeñas de exposición a la población en las regiones donde se encuentran ubicadas. Estas dosis son menores de 0,01 mSv/año, y no excede al 1% de la dosis anual de la exposición externa creada por el fondo natural de radiación.

Las liberaciones gaseoso-aerosólicas de las centrales nucleares son notablemente más bajas que los límites admisibles. En las centrales nucleares con reactores de tipo canal, la liberación de gases nobles radioactivos no excede al 18% de límite admisible. En las centrales nucleares con reactor tipo VVER es menor al 7 % del límite admisible. La liberación de radionúclido de yodo (¹³¹I) no excede al 11% del límite admisible.

La liberación de radionúclidos a la atmósfera en las centrales nucleares de Rusia con VVER no supera las liberaciones en las centrales nucleares con reactores tipo PWR que se encuentran en operación en otros países del mundo.

Sistemáticamente se realizan mediciones de la concentración de sustancias radioactivas en la atmósfera y en los depósitos de agua, en el suelo y la vegetación, en los productos alimenticios y en los productos agrícolas en un territorio con radio de 30 Km. y en los puntos de control alejados a una distancia de 50 Km. de la central nuclear.

3.6.2. Seguridad en la gestión de los desechos radioactivos

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):

- 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 trasmuta 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.

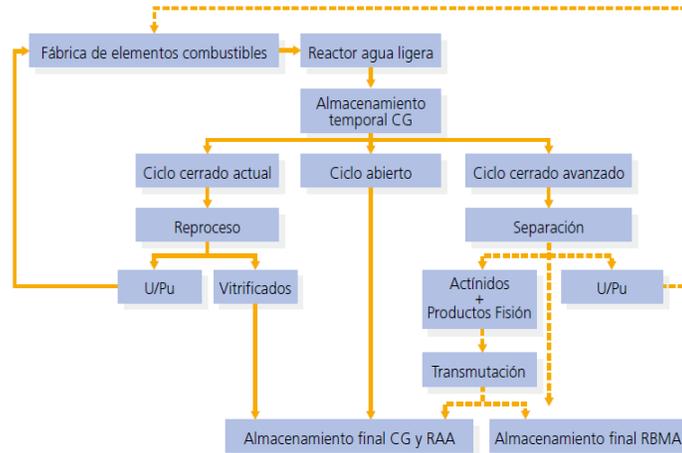


Figura 3.5 - Opciones de gestión del combustible nuclear gastado. (CG-Combustible gastado; RAA- Residuos de Alta Actividad y RBMA - Residuos de Baja y Media Actividad)

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

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.

3.6.3. Garantías de seguridad en las principales etapas del ciclo vida de la central nuclear⁷⁵

Las garantías de seguridad en las distintas etapas del ciclo de vida de una central nuclear están reflejadas en la licencia que recibe la entidad explotadora de parte de la Autoridad Reguladora Nuclear, las que tienen relación con el emplazamiento, la construcción, la operación y el desmantelamiento de la central nuclear. En el proceso de licenciamiento la

⁷⁵ Elaboración propia en base a la experiencia de la industria nuclear rusa, sus normas y reglamentos.

entidad explotadora (solicitante) presenta a la Autoridad Reguladora Nacional los documentos que argumentan la seguridad nuclear y radiológica de la central nuclear. La documentación presentada por el solicitante se somete a un peritaje técnico. Basándose en los resultados de este peritaje, la Autoridad Reguladora toma la decisión de la emisión o no de la licencia que se solicite. La licencia se emite a la entidad operadora de la central nuclear sólo en caso de una valoración positiva de la seguridad del proyecto. Con ello, la Autoridad Reguladora Nuclear establece las condiciones de vigencia de la licencia que son parte inseparable de la misma.

El ciclo de vida de una central nuclear incluye las siguientes etapas:

- Selección y ubicación del emplazamiento;
- Trabajos de diseño e investigaciones;
- Licenciamiento.
- Construcción y montaje del equipamiento;
- Puesta en marcha e inicio de la operación;
- Operación, incluyendo los servicios de mantenimiento, modernización y reconstrucción;
- Ampliación del tiempo proyectado de operación;
- Desmantelamiento y utilización del lugar.

3.6.3.1. Garantía de seguridad pública respecto al emplazamiento de la central nuclear

Uno de los requerimientos principales durante la evaluación de la posibilidad de construcción de la central nuclear, es la garantía para seguridad pública de su operación, reglamentada por las normas de protección radiológica. El establecimiento de una zona sanitaria alrededor de la central nuclear es una de las actividades que se realiza con el objetivo proteger a la población, el medioambiente de la operación de la central nuclear. Una vez escogido el lugar para la construcción de la central nuclear, la entidad explotadora debe tener en cuenta la posibilidad de la creación de tal zona, dentro de la cual está prohibida la residencia. Una atención especial debe prestarse a la dirección de los vientos en el lugar de construcción, de manera que la central nuclear quede ubicada en el sotavento respecto a las zonas pobladas. Los detalles de la selección del emplazamiento se presentan en el capítulo 6.

3.6.3.2. Garantía de seguridad en la etapa de diseño de la central nuclear

Las bases, las normas y los requerimientos principales de seguridad están elaborados en los marcos del Programa del OIEA para las normas de seguridad. Los principios básicos, con los que debe guiarse la entidad explotadora durante el diseño y la construcción de la central nuclear son:

- Reglas generales para el aseguramiento de la seguridad de las centrales nucleares (Rusia: RGS-88/97);
- Normas para el diseño de las centrales nucleares sismo resistentes (Rusia: NP-031-01);
- Emplazamiento de la central nuclear. Criterios y requerimientos principales de seguridad (Rusia: NP-032-01);
- Cálculo de las influencias externas de origen natural y tecnógeno en los objetos del uso de la energía atómica (Rusia: NP-064-05);
- Reglas de protección contra incendios (Rusia: RSC 01-03);
- Reglas sanitarias para el diseño y la operación de las centrales nucleares (Rusia: RS CA-03).

Para los nuevos proyectos de centrales nucleares se consideran además los siguientes enfoques:

- correspondencia de los requerimientos de las normas y reglas vigentes en el campo del uso de la energía atómica, la disposición de reservas para la garantía de la ejecución de los criterios normativos de seguridad;
- correspondencia con la concepción internacional de los sistemas de seguridad de los reactores con agua a presión;
- combinación de los principios activos y pasivos para el funcionamiento del sistema de seguridad con el uso ampliado de los sistemas de acción pasiva;
- utilización de las propiedades implícitas de autoprotección de la central nuclear;
- alto nivel de automatización del control sobre los sistemas activos de seguridad con el fin de eliminar al máximo una acción inadecuada del personal;

- construcción de sistema de seguridad, teniendo en cuenta las condiciones de los accidentes de proyecto, de impactos severos, y condiciones de accidentes fuera de proyecto.

3.6.3.3. Garantía de seguridad en la etapa de construcción de la central nuclear

En la mayoría de los países la decisión sobre la construcción de instalaciones nucleares la toma el Gobierno. En Rusia esta decisión se toma en correspondencia con la Ley Federal No. 170 “Sobre el Uso de la Energía Atómica” y según lo establecido por la legislación en el uso del suelo, la actividad urbanística, la protección del medioambiente y considerando las comprobaciones realizadas por organizaciones públicas.

En la etapa de licenciamiento para la construcción de la central nuclear se realiza una evaluación general de las soluciones y medidas consideradas en el proyecto con el objetivo de garantizar la seguridad de la central nuclear.

Según “los requerimientos sobre la composición total y el contenido de los documentos que fundamenta la seguridad nuclear y radiológica de la instalación nuclear, fuentes radioactivas, lugares de almacenaje de materiales radioactivos, depósitos de desechos radioactivos y/o actividad declarada (para centrales nucleares)” los documentos a presentar para obtener la licencia para la construcción deben contener:

- Informe preliminar de la fundamentación técnica de la seguridad de la central nuclear.
- Programa general de la garantía de calidad.
- Programas individuales de garantía de calidad por tipo de actividad.
- Documentación de proyecto, informes sobre ensayos y trabajos de investigación y diseño.
- Análisis Probabilísticos de Seguridad (APS).

Los programas de garantía de calidad se elaboran según los requerimientos de la Autoridad Reguladora, recogidos en el documento “Requerimientos al programa de garantía de calidad para las centrales nucleares.

La información en el informe preliminar de la fundamentación técnica de la seguridad de la central nuclear se basa en los materiales del proyecto de la central nuclear, de los proyectos técnicos de la unidad del reactor y de los sistemas importantes para la seguridad misma. Esta información, debe ser suficiente para asegurar una comprensión adecuada del concepto de seguridad en que se basa el proyecto, los programas de la garantía de calidad y los principales criterios de operación, planificados por la entidad explotadora. Basándose en esta información, la Autoridad Reguladora evalúa los fundamentos técnicos de seguridad de la central, de la puesta en operación, de la operación misma y del desmantelamiento de la central nuclear en un emplazamiento en particular para evitar el aumento de la dosis de exposición del personal y de la población y de las normas de la liberación y el contenido de las sustancias radioactivas al medioambiente en operación normal y durante las averías de proyecto, así como la posibilidad de limitar la exposición durante los accidentes fuera de proyecto.

La concepción de la seguridad presentada en el informe antes mencionado, debe satisfacer los requerimientos de los documentos normativos vigentes. En el informe deben reflejarse los aspectos relacionados con el desmantelamiento de la central nuclear.

3.6.3.4. Garantía de seguridad en la etapa de operación de las centrales nucleares

Al igual que la emisión de las licencias anteriores, la licencia de operación de la central nuclear la otorga la Autoridad Reguladora después de evaluados los documentos que presenta la entidad explotadora.

Para obtener la licencia de operación debe ser presentado por la entidad explotadora los documentos de operación y otros documentos referidos a los aspectos de garantía de seguridad en la operación de la central nuclear, incluyendo “El programa de puesta en marcha de la central”, “el programa de puesta en marcha la metodología de ejecución de pruebas” así como “el programa de puesta en marcha energética”.

Para la puesta en operación de la central, la entidad explotadora presenta a la Autoridad Reguladora las actas con los resultados de la puesta en marcha física y energética. La puesta en marcha física y energética del bloque de la central se realiza después de que la Autoridad Reguladora realice una inspección en la central nuclear sobre la disponibilidad real para su puesta en marcha.

El reglamento tecnológico para la operación de la central nuclear es el documento principal. En él se establecen los límites y condiciones de la operación, que se indican en la

etapa de diseño del proyecto y se comprueban en base a los resultados de la instalación antes de la puesta en marcha y de los resultados de la puesta en marcha física y energética. El reglamento tecnológico establece las reglas y métodos de operación de la central y el orden general de las operaciones relacionadas con la seguridad en la central nuclear.

Tabla 3.7 - Resultados de la evaluación probabilística del estado de la seguridad de los bloques en operación de las centrales nucleares de Rusia según la situación el 01.07.2007⁷⁶.

Bloque de la central nuclear	Tipo reactor	Valor integral del riesgo por un eventual daño severo de la zona activa [1/reactor·año]
De Balákov-1	VVER	3,62·E-5
De Balákov-2, 3, 4	VVER	8,3·E-5
De Bilíbinsk-1, 2, 3, 4	EGP-6	3,092·E-7
De Kalíninsk-1	VVER	2,43·E-4*
De Kalíninsk-2	VVER	1,242·E-4*
De Kalíninsk-3	VVER	5,53·E-5
De Kolsk-1	VVER	3,09·E-5
De Kolsk-2	VVER	2,52·E-5
De Kolsk-3	VVER	7,96·E-5
De Kolsk-4	VVER	1,28·E-4*
De Kursk-1	RBMK	9,85·E-6
De Kursk-2	RBMK	7,47·E-6
De Kursk-3	RBMK	8,53·E-6

⁷⁶ Informe Nacional de la Federación de Rusia sobre el cumplimiento de las obligaciones originada por la Convención de Seguridad Nuclear, Moscú, 2007.

Bloque de la central nuclear	Tipo reactor	Valor integral del riesgo por un eventual daño severo de la zona activa [1/reactor·año]
De Leningrad-1	RBMK	1,12·E-5
De Leningrad-2	RBMK	3,34·E-5
De Leningrad-3	RBMK	2,0·E-4*
De Novovorónezh-3	VVER	3,0·E-5
De Novovorónezh-4	VVER	5,1·E-5
De Novovorónezh-5	VVER	7,8·E-4*
De Smolensk-1	RBMK	1,84·E-4*
De Smolensk-2	RBMK	1,77·E-4*
De Smolensk-3	RBMK	3,83·E-5
De Volgodónsk-1	VVER	7,14·E-5

La entidad explotadora garantiza también el control e inspecciones constantes del estado de equipos por medio de la realización de la investigación técnica de los equipos y las tuberías y del cumplimiento de los programas de control de operación del estado del metal de los equipos y tuberías. Según estos resultados se evalúa el estado de los equipos, y se pronostica la duración de su operación segura.

Anualmente en cada central nuclear en operación se realiza la revisión, por parte de una comisión del aseguramiento de la seguridad nuclear. La información sobre los resultados de la revisión de la actividad de la entidad explotadora en forma de informes se entrega a la Autoridad Reguladora Nuclear.

La modernización y el aumento de la seguridad de las centrales así como, la evaluación profunda de la seguridad permiten obtener la prolongación de las licencias una vez concluido el periodo proyectado de su operación.

Existe un manual de instrucciones para las situaciones de pre-emergencia y de los accidentes de proyecto el cual determina las acciones a seguir por el personal operativo para la recuperación de estado normal de la central nuclear. En estas instrucciones se presentan los sucesos iniciadores y las situaciones de emergencia de los sistemas y equipos así como, las desviaciones de los parámetros reglamentados que conducen o pueden conducir a los accidentes de proyecto. Para cada posible suceso iniciador del accidente, se examinan también las condiciones de su surgimiento y las vías de desarrollo de la avería, que conducen a consecuencias más graves (enfoque conservador).

La prevención de la transformación de los sucesos iniciadores en averías de proyecto, y las averías de proyecto en averías fuera de proyecto, se asegura con el empleo de los sistemas de seguridad. En los nuevos proyectos de las centrales nucleares se introducen sistemas adicionales de seguridad, basados en el principio pasivo de acción, lo que aumenta la fiabilidad de realización de las funciones requeridas de seguridad.

Existe también otro manual, igual de importante que el anterior, para la gestión de las averías fuera de proyecto y la mitigación de sus consecuencias.

Se presta una atención especial a la protección de la barrera hermética de la instalación del reactor contra la destrucción durante los accidentes fuera de proyecto y a su mantenimiento. La principal dirección de las actividades de protección de la barrera hermética durante los accidentes fuera de proyecto es el uso de tales sistemas con recombinadores pasivos autocatalíticos de hidrógeno, lo que evita el surgimiento de cargas de los incendios y explosiones sobre los locales herméticos del bloque de la central en condiciones de una avería severa fuera de proyecto.

3.6.3.5. Garantía de seguridad en la etapa de desmantelamiento de las centrales nucleares⁷⁷

El desmantelamiento, la gestión de los desechos radioactivos que surgen en este proceso, y su eliminación e inmovilización final son partes del ciclo de vida de las instalaciones nucleares y han planteado diversos problemas de ingeniería y técnicos a resolver. En esta etapa se aplican requerimientos de igual rigurosidad que en la operación de la central. El problema de poner término a la actividad industrial de la energía nuclear de una forma medioambientalmente responsable es muy importante y está relacionada con gastos que

⁷⁷ V. I. Baranov, V. A. Gashenko, V. A. Nikolaev y otros. Aspectos ecológicos y económicos del desmantelamiento de las centrales nucleares, XI Conferencia Internacional, AN de Rusia. 19-22.06.2000, Sant-Petersburgo.

deben ser considerados con antelación en el proyecto. Una serie de mejoras y modificaciones de proyecto de la infraestructura del ciclo de vida de la central nuclear facilitan hoy día su desmantelamiento.

Para el año 2010 alrededor de la mitad de los bloques de las centrales nucleares del mundo entrarán a la etapa del término de su vida útil. Se calcula que serán desmantelados alrededor de 300 unidades con una potencia eléctrica total de 200 GW. En el territorio de las ex-repúblicas soviéticas esta cifra será de 25 unidades para el 2010. La experiencia obtenida constata que existe un costo significativo en el procedimiento para el desmantelamiento de las unidades de las centrales nucleares (Tabla 3.6). Los gastos específicos en el desmantelamiento de las centrales nucleares constituyen una parte importante de los gastos de esta industria. Los gastos necesarios para el desmantelamiento deben hacerse después de concluir el plazo de funcionamiento de la central, lo que permite que se hagan las reservas necesarias durante el período de su operación.

Tabla 3.8 - Costo del desmantelamiento de las centrales nucleares en diferentes países⁷⁸.

País	Tipo	Potencia [MW]	Opción 1 (desmontaje inmediato)		Opción 2 (desmontaje después de conservación bajo vigilancia)	
			Costo (Mill \$)	Costo específico (\$/KW)	Costo (Mill \$)	Costos específico [\$/KW]
Bélgica	PWR	900 - 1.390	736 - 394	271 - 438	464	516
Finlandia	VVER, BWR	735 - 1.300	178 - 222	171 - 178	101 - 266	137 - 205
Francia	PWR	1.400	492	351	-	-
Alemania	PWR, BWR	70 - 1.300	320 - 628	266 - 5.029	301 - 622	239 - 1.414

⁷⁸ Ídem 76.

Suecia	PWR, BWR	465 - 1.300	127 - 322	167 - 269	-	-
Reino Unido	GCR, PWR	60 - 1.400	517	488	229-694	997 - 3.817
EE.UU.	PWR, BWR	849 - 1.300	145 - 228	112 - 236	164 - 280	140 - 216
Eslovaquia	VVER, GCR	440	52 - 181	118 - 421	151 - 187	351 - 435
Canadá	PHWR	542 - 1.300	68 - 185	125 - 196	55 - 228	101 - 380
Japón	PWR, HWR	1.100 - 1.350	349	259	326 - 339	281 - 308
Rusia	VVER, RBMK, FBR	440 - 1.000	-	-	255 - 545	230 - 545
Valor medio				475		645

3.7. Plan de emergencia nuclear⁷⁹

De acuerdo con la experiencia internacional y las regulaciones establecidas por la Autoridad Reguladora Nuclear, las centrales nucleares como parte del proceso de licenciamiento, (en particular la licencia de operación) deben presentar un plan de emergencia cuyos objetivos generales son:

- a) Reducir el riesgo o mitigar las consecuencias de los accidentes en su origen.
- b) Evitar o, al menos, reducir en lo posible los efectos adversos de las radiaciones ionizantes sobre la población y los bienes.

El primer objetivo es responsabilidad del titular de la central nuclear, mientras que el segundo es responsabilidad conjunta del titular y de las entidades y organismos públicos que tienen competencias y funciones de protección a la población frente a los riesgos nucleares y radiológicos.

⁷⁹ Tomando del Reglamento para la elaboración del Plan de Emergencias de la Consejo de Seguridad Nuclear de España (Autoridad Reguladora Nuclear). <http://www.csn.es>.

Para conformar este plan se establecen dos zonas, que son aquellas áreas geográficas en el entorno de la central nuclear sobre las que han de incidir las medidas de protección a la población y a sus bienes (Figura 3.6). Vienen determinadas por su distancia a la Instalación, en base a los efectos radiológicos esperados en ellas a consecuencia del espectro de accidentes posibles evaluados por la entidad explotadora y la Autoridad Reguladora Nuclear y que deben estar recogidos dentro de la fundamentación técnica de seguridad de la instalación que debe presentarse para la obtención de las licencias.

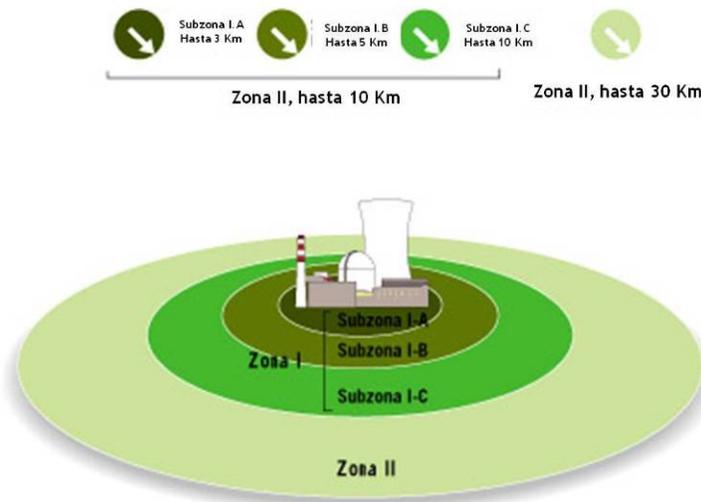


Figura 3.6 - Representación esquemática de las zonas consideradas dentro de los planes de emergencia nuclear de una central nuclear.

Las zonas que se consideran para la elaboración de este plan de emergencia son:

- **Zona 0 o zona bajo control del explotador:** es el área en la que se ubica la central y los terrenos que la circundan de los que el titular puede disponer libremente por razones de propiedad o de acuerdo con sus propietarios. Las dimensiones de esta zona se establecen en las condiciones de licenciamiento de cada central nuclear y están directamente relacionadas con los resultados del análisis de accidentes incluido en su Estudio de Seguridad. Las medidas de protección y otras actuaciones

de emergencia que deben adoptarse en esta zona, están especificadas en el Plan de Emergencia Interior.

- **La Zona I o zona de medidas de protección urgentes**, es el círculo de 10 Km de radio, concéntrico con la central nuclear, que incluye a la Zona 0. Esta zona se corresponde con el área geográfica en la que las vías principales de exposición están asociadas al paso de la nube radiactiva, que lleva consigo la exposición directa a la radiación procedente de la contaminación de la atmósfera y del suelo, y la contaminación interna por inhalación del material radiactivo emitido durante el accidente. En esta zona deberán planificarse medidas de protección urgentes destinadas a reducir el riesgo de aparición de efectos deterministas entre la población. Además, en esta zona se deberá planificar, también, la aplicación de medidas de protección para reducir las dosis a largo plazo provenientes de las sustancias radiactivas depositadas y de la ingestión de alimentos y agua contaminados. Esta zona se divide en tres en tres subzonas, IA, IB y IC, atendiendo al nivel de riesgo esperable en cada una de ellas:
 - **Subzona IA:** comprende el círculo de 3 Km. de radio, concéntrico con la central nuclear.
 - **Subzona IB:** es la corona circular comprendida entre las circunferencias de radios de 3 y 5 Km.
 - **Subzona IC:** es la corona circular comprendida entre las circunferencias de radios de 5 y 10 Km.
- **Zona II o zona de medidas de larga duración**, corona circular comprendida entre las circunferencias de radios de 10 y 30 Km concéntricas con la central nuclear hasta un radio de 30 Km.

Para cada una de estas zonas y subzonas se establecen las medias necesarias de acuerdo con el tipo de accidente ocurrido con el objetivo de mitigar las consecuencias del mismo. Asimismo, los planes cuenta con una serie de medidas de protección como por ejemplo: la toma de pastillas de yodo natural previene la retención de yodo radiactivo que pudiera escapar en caso de accidente, el control de alimentos y bebidas previene contra la ingestión de radiactividad, al evitar la ingestión de productos que pudieran haber resultados contaminados; entre otras.

Un aspecto fundamental para un efectivo funcionamiento de cualquier plan de emergencia es la información a la población, que se realiza en dos vertientes:

- Información previa: dirigida a grupos de población que pueda verse afectada, se les informa sobre los posibles riesgos, planes de actuación, medidas de emergencia prevista y comportamiento a seguir por la población para garantizar una correcta aplicación de dichas medidas.
- Información en caso de emergencia radiológica: dirigida a la población afectada ante una emergencia nuclear o radiológica producida durante un accidente. Es emitida por las autoridades competentes y su objetivo es informar sobre las medidas de protección específicas adoptadas y establecer como debe actuar la población para aplicar eficazmente esas medidas.

A fin de comprobar el correcto funcionamiento de los dispositivos que se utilizarían en situaciones de emergencia y para mantener el entrenamiento del personal que tendría que intervenir en las mismas, se realizan simulacros de emergencia que tienen, como mínimo, carácter anual.

La realización de estos simulacros se basa en el establecimiento de un hipotético acontecimiento anómalo (suceso iniciador), que evoluciona desfavorablemente al ir concurriendo una serie de fallos concatenados, de forma que la situación evolucionaría hasta la emergencia.

Durante estos simulacros se activan las comunicaciones y se constituyen los grupos de emergencia, lo que permite comprobar la capacidad de respuesta de las distintas organizaciones participantes, la agilidad de las comunicaciones, los sistemas de transmisión de datos, métodos de cálculo, etc.

Conclusiones

El impacto y el riesgo que representa la energía nuclear dependen directamente del conocimiento científico que permite conocer y manejar adecuadamente los procesos naturales de la materia al nivel del átomo. Así, después de décadas de experiencia, hoy la seguridad nuclear está desarrollada a un alto nivel, incluso más alto que 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 medidas de seguridad existentes en las centrales nucleares.

Existe una base legislativa y de regulación eficaz, que reglamenta los aspectos relacionados con el aseguramiento y la regulación de seguridad de las unidades de las centrales nucleares. Los cambios de su evolución están dirigidos al perfeccionamiento de las normas vigentes y al desarrollo ulterior de la energía nuclear.

Existe un órgano estatal independiente encargado de controlar y regular la actividad nuclear de un país, a la cual se le denomina Autoridad Reguladora Nuclear. Esta organización está provista de los recursos humanos, financieros y técnicos que le permiten cumplir las funciones asignadas conservando la independencia.

El principio de que toda la responsabilidad por la seguridad de la central nuclear recae sobre la entidad explotadora está establecido legalmente, determinándose así las exigencias normativas y es un principio organizativo importante del aseguramiento de la seguridad.

La prevención de las acciones incorrectas del personal, la fijación de las imperfecciones en la preparación del personal, el mantenimiento de un alto nivel de la preparación profesional es muy importante en el sistema de medidas para el aumento de la seguridad en las centrales nucleares. El orden y los requerimientos, según los cuales se organiza el control sobre el nivel de calificación del personal administrativo, operativo y otro de la central nuclear se establece a nivel estatal.

La protección del personal de la central nuclear, de la población y del medioambiente contra la radiación durante la operación de la central nuclear garantiza que la dosis de

exposición del personal se encuentra en un nivel bajo y no supera los valores normativos establecidas. La influencia radioactiva de las centrales nucleares en la población y el medioambiente (con la operación normal de la central nuclear) a consecuencia de la liberación de gases de aerosol y descargas líquidas crea un riesgo radiológico complementario, que es admisible (menos 10^{-6} por año).

Por otro lado, en caso de ocurrencia de un accidente durante la operación de la central, se dispone de un Plan de Emergencia Nuclear con el objetivo de garantizar el menor impacto posible sobre la población y el medioambiente en las áreas correspondientes.

Las evaluaciones del estado de la seguridad e inspecciones sistemáticas complejas e inspecciones ad hoc, dirigidos a evitar las infracciones y al aumento posterior de la seguridad de las centrales nucleares, están en correspondencia con los requerimientos de la Convención de Seguridad Nuclear.

Bibliografía

- 3.1.- E. O. Adamov, Proyectos innovadores de los reactores nucleares - ¿Capricho de científicos o un imperativo estratégico?, Sitio oficial NIKIET de N. A. Dollezhal (www.nikiet.ru).
- 3.2.- Informe Nacional de la Federación de Rusia sobre el cumplimiento de las obligaciones originada por la Convención de Seguridad Nuclear, Moscú, 2007.
- 3.3.- Rizhov S. B., Mojov, V. A., Shekin I. G., Krizhanovskiy V. I. Los análisis de seguridad para la Central Nuclear-2006, Seminario de la AER y EDF, Moscú, Mayo, 2008.
- 3.4.- Eficiencia de la tecnología de la energética nuclear: criterios sistémicos de la dirección de desarrollo /V. I. Rachkov y otros, M.: FGUN TsNIIATOMINFORM, 2008.
- 3.5.- V. I. Baranov, V. A. Gashenko, V. A. Nikolaev y otros. Aspectos ecológicos y económicos del desmantelamiento de las centrales nucleares, XI Conferencia Internacional, AN de Rusia. 19-22.06.2000, Sant-Petersburgo.
- 3.6.- Seguridad Nuclear, Foro de la Industria Nuclear Española, Foro Nuclear, Julio 2008.
- 3.7.- Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants (75-INSAG-3 Rev. 1), A Report by International Nuclear Safety Advisory Group (INSAG-12), IAEA, Vienna, 1999.
- 3.8.- Safety Culture (75-INSAG-4), A Report by the International Nuclear Safety Advisory Group, IAEA, Vienna, 1991.

Capítulo 4

Combustible nuclear

4.1. Características generales

El ciclo del combustible nuclear es el conjunto de medios de extracción y producción del mineral para los reactores nucleares, su preparación para la operación y su utilización en la zona activa del reactor y finalmente su almacenamiento definitivo después de extraído (combustible gastado). El combustible nuclear gastado o irradiado (CNG), después de pasar por un proceso de reciclaje especial, puede ser nuevamente utilizado. La duración del ciclo del combustible nuclear, incluyendo su almacenamiento definitivo, es de 50 a 100 años.

Este ciclo puede dividirse en tres etapas: las operaciones iniciales, que abarcan desde la extracción del mineral hasta el suministro de los elementos combustibles a la central nuclear; después está la etapa de explotación del combustible en el reactor para generar electricidad y la última etapa, es aquella que considera todos los procedimientos post-operación, que incluyen el almacenaje provisional del combustible gastado en el emplazamiento de la central para disminuir su radioactividad, el reprocesamiento del combustible gastado para proceder a su reutilización o reciclaje (si es ciclo cerrado), la vitrificación del residuo final de alta radioactividad y el almacenamiento de este en depósitos especiales.

En la mayoría de los países se utiliza el **Ciclo Abierto** de combustible, que se caracteriza porque no incluye la fase de reciclaje una vez utilizado, sino que los desechos se almacenan en depósitos especiales de lenta degradación. El **Ciclo Cerrado**, junto con el retorno del combustible gastado a las plantas de reprocesamiento, para proceder en ella la extracción del uranio que constituye más de 95% del peso inicial del mineral, se deriva posteriormente por las mismas fases de tratamiento que el material extraído de las minas, hasta ser enviado nuevamente a la central como combustible nuclear.

Aquella porción final que no puede ser reprocesada, y que tiene una alta radio-actividad y de muy lenta degradación (sobre 1.000 años) corresponde aproximadamente a un 3% del uranio que había en el combustible nuclear fresco. Esta porción se vitrifica y se almacenan en depósitos especiales.

Los casetes o cartridge de combustible están constituidos por un elemento principal que consiste en un haz de barras de acero inoxidable o de circonio. Dentro de éstas se colocan

las pastillas de dióxido de uranio, con un enriquecimiento de U^{235} hasta un 5%. Las barras hermetizadas y provistas de pastillas de combustible se llaman elementos combustibles. Para igualar los juegos entre las piezas de combustibles y fijar los conjuntos combustibles es necesaria una construcción rígida, ensamblaje que tiene una serie de partes: cola, cabeza y rejilla distanciadora, en algunos casos, y tubo de tapa. La cantidad de conjuntos combustibles depende del tipo de reactor.

El uranio natural posee una baja actividad, 25 Bq⁸⁰ por mg. El contenido de U^{235} en el uranio natural es de un 0,7%. Para que el mineral de uranio se convierta en combustible debe pasar por una serie de transformaciones: primero, se muele en máquinas trituradoras, después se someten al contacto con ácidos y la sal concentrada de uranio es separada de la solución por medio de un proceso de intercambio iónico. El resultado de esta operación es el protóxido-óxido de uranio. Después, éste pasa por un proceso cuyo resultado es el hexafluóruro de uranio, que es tratado en máquinas centrífugas con el fin de aumentar la cantidad del isótopo fisionable de U^{235} . Después de este proceso de enriquecimiento, al hexafluóruro de uranio se convierte en un concentrado de dióxido de uranio, que corresponde al material final para las pastillas de combustibles (ver Figura 4.1), también llamado “torta amarilla” (yellow cake).

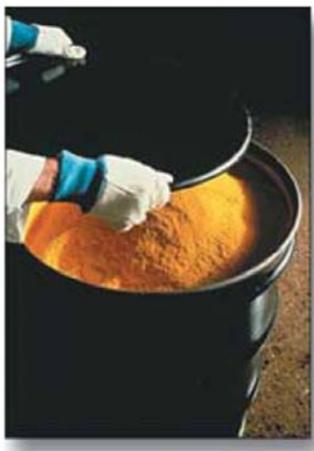


Figura 4.1 - Material final para las pastillas de combustible nuclear (Torta Amarilla).

⁸⁰ El becquerel o becquerelio (símbolo Bq) es una unidad derivada del Sistema Internacional de Unidades que mide la actividad radiactiva. Equivale a una desintegración nuclear por segundo. Toma su nombre en honor del físico francés Henri Becquerel. Por otra parte, $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq equivalen a 1 Curie.

En Rusia funcionan cuatro centros de enriquecimiento de uranio, basados en tecnología de difusión y centrifugación gaseosa. El combustible nuclear se traslada desde la fábrica hasta la central utilizando medios de transporte especializados y seguros: puede ser por vía aérea, marítima o terrestre. Para ello, son colocados en contenedores metálicos altamente resistentes y especialmente certificados para el traslado de materiales nucleares. La logística considera, básicamente, una ruta especial elegida con antelación y un régimen de alto nivel de vigilancia.

Hasta la fecha y durante toda la historia del traslado de combustible nuclear no se han reportado accidentes que hayan provocado un impacto negativo de importancia en el medioambiente o las personas.

Existen 21 productores de concentrado de uranio o *yellow cake*. La mayor parte del concentrado de uranio la suministran Canadá, Namibia, Níger y Sudáfrica.

Tabla 4.1 - Producción de uranio por países (ton.).⁸¹

País	2000	2001	2002	Cambios años 2001-2002 [%]
Australia	7.609	7.756	6.888	-12
Brasil	50	58	270	365
Canadá	10.590	12.520	11.604	-8
China	500	655	730	12
República Checa	507	456	465	2
Francia	320	195	20	-85
Alemania	28	27	212	685
Hungría	10	0	0	0
India	200	230	230	0
Kazakstán	1.740	2.050	2.800	36

⁸¹ Uranium 2001: Resources, Production and Demand, OECD, IAEA, August 2002.

País	2000	2001	2002	Cambios años 2001-2002 [%]
Namibia	2.714	2.239	2.333	4
Níger	2.900	2.920	3.075	5
Pakistán	23	46	38	-17
Portugal	10	3	2	-33
Rumania	50	85	90	6
Rusia	2.500	2.500	2.900	16
Sudáfrica	878	873	824	-6
España	251	30	37	23
Ucrania	500	750	8.00	7
EE.UU.	1.456	1.011	919	-9
Uzbekistán	2.350	1.962	1.860	-5
Total:	35.186	36.366	36.097	-1

Tabla 4.2 - Producción de uranio por empresas.⁸²

Empresa	País	Empresa explotadora	Método de explotación del yacimiento	Nivel de producción en 2000 [t U]	Producción mundial [%]
Mc Arthur-River/ Key Lake	Canadá	Cameco	Abierto	4.141	11,9
Olympic-Dam	Australia	WMC	Subterráneo	3.816	11,0

⁸² Idem 80.

Empresa	País	Empresa explotadora	Método de explotación del yacimiento	Nivel de producción en 2000 [t U]	Producción mundial [%]
Ranger	Australia	(RioTinto - 68%)	Abierto	3.762	10,8
Rabbit-Lake	Canadá	Cameco	Subterráneo	2.790	8,0
Rossing	Namibia	RioTinto (69%)	Abierto	2.714	7,8
Mc Clean-Lake	Canadá	Cogema	Abierto	2.308	6,6
Acouta	Níger	Cogema/ ONAREM	Subterráneo	1.917	5,5
Cluff-Lake	Canadá	Cogema	Abierto / subterráneo	1.443	4,2
Arly	Níger	Cogema/ONAREM	Abierto	978	2,8
Vaal-Riffs	Sudáfrica	AngloAmerican	Subterráneo	711	2,0
Total				24.580	70,7

Tabla 4.3 - Empresas enriquecedoras de uranio (miles de ton).⁸³

Proveedor, país	Capacidad nominal	Nivel de producción	Capacidad real		
			2000	2005	2010
BNFL, Gran Bretaña	5	5	5	4	-
Cameco, Canadá	10	7,5	10	10	10
Comurhex, Francia	14	11	12	12	12
TVEL, Rusia	22	10	10	10	10
ConverDyn, EE.UU.	13	7,3	9,3	12	12

⁸³ Uranium 2001: Resources, Production and Demand, OECD, IAEA, August 2002.

Total	62	43	46	48	44
-------	----	----	----	----	----

La capacidad total de las plantas de enriquecimiento de uranio supera los 50 millones de Kg de UTD/año.

Tabla 4.4 - Capacidades de las plantas de difusión de gas (DG) y de centrífugas (C) para el enriquecimiento de uranio, (millones de kg de UTD/año).

País	Empresa	Tecnología y cantidad de plantas	2005
EE.UU.	USEC	DG - 2	19
Francia	Eurodif	DG - 1	11
Gran Bretaña	Urenco	C - 1	2,1
Alemania	Urenco	C - 1	1,8
Países Bajos	Urenco	C - 1	1,5
Japón	JNFL	C - 1	1,05
Brasil	IPEN	C - 1	0,1
China	CNEIC	DG - 1	0,6
China	CNEIC	C - 1	1,5
Rusia	TVEL	C - 4	14
Total			53

La planta en Argentina (0,02 millones de kg de UTD/año) fue clausurada en 1994. La de Sudáfrica (0,3 millones de kg de UTD/año) en 1995.

4.2. El combustible nuclear^{84, 85}

Dependiendo del tipo del combustible nuclear y las condiciones particulares de su uso, los ciclos pueden variar, pero al final siempre tienen el mismo esquema conceptual.

La fase inicial del ciclo es la extracción del mineral es decir, el trabajo que se realiza en la mina para obtener el recurso. La corteza terrestre contiene 75.10^{-6} de uranio, que es 1.000 veces más que el oro y 30 veces más que la plata. Los minerales de uranio se diferencian por la diversidad singular de su contenido. En la mayoría de los casos el uranio se presenta en formaciones inorgánicas. Puede obtenerse en excavaciones a tajo abierto o en minas subterráneas, con métodos similares a la minería tradicional. Los métodos progresivos de lixiviación permiten evitar la afloración del mineral y, asimismo, se puede extraer el uranio en su yacimiento.

El mineral extraído proveniente de la mina, contiene los componentes metálicos y la ganga (residuo). Durante su procesamiento los minerales útiles se separan de la ganga con la formación de la torta amarilla (yellow cake). Esto se produce por medio de la molienda del mineral original y la lixiviación del uranio.

Durante las etapas de procesamiento de los minerales se extrae el uranio de las mezclas. Las tortas amarillas contienen entre un 60-96% de óxido de uranio. La fase siguiente del ciclo es la refinación, que finaliza la purificación del uranio de las mezclas y de aquellos elementos que poseen una gran sección de captura de neutrones (Hafnio, Boro, Cadmio, etc.).

4.2.1 El Uranio enriquecido

El uranio enriquecido es la materia prima utilizada para la fabricación del combustible de los reactores nucleares. Éste se utiliza en los reactores en forma de metales, con aleaciones de óxido de carburos, nitritos y otras composiciones, a los que se da forma de pastilla. La utilización del combustible en el reactor se basa precisamente en estas tabletas o pastillas. Para ser usadas en un reactor se ubican en el interior de una barra la que unida a otras barras similares constituyen el casete o cartridge.

⁸⁴ Elaboración propia en base a información suministrada por el Consorcio Rosatom y TVEL de la Federación de Rusia.

⁸⁵ Ciclo de combustible nuclear en 2001-2002, Ministerio de Energía Atómica de la Federación de Rusia, 2002.



Imagen 4.1 - Planta de enriquecimiento de uranio de Tricastin, Francia. Esta planta garantiza las necesidades de de uranio enriquecido para las centrales nucleares francesas.

La industria nuclear, con sus actuales reactores, se basa en combustible uranio “enriquecido a un bajo nivel” (5%) y los reactores de neutrones rápidos que utilizan uranio enriquecido con alto nivel de U^{235} (hasta 93%). Antes de preparar el combustible, el uranio natural, que contiene tan sólo 0.72% de U^{235} debe ser enriquecido, o sea, separar los isótopos de U^{235} y U^{238} . El método principal para enriquecer el uranio es el de difusión gaseosa. También existe el método de centrifugado, mediante el uso de centrífugas de alta velocidad.

Las empresas productoras de combustible nuclear, en sus procesos industriales consideran las siguientes etapas de preparación:

- Producción de hexafluoruro a partir del polvo de dióxido de uranio.
- Producción de las pastillas.
- Construcción de las barras que contienen las pastillas (elementos combustibles).
- Colocación de las barras o elementos combustibles dentro del casete.
- Sellado y acondicionamiento del casete para su introducción a la zona activa del reactor.

El producto comercial final en esta fase del ciclo es el combustible nuclear listo para ser introducido en el reactor.

4.2.2. El combustible en la central nuclear

El reactor nuclear, es un dispositivo donde se produce la reacción de fisión en cadena controlada con la consiguiente liberación energía en forma de calor. Está compuesto básicamente en una zona activa y el reflector. En la zona activa están colocados los casetes que contiene el combustible y además está el moderador donde se frenan los neutrones provenientes de la fisión hasta alcanzar la energía necesaria para ocasionar fisiones sucesivas con nuevos átomos de uranio. El reflector es el volumen de agua que se encuentra entre la zona activa y la vasija del reactor.

El refrigerante absorbe el calor de la reacción nuclear en la zona activa, se mueve por el circuito de refrigeración pasando por el intercambiador de calor donde entrega el calor al refrigerante del circuito externo sin entrar en contacto con él a través del generador de vapor.

4.2.3. Desechos radioactivos

Muchos de los procedimientos de la industria nuclear que se aplican hoy fueron replicados en otras industrias productoras de desechos que contaminan el medioambiente. En comparación con los desechos habituales, el volumen total mundial de los desechos radioactivos es esencialmente pequeño. Por ejemplo, del reactor PWR-1000 (1.000 MW) anualmente descarga 23 toneladas de combustible gastado, que contiene solamente 40 Kg de productos de fisión, o sea 920 Kg al año. Anualmente se acumulan más de 300 toneladas de combustible gastado en el mundo.

En esta etapa los casetes del reactor contienen aún elementos combustibles con isótopos de alto nivel de radioactividad. Estos son colocados en piscinas de enfriamiento entre 3 a 9 años (ver imagen 4.2), tiempo requerido para que se desintegren los nuclíidos de vida corta. Después, la actividad del combustible gastado se debe a los productos de fisión (PF) con un período largo de vida promedio (Estroncio-90, Criptón-85, Tecnecio-99, Cesio-137). Posteriormente quedan los actínidos transuránicos, que tienen períodos de vida promedio de más de mil años: Neptunio, Plutonio, Americio, Curio.



Imagen 4.2 - *Piscina típica para el almacenamiento del combustible nuclear gastado.*

Durante el tiempo de almacenamiento, la actividad de los elementos combustibles disminuye progresivamente hasta el punto en que puede ser manipulado de manera segura. Después del almacenamiento en la piscina, el combustible gastado o bien se almacena en la central nuclear, en una piscina o en almacenamiento en seco (ver imagen 4.3), hasta su evacuación definitiva (ciclo abierto) o se traslada a la planta de reprocesamiento (ciclo cerrado) para extraer el plutonio y el resto de uranio. Para esto, se utiliza tecnología de solución acuosa y como resultado los residuos radioactivos se hacen líquidos. En este punto la radioactividad de los desechos ha disminuido seis veces en comparación con la que se presentaba al inicio del proceso, habiéndose vuelto significativamente pequeña.



Imagen 4.3 - Almacenamiento en seco del combustible nuclear gastado. Nótese que no es necesario ropa especial para estar en las cercanías del contenedor.

4.2.3.1. Clasificación de los desechos radioactivos

Los desechos radioactivos se clasifican según su actividad en 3 categorías:

- **Categoría A:** Son los desechos de baja actividad que se producen en todas las etapas del ciclo del combustible nuclear. Contienen pequeñas cantidades de elementos de muy baja radioactividad y de corta vida media (no más de unas pocas décadas). Representan el 90% del volumen total de residuos 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, ropa protectora o filtros irradiados) y durante el desmantelamiento, categoría en la que caen la mayoría de las partes de una central nuclear, luego del fin de su vida útil.
- **Categoría B:** Son sustancias de baja o media a radioactividad y de mayor vida media (hasta mil años). Se producen durante el reprocesamiento del combustible y la operación del reactor. Un pequeño porcentaje se produce durante el desmantelamiento de las centrales nucleares.

- **Categoría C:** Los desechos de alta actividad contienen material altamente radioactivo y de vida media más larga (sobre mil años). Están constituidos esencialmente por el combustible luego de su uso.

Los desechos radioactivos del primer tipo (provenientes de filtros, detalles de sistemas de refrigeración o del primer circuito) no tienen radioactividad propia sino inducida, la cual se igualará con el índice natural del medioambiente (fondo natural) dentro de 30 años. Durante este tiempo requiere de control.

Los desechos de tipo B y C se forman durante la generación de electricidad en la central nuclear. El combustible gastado de mayor peligrosidad -Categoría C- contiene 95% de uranio y 3.5% de productos de fisión. Además, el U^{238} , que forma parte del elemento combustible, se convierte en plutonio (1%) u otro elemento transuránico.

Los residuos finales se colocan en contenedores metálicos, que después se empotran en hormigón. El volumen de estos desechos se puede disminuir 4 veces con el moldeado a alta presión. No es aconsejable su almacenaje en la superficie terrestre. La mejor solución consiste en depositarlos bajo tierra para protegerlos adecuadamente de la influencia externa natural y la que pudiera ser ocasionada por la acción de terceros.

4.2.4. Ciclo abierto y ciclo cerrado

Actualmente Francia, Alemania, Gran Bretaña, Rusia y Japón han implementado el ciclo cerrado de combustible y en Europa, más de 35 reactores son capaces de utilizar parcialmente combustible MOX (20-50%), que contiene hasta 7% del plutonio, apropiado para los reactores.

En general, los ciclos abierto y cerrado del combustible cumplen con etapas similares. La diferencia se presenta al momento de disponer del material ya utilizado. En ciclo abierto el combustible gastado se considera en su totalidad como desecho.

En el ciclo cerrado, los elementos combustibles ya utilizados son extraídos del casete para ser tratados en las plantas del reprocesamiento que existen fuera de la central nuclear, donde son molidos y fundidos en ácido. Este proceso separa el plutonio y el uranio no utilizado. De ese volumen, después de 3 a 9 años, solo un 3% del combustible constituye desecho de alto nivel de radioactividad, el cual es tratado mediante el sistema de bituminación o vitrificación, para posteriormente ser almacenado en depósitos especialmente diseñados para tales efectos. El resto de este material es reciclado: se

devuelve al productor, donde se repite el proceso completo de producción para obtener nuevamente el *yellow cake* para una nueva carga del reactor.

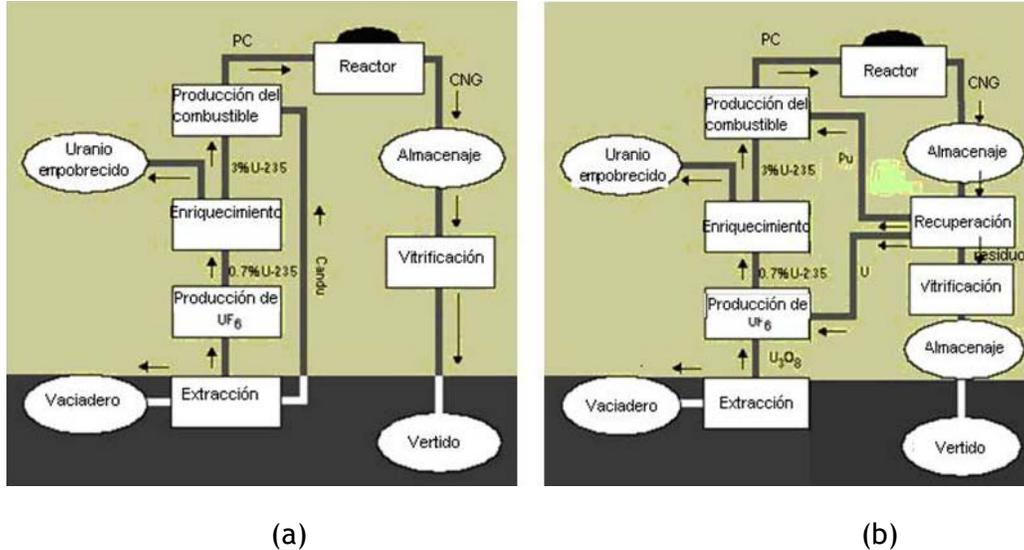


Figura 4.2 - Ciclo abierto del combustible nuclear (a) y Ciclo cerrado del combustible nuclear (b)

4.3. Industria internacional del Uranio

Las empresas encargadas de la producción de uranio enriquecido y del reprocesamiento del combustible nuclear gastado corresponden a aquellos países que tienen una industria nuclear desarrollada, tales como Estados Unidos, Francia, Gran Bretaña y Rusia. Las más conocidas de estas compañías son TVEL (Rusia), AREVA (Francia), el grupo americano-británico BNFL y la corporación americano-japonesa GNF.

Tabla 4.5 - Empresas exportadoras de uranio.⁸⁶

Empresa	Millones de Kg UTD	%
---------	--------------------	---

⁸⁶ Uranium 2001: Resources, Production and Demand, OECD, IAEA, August 2002.

USEC	6,0	16
Eurodif/Cogema	7,1	19
Urenco	3,9	10
Tenex	6,6	18
Otras empresas y venta por contratos	1,9	5
Necesidades, no suministradas por contratos	11,8	32
Total	37,3	100

Tabla 4.6 - Capacidad de producción de combustible, miles de t.⁸⁷

Reactores PWR		Reactores CANDU	
Bélgica	500	Argentina	160
Brasil	100	Canadá	2.700
China	100	India	300
Francia	1.100	Corea del Sur	400
Alemania	650	Rumania	150
India	30	Total.	3.710
Japón	1.689		
Pakistán	24	Reactores RBMK	
Rusia	2.300	Rusia	900
Corea del Sur	550		
España	300	Reactores AGR	

⁸⁷ Ídem 85 y elaboración propia de Rosatom y TVEL (<http://www.tvel.ru/en/corporation/>).

Suecia	400	Gran Bretaña	290
Gran Bretaña	330		
EE.UU.	3.900	Reactores MAGNOX	
TOTAL	11.973	Gran Bretaña	1.300
Capacidad total (todos los tipos de reactores)			18.173

La Corporación TVEL es un productor ruso que provee combustible nuclear a Rusia y a 76 centrales nucleares de diferentes países, lo cual corresponde al 17% del mercado mundial, incluidos Ucrania, Armenia, Lituania, Bulgaria, Hungría, Eslovaquia, República Checa, Finlandia y Francia. TVEL entrega también servicios de diseño, producción, licenciamiento y mantenimiento científico-técnico de sistemas de manejo de los desechos nucleares. Además, en el contexto de un acuerdo de cooperación con la compañía francesa Framatome, TVEL suministra combustible nuclear a reactores de Alemania, Suiza y Holanda.

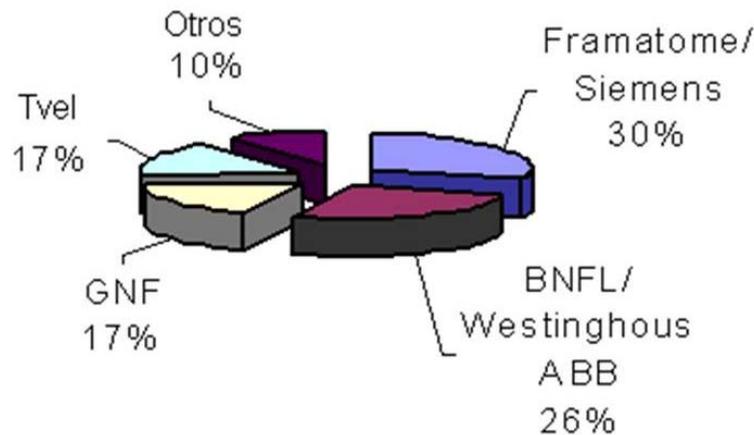


Figura 4.3 - Productores de combustible para Centrales Nucleares.

La compañía Framatome es el principal proveedor de combustible para reactores tipo PWR de Francia, Bélgica, Alemania, Suecia, Sudáfrica y la República Corea.

La compañía estadounidense Westinghouse Atom, además de suministrar el combustible a Estados Unidos, suministra el 60% del combustible utilizado por los reactores PWR de Suiza y

una cantidad limitada a otros países de Europa. En España el proveedor principal de combustible es la compañía ENUSA.

La mayor parte de las corporaciones que actúan hoy en el mercado del combustible nuclear están controladas por los respectivos gobiernos, en algunos casos directamente, como lo es BNFL de Gran Bretaña, ENUSA de España y TVEL de Rusia; y en otros indirectamente, a través del control accionario por parte de alguna empresa estatal, como es el caso de Framatome, cuyas las acciones pertenecen por una parte al gobierno de Francia y, por otra, a compañías como Cogema, Electricite de France y CEA-Industries.

La capacidad mundial total para el reprocesamiento de combustible nuclear gastado alcanza 5 mil toneladas al año. De éstas, más de la mitad se encuentra en Gran Bretaña y Francia, donde se realiza el reprocesamiento del combustible nuclear gastado según contratos con compañías energéticas de diversos países.

El costo del servicio de reprocesamiento del combustible nuclear gastado, realizado por Francia (Cogema), Gran Bretaña (BNFL) y Rusia (TVEL), es aproximadamente 1.000 dólares por un Kg, el cual tiene un valor similar al combustible original. Rusia actualmente reprocesa 200 toneladas al año y posee una capacidad instalada para duplicar esta cantidad.

Tabla 4.7 - Capacidad reprocesamiento de las plantas de combustible nuclear gastado y el pronóstico hasta el 2010 (miles de toneladas/año).

Central	Reactores por país	2000	2002	2005	2010
Gran Bretaña:					
Sellafield	GGR	1.500	1.500	1.500	1.500
Sellafield	LWR, AGR	1.200	1.200	1.200	1.200
Dunrey	FBR	10	10	10	10
Francia:					
Marcoule, UP1	GGR	600	-	-	-
M. Ar, UP2, UP3	LWR	1.600	1.600	1.600	1.600
Marcoule, APM	FBR	5	5	5	5
India:					
Tarapur	PHWR,	150	250	250	250

Central	Reactores por país	2000	2002	2005	2010
	reactores de investigación				
Trombey					
Kalpakkam					
Japón:					
Tokay	LWR	90	90	90	90
Rokkasho	LWR				800
Total		5.155	4.655	4.655	5.455
Entre ellos:	GGR	2.100	1.500	1.500	1.500
	LWR	2.890	2.890	2.890	3.690
	FBR	15	15	15	15

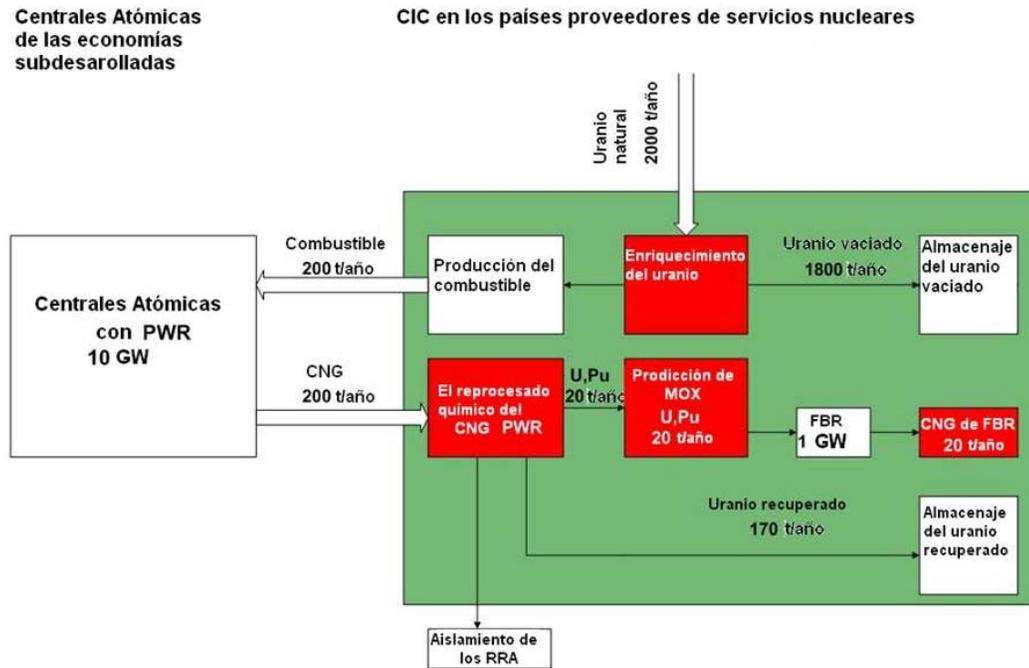


Figura 4.4 - Estructura principal y balance del flujo en el sistema con un Centro Internacional de Combustible.

4.4. Minerales alternativos al Uranio⁸⁸

En el año 2004 fueron dados a conocer los resultados del proyecto NERI (Nuclear Engineering Research Initiative), financiado por el Ministerio de Energía Nuclear de Estados Unidos, para investigar la efectividad del ciclo del combustible nuclear “once-through” (para un solo uso), basado en dióxido de torio y uranio ($\text{ThO}_2\text{-UO}_2$).

Las conclusiones de dicho estudio establecieron que el uso de este tipo de aleación ampliará el potencial de los recursos existentes, permitirá aumentar la resistencia del combustible nuclear y obtener formas más estables e insolubles de desechos, mejorando los indicadores técnico-económicos y el nivel de seguridad, así como el rendimiento del ciclo de combustible

⁸⁸ P. E. McDonald, Chan Bock Lee. Use of thorium-uran fuels in PWRs: a general review of a NERI project to assess feasible core designs, economics, fabrication methods, in-pile thermal/mechanical behavior, and waste form characteristics//Nucl. Technol., 2004, vol.147 No.1, p.1-7.

Las mezclas homogéneas de $\text{ThO}_2\text{-UO}_2$ son relativamente baratas. Los cálculos de uso de torio para quemar el plutonio en el reactor -cargado con combustible de torio y plutonio-, mostraron que se puede utilizarlo sin riesgo.

No hay obstáculos para la modificación de las centrales nucleares actualmente en funcionamiento con UO_2 para adecuarlas a la mezcla $\text{ThO}_2\text{-UO}_2$. Se han ampliado una serie de códigos de cálculos para el combustible, basado en ThO_2 . Según esto, las características termomecánicas, dinámicas y de explotación del combustible homogéneo $\text{ThO}_2\text{-PuO}_2$ superan a las del combustible de uranio respecto a la seguridad. Los parámetros cinéticos del reactor basado en $\text{ThO}_2\text{-PuO}_2$ determinan una capacidad más alta del reactor en el estado transitorio durante algunos accidentes de proyecto, pero en general, el factor de seguridad para el combustible $\text{ThO}_2\text{-PuO}_2$ es igual o superior al del combustible de uranio.

El torio como combustible para los reactores nucleares posee una serie de ventajas en comparación con el uranio, gracias a las diferencias en sus características y a su mayor difusión en la naturaleza. Las reservas del torio en la litosfera y la corteza terrestre son tres veces mayores en comparación con el uranio.

El torio natural consiste en un solo isótopo ^{232}Th con el período de vida media $T_{1/2} = 1,39 \times 10^{10}$ años. El contenido del ^{228}Th que está en equilibrio con él, es inapreciablemente pequeño - $1,37 \times 10^{-8}\%$. Se extrae, principalmente del concentrado de monacito, en donde está contenido en forma de fosfato y tiene un bajo nivel de toxicidad.

El ^{232}Th está sometido a la fisión nuclear bajo la influencia de los neutrones rápidos y puede utilizarse como el material de recuperación para obtener el uranio ^{233}U . El ciclo del combustible nuclear de torio, a diferencia del de uranio, no conlleva la generación del plutonio y se diferencia por la menor cantidad de desechos radioactivos peligrosos.

Según la evaluación de especialistas de Rusia y de los Estados Unidos los yacimientos de torio alcanzarán para 500-600 años del desarrollo de la industria nuclear mundial.

Como se menciona en el capítulo 2.2.2, el torio es una fuente energética de gran atractivo por la densidad de energía contenida en dicho recurso. El peligro potencial de contaminar el aire, el agua y la tierra es mucho menor con el torio que con el uranio. En general, la formación de desechos es mucho menor y de más fácil eliminación cuando se usa el torio.

Los reactores pequeños de torio sirven para las turbinas de vapor y el vapor también puede ser utilizado en los procesos como la desalinización y purificación del agua, y además para la síntesis del hidrógeno.

Los reactores que trabajan con ^{235}U en combinación con ^{232}Th producen ^{233}U fisionable, que puede ser separado con el reprocesamiento químico del combustible descargado. El ^{233}U sirve para el uso reiterado o en los mismos reactores o en los reactores con $^{233}\text{U} - ^{232}\text{Th}$. La generación de ^{233}U debe iniciarse a partir de los combustibles U^{235} , U^{238} y U^{232}Th , y como este combustible contiene U^{238} , junto con éste se producirá el plutonio. La formación de plutonio puede limitarse a través de la disminución del U^{238} , lo que se observa cuando se utiliza el uranio enriquecido con 93% de U^{235} .

Al igual que el combustible producido con plutonio, el combustible basado en U^{233} contiene otros núclidos de uranio, que aparecen como resultado de la captura radioactiva de neutrones. La composición isotópica de tal combustible, depende del tipo de reactor y de la profundidad de quemado del combustible. El ^{235}U quemado se compensa por la adición de uranio enriquecido. El combustible producido de esta manera se carga de nuevo en el reactor. Con esto, el contenido de ^{233}U alcanza el enriquecimiento dentro de 3-4 ciclos. Después del período de uso del combustible por 3 años, el combustible es descargado y se reprocesa. El contenido de núclidos, que absorben de forma no productiva los neutrones de ^{234}U y ^{236}U sigue creciendo hasta después de 15 ciclos. El consumo del uranio natural durante 30 años de explotación del reactor LWR con el combustible U-Th se evalúa en 2.100 t.

Con el uso del ciclo cerrado en el reactor HWR con uranio enriquecido, la necesidad de uranio natural durante 30 años de explotación del reactor constituye tan sólo 1500 ton. El suministro anual de ^{235}U resulta 129 Kg. Con la operación del reactor HWR con combustible enriquecido $^{233}\text{U}-\text{Th}$, el suministro de ^{233}U anual es 106 Kg. Este reactor requiere 1859 Kg de ^{233}U para la carga inicial. Esta cantidad, igual al suministro anual, debe ser producida en otros reactores que consumen el ^{235}U del uranio natural. En el reactor de alta temperatura HTR con la carga de combustible esférico y en el reactor de alta temperatura HTGR la demanda de uranio natural puede ser reducida aún más en particular si se usa combustible U-Th con uranio enriquecido.

4.5. Aspectos de la no proliferación de materiales nucleares

Un aspecto a considerar en la industria nuclear es el eventual uso indebido de materiales para la construcción de armas nucleares. Ya se ha visto que en los reactores tradicionales se forma plutonio, lo que constituye un peligro desde este punto de vista.

La no proliferación de materiales nucleares constituye unas de las exigencias para el cumplimiento de la Convención del OIEA sobre el adecuado uso de las tecnologías nucleares. A partir de esta Convención se solucionan a nivel internacional aquellos aspectos

correspondientes a la contratación del combustible nuclear fresco y al reciclaje del combustible gastado, mediante la adopción de adecuadas medidas de seguridad que impidan el mal uso de la tecnología durante estos procedimientos comerciales.

Con el uso de reactores de neutrones térmicos (RNT) y a neutrones rápidos (RNR) puede obtenerse el mejoramiento de los indicadores binarios de la energía atómica, a partir de las diferencias entre los dos tipos de reactores. Gracias al balance positivo de los neutrones, los reactores a neutrones rápidos pueden abastecer la reproducción ampliada del combustible secundario y suministrarlos a los reactores de neutrones térmicos. Por otro lado, los reactores a neutrones rápidos son capaces de quemar el combustible nuclear hasta los productos de fisión, que es muy importante desde el punto de vista ecológico y de la no proliferación de materiales peligrosos.

Se abre con esto la posibilidad de ampliar la economía del uranio natural y disminución de la cantidad y radiotoxicidad de los materiales fisionables. El reciclaje “once through” del plutonio en algunos países de Europa Occidental no permite disminuir considerablemente las necesidades en uranio natural y la cantidad de combustible gastado. En cambio el uso de reactores nucleares rápidos puede resolver estas dos tareas.

El ciclo cerrado del combustible con reactores VVER y a neutrones rápidos permite disminuir la acumulación de plutonio en el sistema. Al mismo tiempo, el reciclaje repetido de plutonio en el VVER lleva a la acumulación de los actínidos menores (4 Kg Np, 207 Kg Am, 47 Kg Cm al año). En cambio en los reactores a neutrones rápidos y a neutrones térmicos en línea se queman todos los actínidos menores, excepto las pérdidas durante el reprocesamiento. Este hecho influye considerablemente en la radiotoxicidad final de los desechos.

La búsqueda de soluciones eficaces para el “requemado” de los núclidos peligrosos del combustible en los reactores a neutrones rápidos, se unió a la necesidad del análisis físico detallado de la variación de las características del combustible nuclear y de los límites temporales en su salida al estado de equilibrio en las condiciones de gestión del combustible nuclear. Durante la investigación para la optimización de las características del ciclo del combustible vinculado con los reactores a neutrones rápidos y a neutrones térmicos, se examinaron los resultados obtenidos en los aspectos relacionados con la posibilidad de la economía del combustible de uranio, la disminución de la producción del plutonio, actínidos menores y a la radiotoxicidad de los desechos. El ejemplo presentado muestra, en cierto grado, las posibilidades del sistema binario con relación a la solución de estos problemas.

4.6. 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, 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 4.5). 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 4.6 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.



Maquina de recarga de combustible fresco y gastado



Plataforma de recarga del combustible nuclear

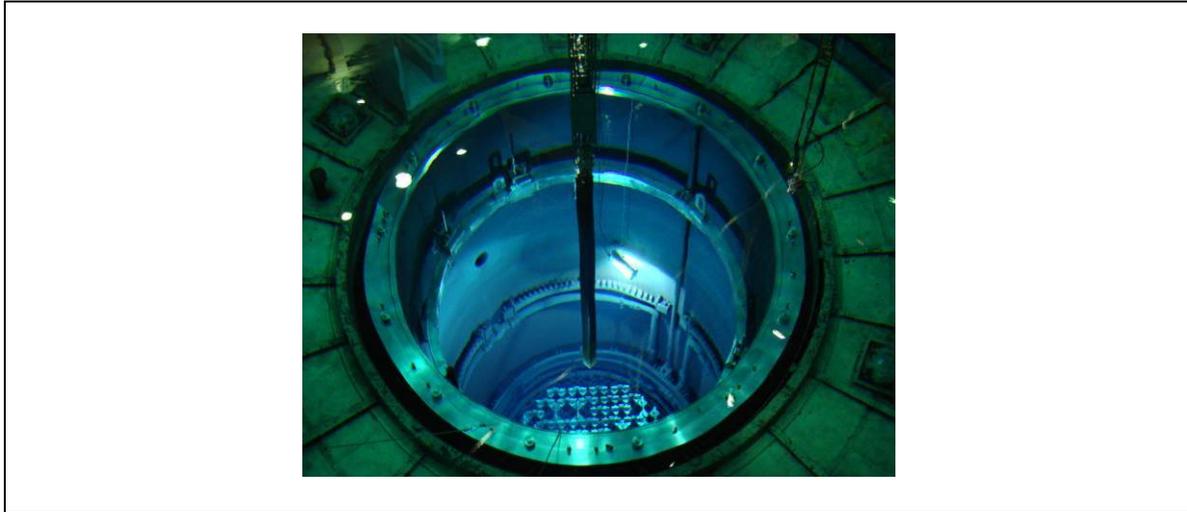


Figura 4.5 - Máquina de recarga, plataforma de recarga del combustible nuclear y vasija de reactor en recarga de la central nuclear Santa María de Garoña en España.

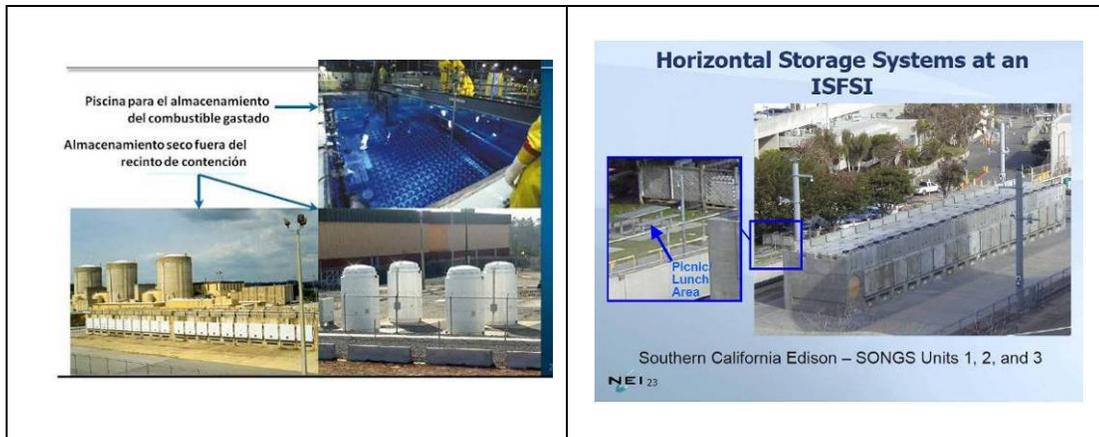




Figura 4.6. - Piscina de almacenamiento del combustible gastado en el recinto de contención de la central nuclear y su almacenamiento en seco en el emplazamiento de la central nuclear. Nótese, en la imagen superior derecha, la cercanía del área para el almuerzo de los trabajadores de los silos de almacenamiento 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 ciclo de combustible nuclear involucra también el transporte (ver Figura 4.8), a veces a largas distancias, de sustancias radioactivas. 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 4.7), 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. 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, en la actualidad, cada contenedor posee un emisor satelital que permite que sea rastreado en todo momento.

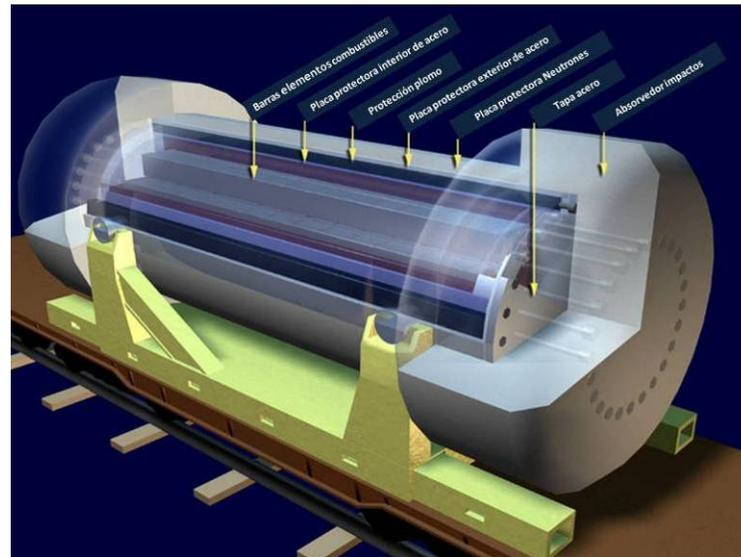


Figura 4.7 - Esquema del contenedor para transportación elementos combustibles gastados.



Figura 4.8 - 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 4.9 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.



Figura 4.9 - 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.

Conclusiones

Según el análisis del estado actual de la industria nuclear, al uso que se le da al uranio enriquecido y a los recursos disponibles en el planeta, se puede deducir, que para un plazo no superior a 100 años, no existe riesgo de limitación del crecimiento y mantenimiento de la actual producción de energía nuclear, por causa de insuficiencia de recursos de combustible.

El mercado mundial del combustible nuclear para las centrales y los reactores de investigación se ha desarrollado en forma estable. Durante los 50 años que tiene la industria nuclear no hubo ni un caso de interrupción en el suministro del combustible, vinculado con la insuficiencia de recursos.

En algunos países las leyes antimonopólicas han facilitado la competencia de los productores de combustible, permitiendo que una misma central nuclear utilice combustibles de diferentes proveedores. Esto ha significado un importante estímulo para mejorar y hacer más eficiente el ciclo de producción del combustible, también para obtener mejores métodos de reciclaje y aplicaciones de mejoras en los sistemas de seguridad del transporte. Por ejemplo, está planeado para la Central Nuclear de Temelin sustituir el combustible de Westinghouse por el de TVEL. En Ucrania se está considerado sustituir el combustible de TVEL por el de Westinghouse.

Algunos países tales como Rusia, India y Japón que desarrollan su propia industria nuclear pero poseen reservas limitadas de recursos de uranio, están buscando métodos alternativos para abastecerse de combustible nuclear. Las alternativas más importantes son la adopción del ciclo cerrado de combustible y reactores a neutrones rápidos, la elaboración del ciclo de combustible del torio y la también utilización de combustible nuclear proveniente de armas nucleares.

En la actualidad, Rusia posee más de 50 años de experiencia con reactores nucleares para la producción de la energía eléctrica y para la desalinización del agua. Está actualmente trabajando en varios proyectos científicos para mejorar esta tecnología, para lo cual ha direccionado sus investigaciones especialmente en la línea de los reactores a neutrones rápidos y al uso del torio en el ciclo del combustible.

La tendencia de las actuales centrales nucleares, especialmente los tipos PWR y VVER, es devolver el combustible gastado al proveedor para su reprocesamiento, lo que resuelve en gran medida el problema de la gestión posterior de este material. No existen antecedentes de

rechazo por parte proveedor de los acuerdos suscritos de reprocesar los desechos, por cuanto es un buen negocio para él. Por lo tanto es una posibilidad que se da por descartada.

Asimismo, hasta hoy no hay ni un solo caso de interrupción de suministro de combustible, incluyendo problemas políticos y económicos. El riesgo de interrupción por causas geopolíticas es poco probable, por cuanto el suministro de combustible se planifica con antelación para excluir este riesgo. Además entre carga y recarga del combustible en el reactor, los plazos al ser altos (1 a 3 años, dependiendo del modelo) permitirán encontrar siempre una solución a este tema.

En el mercado del combustible nuclear existe una sana competencia entre los productores y. en muchos casos, una asociación estratégica entre los mismos, todo esto para dar un mejor servicio y minimizar los riesgos de transporte y manipulación del producto.

El riesgo durante el transporte es muy bajo, lo ha demostrado la estadística. En cambio los riesgos de gestión de los desechos radioactivos, especialmente los del combustible gastado, son evidentemente mayores, pero se pueden minimizar si se cumplen los protocolos de seguridad que existen para estas operaciones en las centrales nucleares en operación.

Bibliografía

- 4.1.- Nuclear News, 2001, v. 44, No 12, pp.64-65.
- 4.2.- Uranium 2001, Resources, Production and Demand. Paris: OECD/NEA - IAEA, 2002.
- 4.3.- Ciclo de combustible nuclear en 2001-2002. Ministerio de la energía atómica. 2002.
- 4.4.- World Nuclear Association, Newsletter. Jan/Feb/ 2003.
- 4.5.- The Global Nuclear Market, Supply and Demand 2003-2005. World Nuclear Association.
- 4.6.- La lista Roja de uranio. OECD. 2005.
- 4.7.- Torio, sus recursos de materia prima, química y tecnología, Moscú. 1960.
- 4.8.- Zélikman A. N., La metalurgia de metales del grupo de las tierras raras, del torio y uranio. Moscú. 1961.
- 4.9.- Emelianov V. S., Evstiukhin A. I., La metalurgia del combustible nuclear. Moscú. 1968.
- 4.10.- Seaborg G. T., Cats J., Química de los elementos actínidos, trad. del inglés. Moscú. 1960.
- 4.11.- Bowen H. J. M., Trace elements in biochemistry. L.-N.Y. 1966.
- 4.12.- Andrew Picford. Caminos del desarrollo de la energía australiana. Informe del Centro de análisis estratégico (Future Directions International). 6.10.2005. Pert, Australia.
- 4.13.- Rusia en la política global. № 4. Estrategia atómica. Julio - Agosto. 2006
- 4.14.- ¿Habrà más torio? Dinero. AtomInfo. Ru. 03.08.2007.
- 4.15.- India no rechazará el torio. AtomInfo. Ru 25.09.2008.

- 4.16.- El primer AHWR-300 de torio puede ser construido al lado de Mumbai. AtomInfo. Ru. 28.04.2008
- 4.17.- India y Sri-Lanca pueden colaborar en la energética del torio. AtomInfo. Ru 16.10.2008
- 4.18.- Anil Cacodcar, Evolución del programa nuclear de India - bases y perspectivas. AtomInfo. Ru 20.01.09
- 4.19.- India empezará a construir el reactor de torio no más tarde que dentro de 1 año. AtomInfo. Ru 20.10.2008
- 4.20.- A. N. Prasad: el contratado con Estados Unidos hundió a la India a la dependencia del uranio. AtomInfo. Ru 20.01.2009
- 4.21.- Cacodcar: torio es el mejor remedio contra el plutonio. AtomInfo. Ru 20.01.2009
- 4.22.- Reactor AHWR - el primer paso de la India hacia la energía de torio. AtomInfo. Ru 20.01.2009
- 4.23.- India celebra la puesta en marcha del reactor de investigación de torio. AtomInfo. Ru 20.01.2009
- 4.24.- El primer comprador de la tecnología del torio será el país-novicio. AtomInfo. Ru 20.01.2009
- 4.25.- India - el estatus actual de la energética del torio. AtomInfo. Ru 20.01.2009
- 4.26.- La compañía de Estados Unidos ofrece a India los reactores de torio, que no requieren el tratamiento químico del CNG y capaces de garantizar la independencia energética de India. AtomInfo. Ru 20.01.2009
- 4.27.- U. I. Koriakin. Las cercanías de la energía atómica rusa: nuevo desafíos. Moscú.: Editorial GUP NIKIET. 2002.
- 4.28.- Lista blanca de la energética nuclear. Bajo la redacción de E. O. Adamov. Moscú.: Editorial GUP NIKIET. 2001.

- 4.29.- Uranium 1999: Resources, Production and Demand. NEA, OECD-IAEA. 199. 340 p.
- 4.30.- N. I. Ermakov et al. Some aspects of Nuclear Power Development in Russia and Studies of its Optimal Long-Term Structure. International Symposium on Nuclear Fuel Cycle and Reactor Strategy. Key Issue Papers. Vienna, Austria. 3-6 June, 1997. P.65-76.
- 4.31.- N. Chebeskov et al. Some Scenarios for Possible Development and Structure of Nuclear Power in Russia. International Conference - Global`97, Jokohama, Japan. 5-10 October, 1997. P.112-117.
- 4.32.- Política energética de la FR: Revisión. París: OIEA. 1996.
- 4.33.- Programa del desarrollo de la energía de la FR en 1998-2005 Y la perspectiva hasta 2010 Moscú.: ICIC de dirección, economía e información. 1977.: Revisión. París: OIEA. 1996.
- 4.34.- International Symposium on Nuclear Fuel Cycle and Reactor Strategy: Adjusting to New Realities. Key Issue Papers. Vienna, Austria. 3-6 June 1997.
- 4.35.- La eficacia de la energía nuclear: criterios del sistema de la dirección del desarrollo /V. I. Rachkov. Moscú.: FGUPCNIIATOMINFORM. 2008.
- 4.36.- M. Haissinsky, J. P. Adloff. Radiochemical Survey of the Elements. Principal Characteristics and Applications of the Elements and their Isotops. Elsevier Publ. Amst.-London-NY. 1965.
- 4.37.- P. E. McDonald, Chan Bock Lee. Use of thorium-uran fuels in PWRs: a general review of a NERI project to assess feasible core designs, economics, fabrication methods, in-pile thermal/mechanical behavior, and waste form characteristics/Nucl. Technol., 2004, vol.147 No.1, p.1-7.
- 4.38.- Torio, sus recursos de materia prima, química y tecnología, Moscú., 1960.
- 4.39.- Zélikman A. N., La metalurgia de metales del grupo de las tierras raras, del torio y uranio. Moscú, 1961.
- 4.40.- Emilianov V. C. y Yevstiuk A. I., Metalurgia Nuclear 2da edición, 1968.

- 4.41.- Seaborg G. T., Cats J., Química de los elementos actínidos, trad. del inglés. Moscú, 1960.
- 4.42.- Bowen H. J. M., Trace elements in biochemistry, L.—N. Y., 1966.
- 4.43.- Andrew Picford. Caminos del desarrollo de la energía australiana. Informe del Centro de análisis estratégico (Future Directions International). 6.10.2005. Pert, Australia.
- 4.44.- International Symposium on Nuclear Fuel Cycle and Reactor Strategy: Adjusting to New Realities. Key Issue Papers. Vienna, Austria. 3-6 June 1997.

Capítulo 5

Autoridad Reguladora Nuclear Nacional

5.1. La Autoridad Reguladora Nuclear Nacional^{89, 90}

Un elemento fundamental para el correcto control de todo lo relacionado a la industria nuclear en un país, es el establecimiento de un marco jurídico adecuado que permita el funcionamiento de esta industria así como la creación y el mantenimiento de una Autoridad Reguladora Nuclear Nacional, llamada a ejercer un estricto control sobre el sector. Solo de esta forma se puede lograr una adecuada competencia legal y técnica, requisito indispensable para velar por que los operadores de instalaciones nucleares y los usuarios de sus materiales y desechos lleven a cabo sus actividades con la debida seguridad tecnológica y física.

La Autoridad Reguladora debe estructurarse de forma tal que pueda desempeñar sus funciones con independencia, manteniendo una estructura y un tamaño adecuado a la extensión y naturaleza de las instalaciones y actividades sobre las cuales debe actuar. Asimismo, es importante asegurar que esta disponga de recursos suficientes, tales como personal capacitado, recursos económicos, instalaciones apropiadas, acceso a tecnologías de la información y servicios de apoyo, entre otros. Una Autoridad Reguladora puede en determinados casos no ser autosuficiente, especialmente en materia técnica, para desempeñar algunas funciones de revisión y evaluación, concesión de licencias, e inspección. En ese caso las normas deben facultar al organismo para contar con asesoría o asistencia externa, asegurando que quienes la proporcionan sean efectivamente independientes del operador o titular de la licencia. Hay que subrayar que este apoyo externo no releva a la Autoridad Reguladora de su responsabilidad sobre las decisiones que se adopten. Esta situación de solicitar eventualmente asesoría externa, se da especialmente en aquellos países que recién optan por la opción nuclear cuando la Autoridad Reguladora aún no tiene la suficiente experiencia para licenciar los proyectos nucleares presentados. También se da en aquellos países que requieren licenciar un modelo de reactor desconocido

⁸⁹ Este capítulo se desarrolla para cumplir con los requerimientos del mandante establecidos en Términos de Referencia, en particular, al requerimiento de analizar la institucionalidad e infraestructura y los costos de ella, de acuerdo a la experiencia aportada por el equipo de profesionales rusos.

⁹⁰ Legal and Gubernamental Infrastructure for Nuclear, Radiation, Radioactive Waste and Transport Safety, Safety Requirements, Safety Standards Series No. GS-R-1, IAEA, 2000.

para los especialistas de la Autoridad Reguladora, el cual seguramente fue importado de otro país.

La importancia del concepto de independencia de la Autoridad Reguladora está reconocida en documentos como la Convención sobre Seguridad Nuclear de Naciones Unidas, que establece la necesidad de que cada Estado disponga de las medidas adecuadas para velar por una separación efectiva entre las funciones reguladoras de la Autoridad y las de cualquier otro órgano o entidad que se dedique a la promoción o la utilización de la energía nuclear, incluyendo actividades como la gestión de combustible gastado y de residuos radiactivos. Dos elementos cruciales para asegurar esa independencia de la Autoridad Reguladora son la capacidad técnica y los recursos económicos. Una organización encargada de tomar decisiones técnicas complejas debe disponer de expertos capaces de tomarlas por sí mismos o de evaluar las recomendaciones de otros. Por su parte, los recursos económicos deben ser adecuados y seguros.

Las principales funciones de la Autoridad Reguladora son: establecer los requisitos mínimos de desempeño de los emprendimientos nucleares, evaluar y licenciar los proyectos propuestos, inspeccionar y verificar el desempeño de los proyectos nucleares aprobados y sancionar las eventuales desviaciones o faltas al desempeño previsto. En función de ello la consideración principal al establecer una Autoridad Reguladora es que ésta posea los atributos necesarios para aplicar correctamente las leyes y reglamentos nacionales destinados a cumplir esas funciones, con miras a garantizar la protección de la población, el ambiente y los bienes.

Las funciones que debe desempeñar la Autoridad Reguladora se pueden agrupar en cuatro categorías, tal como están referidas en la Convención sobre Seguridad Nuclear ya mencionada y en la Convención Conjunta. Estas son: Reglamentación, Concesión de licencias, Fiscalización y Coerción. Existe una quinta categoría a la que no se refieren las convenciones mencionadas, pero que la mayoría de los organismos reguladores internacionales consideran esencial, que es la información al público en general y a las partes interesadas sobre actividades reguladas por la Autoridad Reguladora.

La primera categoría de funciones de la Autoridad Reguladora es asegurar que se establezcan los requisitos y las disposiciones nacionales aplicables en materia de seguridad, así como fijar los principios y criterios de seguridad, reglamentos y guías.

El segundo grupo de funciones incluye conceder, modificar, suspender y revocar las licencias y establecer las condiciones de su concesión. Estas funciones son requeridas también en la aplicación de la Convención sobre Seguridad Nuclear y de la Convención Conjunta referidas, las que prohíben explotar instalaciones nucleares o de gestión de

residuos radiactivos sin contar con la autorización correspondiente por la Autoridad Nacional Reguladora Nuclear.

En el marco de la tercera categoría, la Autoridad Reguladora debe llevar a cabo inspecciones para asegurar que la salud pública, el ambiente y los bienes estén debidamente protegidos y la seguridad tecnológica, garantizada. Para ello, requiere tener acceso irrestricto a los emplazamientos y las instalaciones donde se utilice tecnología y materiales nucleares, así como la capacidad para exigir de los operadores toda la información necesaria y que realicen las evaluaciones, reevaluaciones y revisiones periódicas de seguridad durante la vida útil de las instalaciones. Además, la Autoridad Reguladora podrá iniciar una serie de actividades ciertamente importantes, tales como llevar a cabo monitoreos radiológicos ambientales de carácter independiente, dentro y en los alrededores de una central, realizar pruebas y medidas de control de calidad, asegurar el monitoreo del personal, exámenes médicos y monitoreos en el área de no proliferación nuclear, entre otros.

El cuarto grupo de funciones apunta a asegurar el cumplimiento de las disposiciones aplicables y de lo estipulado en las licencias. La Autoridad Reguladora debe tener la capacidad para imponer multas y sanciones -como suspensión, modificación o revocación de las licencias- ante eventuales incumplimientos.

El quinto grupo de funciones de la Autoridad Reguladora prevé que ésta debe tener programas destinados a suministrar información sobre cuestiones y actividades que afectan la seguridad nuclear y radiológica a las partes interesadas. El público en general, los medios de comunicación, el Parlamento y el gobierno local correspondiente, entre otros, deberán recibir información especialmente preparada para su adecuada comprensión. La confianza pública en el uso seguro de materiales y técnicas nucleares está íntimamente relacionada con que la Autoridad Reguladora haga una divulgación rápida, apropiada, precisa y completa de la información. Asimismo, a nivel nacional hay muchos otros sectores interesados a quienes se debe incorporar al proceso de toma de decisiones.

Dado que producción de energía nuclear se ha convertido en una actividad mundial, la Autoridad Reguladora Nuclear Nacional debe estar en estrecho contacto y coordinada con organizaciones idénticas de otros países. Es importante estar consciente de ello, no sólo por los posibles efectos transfronterizos en materia de salud, seguridad tecnológica y medioambiente en caso de averías, sino también porque la mayoría de las actividades nucleares tienen facetas técnicas y comerciales internacionales (adquisiciones, compra de combustible, uso de tecnología de origen foráneo, etc.). Estos contactos con las organizaciones internacionales sirven para promover la cooperación y el intercambio de información en materia de regulación.

5.2. El marco jurídico nacional

Cada país debe establecer el marco jurídico aplicable a la ejecución de actividades relacionadas con la energía nuclear, con el objetivo de proteger adecuadamente a las personas, los bienes y el medioambiente. Particularmente, debe dotar a la Autoridad Reguladora de la capacidad para ejercer las funciones ya descritas. Obviamente, las normas que se aplican a las actividades nucleares se insertan en el ordenamiento jurídico de cada uno de los países, por lo que requieren compatibilidad con éste.

Una característica esencial de las normas jurídicas sobre energía nuclear es que prestan atención al concepto de riesgo-beneficio derivado del uso de dicha tecnología.

Dependiendo de las actividades nucleares que cada país decida autorizar, el uso de la tecnología nuclear puede suponer la aplicación de gran cantidad de leyes relacionadas con otras materias, tales como protección ambiental, seguridad e higiene laboral, planificación del uso de la tierra, procedimientos administrativos del Estado, la minería, el transporte, exportación e importación de materiales y dispositivos nucleares, la ética pública y la regulación de las tarifas eléctricas, etc.

La no existencia de este marco jurídico para la actividad nuclear provoca un impacto negativo para el desarrollo de esta actividad, lo que se refleja de forma indirecta en una barrera para la industria nuclear ante la imposibilidad de desarrollar inversiones en este sector, no por un tema de rentabilidad sino por falta de la regulación correspondiente por lo que se le puede asociar un riesgo que para el inversionista es percibido como infinito.

Sin en el marco jurídico adecuado y maduro no es posible el desarrollo de un programa nucleoelectrica pues no se contarían con las regulaciones y exigencias que son necesarias tener para garantizar un desarrollo seguro y confiable de esta actividad tanto para el medioambiente como para la población, el papel del Estado y sus instituciones en la fiscalización y control de esta actividad, así como las responsabilidades que se adquieren tanto por el operador de la central nuclear y el propio Estado a nivel nacional e internacional de acuerdo con las regulaciones existentes en esta materia. ***Su no existencia constituye una barrera para el desarrollo de un programa para la generación de electricidad de origen nuclear, ya que no posibilita la propuesta de inversiones en este sector tan importante para el desarrollo de cualquier país.***

5.2.1. Principio de seguridad tecnológica

La seguridad tecnológica es el requisito prioritario en el uso de la energía nuclear. El objetivo fundamental de todo régimen regulador es lograr el equilibrio entre los riesgos y las ventajas sociales. Al aplicar estos conceptos interrelacionados y superpuestos de seguridad tecnológica siempre es importante centrarse en el requisito esencial de que tanto los riesgos como las ventajas de la energía nuclear se comprendan y tengan en cuenta debidamente, a fin de alcanzar un equilibrio razonable en la formulación de las medidas legales o reguladoras.

Basado precisamente en este principio, es que se establecen leyes, reglamentos y normas que deben satisfacer cualquier instalación nuclear o radioactiva⁹¹ que se pretenda poner en operación en un país. En el caso particular de las centrales nucleares, el proceso de licenciamiento al que se somete cualquier instalación de este tipo está sustentado en este principio y constituye la base fundamental para la garantía de la seguridad nuclear en todas las etapas de su desarrollo. Este proceso se explicara en la sección 5.2.4 de este capítulo.

Un ejemplo práctico de ello se puede apreciar el sistema de refrigeración de emergencia que tiene la central nuclear (ver Figura 5.1). 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).

⁹¹ Según la Ley de Seguridad Nuclear (Ley No. 18302 del 2 de Mayo de 1984) en su artículo 3 inciso 9 y 10 son instalaciones nucleares: a) Los reactores nucleares, salvo los que se utilicen como fuente de energía en un medio de transporte, tanto para su propulsión como para otros fines; b) Las fábricas que utilicen combustible nucleares para producir sustancias nucleares y las fábricas en que se proceda al tratamiento de sustancias nucleares, incluidas las instalaciones de reprocesamiento de combustibles nucleares irradiados y c) Los depósitos de almacenamiento permanente de sustancias nucleares o radiactivas, excepto los lugares en que dichas sustancias se almacenen incidentalmente durante su transporte. Son instalaciones radioactivas aquellas en que se produzcan, traten, manipule, almacén i utilicen materiales radioactivos o equipos que generen radiaciones ionizantes.

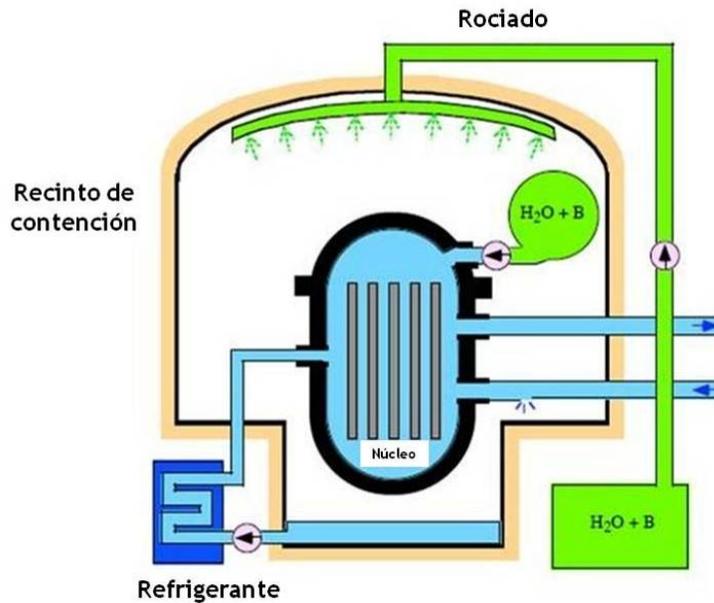


Figura 5.1. - Esquema del Sistema Refrigeración de Emergencia.

5.2.2. Principio de seguridad física

Tanto los materiales como la misma tecnología nuclear, por errores humanos, o por encauzarse hacia fines no pacíficos, son en potencia extremadamente peligrosos, por lo que se requieren medidas jurídicas especiales para impedir que esto ocurra, tanto accidental como intencionadamente.

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.

Por otro lado, (ver Figura 3.2 y 5.1) el diseño del recinto de contención soporta el impacto de una onda de choque de 30 KPa y el choque de un avión con un peso de 20 t a una velocidad de 2000 m/s.

La Convención sobre la Protección Física de Materiales Nucleares y su Enmienda que se verá adelante constituye un instrumento importante para la fiscalización y el control de los materiales nucleares. Esta Convención se encuentra en vigor en Chile desde el 23 de Febrero de 1990.

Adicionalmente la protección física se garantiza a nivel de cada país y en ella se pueden involucrar las instituciones establecidas para ello como lo son las Fuerzas Armadas y el Ministerio de Interior entre otros que de conjunto con la entidad explotadora de la central garantizaran la protección física de las instalaciones no solo en contra del desvío de materiales y equipos con destino a la proliferación nuclear u otros usos sino también en contra de actos terroristas.

5.2.3. Principio de responsabilidad

La entidad responsable en cumplir con los requisitos exigibles en materia de salud, seguridad tecnológica y física y protección del ambiente es el operador o titular de la licencia para llevar a cabo actividades específicas relacionadas con la energía nuclear. Sin perjuicio de ello, el uso de la energía nuclear implica normalmente el involucramiento de diversas organizaciones, además de la Autoridad Reguladora: constructoras, financieras, industriales, entre otras. Hay que tener claro que el operador de la instalación nuclear es el único responsable de un eventual daño nuclear. No puede hacerse responsable a ninguna otra persona u organización ni eximir la responsabilidad al operador en virtud de otras disposiciones legales (por ejemplo, las normas sobre responsabilidad civil). La responsabilidad siempre será del operador de la instalación nuclear. Este concepto es un elemento básico del derecho de responsabilidad nuclear y a veces desconocido en otras ramas del derecho.

Más adelante se señalarán los diferentes instrumentos internacionales que regulan este principio y que sirven de marco para que los países que desarrollen un programa de generación nuclear las incluyan en su legislación.

El otorgamiento de licencias en las diferentes etapas de un Programa de Generación Nuclear refleja este principio al responsabilizarse la entidad explotadora con el cumplimiento de lo establecido en cada una de ellas. La Convención sobre la de Responsabilidad Civil por Daño

Nuclear es otro ejemplo de este principio, la cual fue ratificada por Chile el 23 de Noviembre de 1989 y se encuentra en vigor desde el 23 de Febrero de 1990 y constituye la base para la solución jurídica adecuada para tratar los riesgos nucleares y la responsabilidad del Estado y la entidad explotadora ante ellos.

5.2.4. Principio de autorización

Teniendo en cuenta los riesgos de la tecnología nuclear, el derecho exige siempre la autorización previa (conocida como licencia) de las actividades que impliquen el uso de materiales fisionables y radioisótopos. La ley determina claramente las actividades o instalaciones que requieren de esta autorización. También debe tenerse en cuenta que la autorización de esta actividad puede tener repercusiones prácticas y jurídicas en terceros.

Este principio está relacionado con el proceso de licenciamiento bajo el cual se desarrolla un Programa de Generación de Nuclear, incluyendo además la autorización que se debe recibir al entregar la evaluación de impacto ambiental establecida por la autoridad correspondiente de medioambiente (en Chile la CONAMA⁹²). Este proceso hace que la generación nuclear este constantemente bajo el control de la Autoridad Reguladora Nuclear con el fin de garantizar la seguridad nuclear a la instalación y por tanto la protección del medioambiente y la población.

Aunque la Comisión Chilena de Energía Nuclear, Autoridad Reguladora por ley⁹³, es la encargada de otorgar estas licencias el reglamento que regule este proceso no ha sido elaborado para el caso de las instalaciones nucleares. Este hecho en particular, puede impactar negativamente a la posibilidad de incluir inversiones de este tipo en sector eléctrico con el objetivo de diversificar su matriz energética. Sin embargo, la posibilidad está totalmente concebida dentro del desarrollo de la mencionada ley.

5.2.5. Principio de control

Después de concedida la licencia de operación para realizar las actividades solicitadas, el organismo regulador de cada país debe poseer la facultad de controlar permanentemente al operador autorizado a fin de asegurarse de que esas actividades se ejecutan de manera tecnológica y físicamente seguras y de acuerdo con las condiciones en que fue concedida la

⁹² Comisión Nacional para el Medioambiente.

⁹³ Según la Ley Seguridad Nuclear (Ley No. 18302 del 2 de Mayo del 1984) en su título primero.

licencia. Este principio implica que la legislación nuclear nacional debe garantizar el libre acceso de los inspectores del organismo regulador a todo lugar donde se utilicen y almacenen materiales nucleares.

Este es un principio que se recoge en la Ley de Seguridad Nuclear vigente en Chile y que le permite a la Autoridad Reguladora efectuar las inspecciones correspondientes y detener el desarrollo de los trabajos si se detecta incumplimiento de la licencia otorgada. Garantiza en principio, que la instalación se construya y opere de forma segura y confiable.

5.2.6. Principio de indemnización

Las medidas preventivas no pueden excluir la posibilidad de que se produzcan daños a las personas, los bienes o al medioambiente. Por ello, el derecho nuclear requerirá que el Estado adopte medidas para asegurar compensaciones adecuadas en tales casos. Todos los Estados que llevan a cabo actividades nucleares han concluido que las normas generales sobre responsabilidad civil no son un instrumento apropiado para dotarse de un régimen de responsabilidad adaptado a las características específicas de los riesgos implicados, por lo que han aprobado leyes especiales de responsabilidad específica en la materia. Asimismo, la posibilidad de que se produzcan daños transfronterizos requiere disponer de un régimen internacional de responsabilidad.

Para dar cumplimiento a este principio existen diferentes instrumentos internacionales que reglamentan todo ese proceso y que se enunciarán más adelante en este capítulo. Todos ellos constituyen la base jurídica necesaria para la instrumentación de las leyes y reglamentos nacionales en los países donde se desarrolla o se desarrolle un programa para la generación nuclear. En Chile está vigente la Convención de Responsabilidad Civil por Daño Nuclear, así como del Protocolo Común y la Convención de París donde se estipulan las indemnizaciones correspondientes, aunque este tema está aun en discusión a nivel internacional.

5.2.7. Principio de desarrollo sostenible

El desarrollo económico y social de una población sólo puede ser “sostenible” si el medioambiente se protege de los peligros por el uso de materiales fisionables y de fuentes de radiación ionizante por períodos de tiempo muy largos. Sin embargo, la propia durabilidad de estos materiales hace difícil determinar qué medidas actuales se necesitan

para proteger adecuadamente a las generaciones de un futuro lejano e impredecible. Una manera de aplicar el principio de desarrollo sostenible al terreno nuclear es instar a la generación actual a hacer todo lo posible para asegurar la seguridad tecnológica a largo plazo.

Precisamente este es un principio que se tiene en cuenta en la industria nuclear, de ahí los altos estándares de seguridad en todas sus etapas. En la particular para los desechos radioactivos, que pueden ser valorados como una herencia a las generaciones posteriores, se encuentran en investigación y desarrollo en Rusia, Estados Unidos, Francia entre otros métodos que permitirán reducir estos volúmenes y su actividad utilizando los métodos de transmutación y reprocesamiento como se recoge en el capítulo 4 del presente estudio.

5.2.8. Principio internacional de cumplimiento

En la medida en que un Estado haya adherido a los instrumentos internacionales sobre materia nuclear, su derecho nuclear debe reflejar las obligaciones establecidas en estos. Tanto a nivel regional como mundial, instrumentos bilaterales y multilaterales van formando un derecho internacional de la energía nuclear.

En Chile este proceso aun no está totalmente concluido, por lo que será necesario el análisis correspondiente para que no constituya una barrera para la introducción de este tipo de generación de considerarse necesaria. Con anterioridad y más adelante en este mismo capítulo se ha hecho y se hará referencia a estos instrumentos.

5.2.9. Principio de transparencia

El principio de transparencia requiere que las entidades que participan en el desarrollo, uso y regulación de la energía nuclear divulguen al público en general, a los medios de comunicación, al Parlamento, a los gobiernos locales y a otros organismos interesados, toda la información pertinente. En particular, se debe divulgar la información relativa a los incidentes y anomalías que puedan afectar a la salud pública, la seguridad tecnológica y el medioambiente.

En el capítulo 3 vinculado con la seguridad nuclear se recoge en particular, el Sistema Establecido por el OIEA para la evaluación de accidente e incidentes en la energía nuclear, lo cual facilita una rápida comprensión de la situación ocurrida en cada uno de ellos. Por

otro lado, el OIEA y la WANO⁹⁴ (por sus siglas en inglés, World Association of Nuclear Operators) tienen mecanismos establecidos para la evaluación en sitio de cualquiera de estos eventos, concluida la cual sus resultados son puestos en conocimiento a la opinión pública internacional y del país de ocurrencia en particular.

Adicionalmente a estos se ha adoptado como norma la creación de centros de información a la población en las centrales nucleares. Estos centros se encargan fundamentalmente de mantener informada a la población de la gestión de la central nuclear así como de proveer información para el conocimiento de las principales características de la generación nuclear. De hecho, se relacionan con la comunidad cercana y realizan tour a través de la instalación. En la Figura 5.2 se puede apreciar dos imágenes del Centro de Información de la Central Nuclear de Santa María de Garoña en España.



Figura 5.2 - Imágenes del Centro de Información de la Central Nuclear de Santa María de Garoña en España.

Otros ejemplos de transparencia de la industria nuclear lo constituyen la información que se ofrece por los organismos especializados a la comunidad internacional en el análisis de incidentes y accidentes de esta industria. Así por ejemplo, la información sobre el accidente

⁹⁴ WANO: World Association of Nuclear Operators (Asociación Mundial de Operadores Nucleares)

de la central nuclear de Chernobyl se puede obtener en el siguiente link de internet <http://chernobyl.undo.org/english/docs/chernobyl.pdf>.

En caso más reciente de la central nuclear japonesa Kashiwazaki Kariwa la información en línea puede ser encontrada en <http://www.tepco.co.jp/en/index-e.html>.

5.2.10. Principio de cooperación internacional

La dimensión internacional de la energía nuclear se basa en varios factores. En primer lugar, en el ámbito de la seguridad tecnológica y el ambiente, la posibilidad de efectos transfronterizos requiere que los Estados y organismos reguladores armonicen sus políticas y creen programas de cooperación para minimizar el riesgo de eventuales daños que afecten a sus ciudadanos y a su territorio. En segundo lugar, el uso de materiales nucleares conlleva riesgos para la seguridad física que no conocen fronteras, teniendo en cuenta que las amenazas de actos terroristas, del tráfico ilícito de materiales nucleares y de la proliferación de explosivos nucleares, requiere un alto grado de cooperación internacional. En tercer lugar, se ha adoptado gran número de instrumentos jurídicos internacionales para acordar las obligaciones de los Estados en estas materias. En cuarto lugar, el carácter cada vez más multinacional del sector nuclear involucra frecuentes movimientos transfronterizos de materiales y dispositivos, lo que hace que un control efectivo dependa de la actuación paralela y conjunta de entidades públicas y privadas de los países involucrados.

La Convención de Seguridad Nuclear es un ejemplo práctico de este principio. Esta convención se crea con espíritu incentivador, con la idea de que los Estados, con distintos desarrollos nucleares y de cultura de seguridad, se obliguen a mejorar sus condiciones, así como a intercambiar experiencias a través del sistema de revisión entre homólogos. Una explicación detallada del mismo se recoge en el sección 5.4.1 de este capítulo.

Adicionalmente existen programas de cooperación bilateral como el que está en vigor entre Argentina y Brasil que les permite inspecciones recíprocas en sus instalaciones con el objetivo de elevar la seguridad y la disponibilidad de las mismas al intercambiar las buenas prácticas que utilizan.

Existen además instituciones internacionales como el OIEA, la WANO, AEN entre otras que propician la cooperación en este sector, así como la cooperación directa que se establece entre las instituciones científico-técnicas del proveedor y receptor de las centrales nucleares y entre sus propias Autoridades Reguladoras Nucleares.

La Convención sobre Asistencia y sobre Pronta Notificación, que se analizara más adelante, constituyen otros ejemplos de la cooperación internacional.

5.3. Proceso de aprobación del marco jurídico

El proceso de aprobación de la legislación nacional por la que se establece el marco jurídico del desarrollo y uso de la tecnología nuclear y de materiales nucleares, no difiere en lo esencial del proceso legislativo en cualquier otra materia. La legislación nuclear, como cualquier otra, debe cumplir los requisitos constitucionales e institucionales del ordenamiento político y jurídico de cada Estado.

Sin perjuicio de ello, el desarrollo de las normas legales debe tener en cuenta que la cuestión de la energía nuclear presenta complejidades técnicas adicionales y comprende ciertos materiales y actividades que suponen riesgos excepcionales para la salud humana, la seguridad tecnológica y el medioambiente, además de riesgos para la seguridad física tanto nacional como internacional. Es preciso realizar una revisión del marco legal de la industria de un país, si un Estado quiere evaluar los programas y planes actuales sobre uso de técnicas y materiales nucleares.

Para el desarrollo del marco jurídico, los Estados deben estar dispuestos a tomar decisiones firmes sobre el alcance y el carácter del desarrollo nuclear que quieren promover. Tales decisiones requieren una clara formulación que puede requerir un debate público y el consiguiente intercambio de opiniones. En ese marco, es importante tener una perspectiva clara del modo en que la normativa nuclear podría afectar a las personas y a las instituciones interesadas, así como de su percepción sobre el modo en que se verían afectados. En el terreno nuclear, las percepciones subjetivas pueden llegar ser tan importantes como la realidad misma.

En general se considera como “interesados”, a la industria y los profesionales sujetos a regulación, a las entidades científicas, a los organismos estatales (locales, regionales y nacionales), a los medios de comunicación, a las organizaciones ciudadanas (grupos comunitarios, ONG y grupos de interés) y al público en general. También debe considerarse a otros Estados, sobre todo los vecinos con los que se haya suscrito acuerdos para el intercambio de información sobre posibles efectos transfronterizos y aquellos vecinos que también optaron por la energía nuclear (como lo es Argentina y Brasil para Chile en el evento que se opte por la energía nuclear)

Como se referirá más adelante, la comunidad nuclear internacional ha adoptado gran número de instrumentos internacionales sobre cuestiones nucleares específicas. La adhesión a estos instrumentos (ratificación parlamentaria) hace que, a partir de su entrada en vigor, los Estados queden sujetos a las obligaciones que en ellos se establecen, ya que han sido incorporados a la legislación nuclear nacional.

5.4. Convenciones y tratados internacionales

Para permanecer integrados a la comunidad internacional, los países deben adoptar un gran número de instrumentos internacionales (convenios y tratados) sobre cuestiones nucleares específicas. Estos instrumentos se incorporan a la legislación de cada país una vez que están en vigor y que han dado los pasos necesarios para ratificarlos, conforme a su ordenamiento jurídico.

A partir de entonces los Estados quedan sujetos a las obligaciones que se establecen en los instrumentos. Luego, eventualmente será necesaria la aprobación de las medidas reglamentarias para asegurar la efectividad de las disposiciones, en concordancia con la Convención sobre Seguridad Nuclear del OIEA. Esta, en su artículo 4º, dispone que “cada Parte Contratante adoptará, en el ámbito de su legislación nacional, las medidas legislativas, reglamentarias y administrativas, así como cualesquier otras que sean necesarias para dar cumplimiento a las obligaciones derivadas de la presente Convención”.

Los principales temas de las Convenciones y Tratados aplicables a los usos pacíficos de la energía nuclear son:

- Seguridad radiológica y protección de trabajadores de la central nuclear y del público.
- Seguridad constructiva, licenciamiento y operación de la central nuclear y facilidades asociadas a la manipulación del combustible, disposición de desechos radiactivos, etc.
- Manejo, transporte y almacenamiento seguro de material nuclear.
- Protección del medioambiente y mitigación del impacto por el establecimiento de una central nuclear y sus instalaciones asociadas.
- Responsabilidad por la importación y exportación de material nuclear.

- Responsabilidad por una comunicación efectiva en caso de emergencia nuclear, accidentes y su potencial impacto en el medioambiente y en el público.
- Responsabilidad civil por daños.
- Salvaguardias

5.4.1 Convención sobre Seguridad Nuclear y Convención Conjunta⁹⁵

El principal modo de garantizar una preparación y respuesta ante emergencias adecuadas es establecer y mantener planes de emergencia aplicables en el propio emplazamiento y fuera de él. Estas dos convenciones disponen que los Estados parte adopten las medidas adecuadas para velar por que existan planes de emergencia. Los planes deben probarse antes de que la instalación nuclear comience a funcionar, así como posteriormente mediante revisiones ordinarias. La cooperación estrecha con los Estados vecinos es esencial para abordar eficazmente las consecuencias de los accidentes radiológicos. Es un principio de derecho internacional público que los Estados que permiten actividades potencialmente peligrosas en su territorio deben asegurarse de que éstas no causen efectos perjudiciales importantes a otros Estados. Como consecuencia de este principio, los Estados están obligados a mitigar los efectos perjudiciales que causen en el territorio de otros y a indemnizar los perjuicios sufridos. Se puede concluir de esto que los Estados, en caso de provocar un daño involuntario a otro, están obligados a ofrecer su cooperación al Estado afectado para tomar medidas conjuntas de respuesta ante emergencias.

5.4.2. Convenciones sobre Asistencia y Sobre pronta Notificación⁹⁶

Teniendo en cuenta la experiencia del accidente de Chernobyl, se crearon estos instrumentos internacionales cuyo propósito es establecer bases para una respuesta internacional inmediata ante emergencias. Las partes contratantes de la Convención para una pronta notificación se comprometen a proporcionar información precisa que facilite la organización de contramedidas. Esta Convención, que establece sólo un marco general, sugiere que, según proceda, los Estados consideren la posibilidad de firmar acuerdos bilaterales o multilaterales que establezcan marcos jurídicos detallados para el intercambio transfronterizo de información sobre accidentes.

La Convención sobre asistencia es también un acuerdo marco, diseñado para establecer una base general para la mutua asistencia en caso de accidente nuclear o emergencia

⁹⁵ En vigor en Chile de acuerdo desde el 20 de Marzo de 1999.

⁹⁶ En vigor en Chile según Decreto Supremo No. 361 del 25 de Abril del 2006.

radiológica. Toda parte contratante puede pedir ayuda a otra, al OIEA o a otras organizaciones internacionales intergubernamentales.

5.4.3. Reglamento de Transporte Seguro de Materiales Radiactivos

Regula el transporte de todas las categorías de materiales radiactivos, desde los de muy baja actividad, como los minerales y concentrados de minerales, hasta los de muy alta actividad, como el combustible gastado y otros desechos radiactivos de alta actividad. El reglamento es aplicable al transporte de material radiactivo (Clase 7) por cualquier modo (aéreo, marítimo o terrestre). Si ese transporte implica cruzar fronteras, regirá el Artículo 27 de la Convención Conjunta que contiene una serie de reglas y obligaciones especiales relativas al movimiento transfronterizo de combustible gastado y desechos radiactivos. Específicamente dispone que el movimiento transfronterizo de estos materiales no tenga lugar sin el consentimiento del Estado de destino, que el movimiento transfronterizo de estos materiales a través de los Estados de tránsito esté sujeto a las obligaciones internacionales relacionadas con las modalidades particulares de transporte que se utilicen, y que el Estado de origen de los materiales se comprometa a asegurar que estos se sujetan en todo momento a esas obligaciones internacionales.

5.4.4. La Convención Conjunta

Básicamente esta convención creó un marco jurídico internacional para las leyes nacionales. Como el resto de la legislación nuclear, la Convención Conjunta aborda tres grandes problemáticas: la primera es que los desechos radiactivos deben gestionarse de manera tecnológicamente segura hasta mucho más allá de la generación actual. La segunda es que los desechos radiactivos de un Estado pueden ser los recursos de otro (en la Convención Conjunta, los desechos radiactivos se definen como “los materiales radiactivos... para los cuales la Parte Contratante... no prevé ningún uso ulterior...”). La tercera dificultad es consecuencia de la segunda, en el sentido de que algunos Estados reprocesan el combustible nuclear que se ha irradiado en reactores nucleares, mientras que otros no lo hacen: para los primeros el combustible gastado es un recurso, mientras que para los segundos se trata de un desecho radiactivo.

Muchos Estados consideran, implícita o explícitamente, que los desechos radiactivos se deben eliminar en el territorio del que los haya producido. La mayoría de estos Estados

consideran además que el que haya producido estos desechos debe encargarse de su disposición final.

En relación a este tema, se han celebrado los siguientes Convenios Internacionales de Responsabilidad Nuclear Universal (abiertos a todos los Estados):

- **Convención sobre Responsabilidad Civil por Daños Nucleares (Viena 1963)**⁹⁷
- **Convención sobre Indemnización Suplementaria por Daños Nucleares (1997)**
Aún no ha entrado en vigor.
- **Protocolo sobre aplicación de la Convención de Viena y el Convenio de París**⁹⁸
Rige desde 1988

Además, se han celebrado los siguientes Convenios Internacionales Regionales de Responsabilidad Nuclear, abiertos a los Estados miembros de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) y a otros Estados con el consentimiento de todas las partes en el convenio respectivo:

- **Convenio de París acerca de la Responsabilidad Civil en materia de Energía Nuclear de 1960 revisado en 1964, 1982 y 2003** (esta última aún no ha entrado en vigor).
- **Convenio Suplementario del Convenio de París, de Bruselas de 1963; revisado en 1964, 1982 y 2003** (esta última aún no ha entrado en vigor).

La Convención de Viena y el Convenio de París establecen regímenes amplios y casi idénticos de responsabilidad civil por daños nucleares. El propósito del Convenio Suplementario de Bruselas es establecer indemnizaciones adicionales mediante fondos públicos nacionales e internacionales en los casos en que las indemnizaciones derivadas del Convenio de París no basten para cubrir todos los daños. La convención sobre Indemnización Suplementaria por Daños Nucleares, que se basa en la convención de Viena, el Convenio de París o la legislación nacional concordante con el Anexo de la Convención, establece también indemnizaciones suplementarias mediante fondos públicos internacionales. El Protocolo Común vincula la Convención de Viena y el Convenio de París a los efectos de garantizar que los beneficios previstos en el primer instrumento se extienden a las partes en el segundo.

⁹⁷ En vigor en Chile desde el 23 de Febrero de 1990.

⁹⁸ En vigor en Chile 27 de Abril de 1992.

Los principios básicos y el contenido esencial de los convenios sobre responsabilidad nuclear se aceptan actualmente a nivel internacional como la solución jurídica adecuada para tratar los riesgos nucleares. Son el patrón internacional para determinar si una ley de responsabilidad nuclear es adecuada en relación con los riesgos nucleares.

Las Salvaguardias Internacionales que aplica la OIEA son un medio esencial de verificar que los Estados cumplen sus compromisos de no usar materiales o tecnología nuclear para fabricar armas nucleares u otros dispositivos explosivos nucleares. Las fuentes radiactivas deben protegerse físicamente para impedir que sean sustraídas o dañadas y que personas no autorizadas las utilicen en actividades ilícitas. Por ejemplo, la adquisición de una fuente radiactiva por terroristas plantea el riesgo de que se fabrique un dispositivo de dispersión radiactiva (“bomba sucia”) para amenazar o dañar a un gran número de personas.

- **Código de Conducta sobre Seguridad Tecnológica y Física de las Fuentes Radiactivas**

Resume algunas de las medidas que pueden tomar los Estados respecto a la no proliferación, los materiales nucleares que pueden utilizarse para producir dispositivos explosivos nucleares requieren mayores medidas de protección física.

- **Convención sobre la Protección Física de los Materiales Nucleares (CPFMN)⁹⁹**

Permite al Estado controlar las exportaciones e importaciones de los materiales objeto de la convención sólo cuando tenga garantías de que estarán protegidos de acuerdo con los niveles descritos. El Artículo 27 de la Convención conjunta establece que las partes contratantes intervengan en los movimientos transfronterizos de los materiales objeto de la convención sólo cuando se cumplan las condiciones especificadas. La CPFMN del 26 de octubre de 1979 es el instrumento legal más importante y se centra fundamentalmente en los materiales nucleares cuando son objeto de transporte internacional, pero también contiene otros requisitos importantes relativos a las medidas nacionales de protección física. Resumiendo, la CPFMN exige de los Estados que participan:

- Adopten ciertas medidas de protección física y garanticen determinados niveles de protección física en los envíos internacionales de materiales nucleares.
- Cooperen en la recuperación y protección posterior de materiales nucleares sustraídos.

⁹⁹ En vigor en Chile desde 23 de Febrero de 1990

- Tipifiquen en sus leyes como delitos ciertos actos (p. ej. la sustracción de materiales nucleares y la amenaza o tentativa de utilizar materiales nucleares para dañar a la población).
- Juzguen o extraditen a los acusados de cometer esos actos.

Finalmente, un elemento importante de la CPFMN es que clasifica los materiales nucleares por tipo y cantidad con el fin de aplicar distintos niveles de protección física. A continuación se listan los instrumentos jurídicos internacionales agrupados según sean vinculantes (o sea, contengan elementos de obligado cumplimiento), o no vinculantes (o sea, contengan solo recomendaciones).

Instrumentos jurídicos vinculantes

- Convención sobre la Pronta Notificación de Accidentes Nucleares
- Convención sobre Asistencia en caso de Accidente Nuclear o Emergencia Radiológica
- Convención de Seguridad Nuclear
- Convención Conjunta sobre la Seguridad en la gestión del combustible gastado y sobre Seguridad en la Gestión de Desechos Radiactivos
- Convención sobre la Protección Física de Materiales Nucleares y su Enmienda.
- Acuerdo de Salvaguardias Comprensivas
- Protocolo Adicional a los Acuerdos de Salvaguardias¹⁰⁰
- Convención de Viena sobre la Responsabilidad Civil por Daños Nucleares
- Protocolo de Enmienda de la Convención de Viena sobre la Responsabilidad Civil por daños Nucleares
- Convención sobre Indemnización Suplementaria por Daños Nucleares
- Protocolo Facultativo sobre Jurisdicción Obligatoria para la Solución de Controversias
- Convención de Viena sobre Responsabilidad Civil por Daños Nucleares
- Protocolo Común Relativo a la Aplicación de la Convención de Viena y del Convenio de París

Instrumentos no vinculantes

- La Infraestructura Legal y Estatal para la seguridad nuclear, radiológica, de los desechos y del transporte (OIEA No. GS-R-1)

¹⁰⁰ En vigor en Chile por Decreto Supremo No. 17 del 20 de Marzo del 2004

- Normas Básicas Internacionales de Seguridad para la Protección contra la Radiación Ionizante y la Seguridad de las Fuentes de Radiación. (Colección de Seguridad No. 115)
- Código de Conducta Revisado sobre Seguridad Tecnológica y Física de las Fuentes Radioactivas
- Directrices sobre la Importación y Exportación de Fuentes Radioactivas
- Código de Conducta sobre la Seguridad de Reactores de Investigación
- Reglamento Revisado para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos (No. TS-R-1, ST-1 Revisado)
- Principios Básicos de Protección Física (GC -45/INF- 14)
- La Protección Física de los Materiales Nucleares y de las Instalaciones Nucleares (INFCIRC 225/Rev. 4, Corr.)

5.5. Salvaguardias para el uso pacífico de la energía nuclear

Cuando la fisión nuclear fue descubierta en Alemania, en 1938, las potencialidades de una reacción de fisión en cadena fueron comprendidas de inmediato por la comunidad de físicos: si se lograba controlar, se tendría una "caldera nuclear" para sustituir a las calderas con combustibles fósiles de centrales generadoras de potencia eléctrica. Así lo entendieron los científicos rusos y crearon posteriormente el primer reactor nuclear para uso civil en Rusia en el año 1954.

Pero esta comunidad de especialistas también se dio cuenta de que existía la posibilidad de que la reacción en cadena fuera descontrolada. Se tendría entonces, un explosivo mucho más poderoso que los conocidos hasta ese momento, al que después se denominaría bomba atómica de fisión o bomba A, tal como lo comprendieron los estadounidenses, que crearon la primera bomba atómica en el año 1945. Una bomba de fisión efectiva requiere un material enriquecido en uranio 235 o en plutonio 239 en un grado muy elevado de enriquecimiento (más del 90%), aunque se pueden obtener explosivos menos efectivos con un grado menor de enriquecimiento.

Desde 1946, la comunidad internacional focalizó su atención sobre cada uno de los aspectos que está vinculado con este proceso con el objetivo de prevenir el acceso a estos materiales y tecnologías críticas, prevenir los ensayos nucleares, así como controlando el acceso a las tecnologías necesarias para la fabricación de armamento. En la Figura 5.3. se representa los elementos considerados en la no-proliferación de armas nucleares.



Figura 5.3 - Elementos considerados en la no-prolifерación

En la actualidad, para prevenir la proliferación de las armas nucleares la comunidad internacional utiliza salvaguardias implementadas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Se trata de un medio de vital importancia que garantiza que un Estado de cumplimiento a su compromiso de no utilizar 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 acordado con el OIEA. Por medio de diversos instrumentos internacionales, regionales y bilaterales, los Estados se comprometen a aceptar la aplicación de salvaguardias a los materiales y actividades nucleares sujetos a su jurisdicción o control.

El objetivo de las salvaguardias es la detección oportuna del desvío de una cantidad significativa de material nuclear destinada a usos pacíficos y la disuasión de eventuales desvíos. A grandes rasgos, las salvaguardias comprenden tres funciones: contabilidad, contención y vigilancia e inspección.

El principal instrumento internacional sobre la materia es el **Tratado sobre la no proliferación de las armas nucleares**¹⁰¹ (TNP) de 1968, ratificado por 187 Estados y que se complementa con varios otros acuerdos de no proliferación regionales.

Estos contienen medidas adicionales que reflejan las aspiraciones políticas de los Estados de una región determinada. Los siguientes tratados regionales están en vigor o en proceso de ratificación:

- Tratado para la Proscripción de las Armas Nucleares en la América Latina y el Caribe¹⁰² (Tratado de Tlatelolco), que entró en vigor en 1969.
- Tratado sobre la Zona Libre de Armas Nucleares del Pacífico Sur (Tratado de Rarotonga), que entró en vigor en 1986.
- Tratado sobre una Zona Libre de Armas Nucleares en el Asia Sur oriental (Tratado de Bangkok), que entró en vigor en 1997;
- Tratado sobre una zona libre de armas nucleares en África (Tratado de Pelindaba).

Además aparece el Fortalecimiento de las Salvaguardias auspiciado por el OIEA, con la promulgación de un nuevo modelo de salvaguardias “**Modelo de Protocolo Adicional para Acuerdos de Salvaguardias entre Estado(s) y el OIEA para la aplicación de Salvaguardias**” (llamado “**Protocolo Adicional**”, INFCIRC/540)¹⁰³. Con este nuevo instrumento el OIEA busca fortalecer la capacidad de obtener conclusiones sobre la ausencia de materiales nucleares o actividades no declarados por un Estado, a través de la transparencia de la información ampliada brindada por los países en cuanto a sus programas nucleares y un mayor derecho de acceso a las instalaciones por parte de los inspectores de salvaguardias.

En un mundo donde muchos países no son autosuficientes en el desarrollo y uso de la tecnología y materiales nucleares, la vigilancia y “control de las transferencias nucleares” entre Estados son elementos esenciales del régimen mundial de no proliferación. Los controles de exportación e importación en este ámbito son la aplicación práctica de los compromisos adquiridos por los Estados en virtud del **Tratado de No Proliferación** (TNP), especialmente del Artículo I (para los Estados que poseen armas nucleares) y el Artículo II (para los Estados que no poseen armas nucleares) de no ayudar a los Estados que no poseen armas nucleares a obtenerlas y de no pedir o recibir ayuda para obtenerlas.

¹⁰¹ En vigor en Chile por Decreto Supremo No. 17 del 20 de Marzo del 2004.

¹⁰² En vigor en Chile desde 30 de Mayo de 1994.

¹⁰³ Ídem al 28

Asimismo, los controles de exportación son esenciales para cumplir la obligación, establecida en el Artículo III.2 del TNP, de no suministrar materiales básicos o materiales fisionables especiales, ni equipos o materiales especialmente diseñados o preparados para el procesamiento, uso o producción de esos materiales, a Estados que no poseen armas nucleares, ni siquiera con fines pacíficos, a menos que esos materiales se sometan a las salvaguardias del OIEA. Compromisos y obligaciones similares se establecen en los tratados de no proliferación regionales, como los de Tlatelolco, Rarotonga, Bangkok y Pelindaba. Además de frenar la producción de explosivos nucleares y el terrorismo nuclear, los controles de la exportación e importación nuclear refuerzan la función reguladora fundamental del Estado de evitar que personas no autorizadas adquieran materiales y tecnología nucleares que no pueden manejar en condiciones de seguridad física y tecnológica.

Entre los requisitos más importantes que un Estado debe asumir aparecen: la necesidad de designar la autoridad responsable por establecer y mantener un Sistema de Contabilidad y Control de Materiales Nucleares sujetos a Salvaguardias (SCCMN), 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 operacionales de la instalación.

Las Salvaguardias se plantean básicamente de dos formas: como un requerimiento mandatario sobre todos los proyectos del OIEA y la asistencia técnica que éste provea a un país y por otro lado a pedido de un Estado motivado en el cumplimiento de obligaciones asumidas por la firma de un Acuerdo Multilateral, como por ejemplo el Tratado de No Proliferación (TNP), o el tratado que establece zonas libres de armas nucleares (Tlatelolco¹⁰⁴).

El Tratado de No Proliferación de Armas Nucleares que entró en vigor el 5 de marzo de 1970, establece que “los Estados Poseedores de Armas Nucleares se comprometen a no ayudar o alentar a los Estados No Poseedores de Armas Nucleares a adquirirlas”. Por otro lado los Estados No Poseedores de Armas Nucleares se comprometen “a no fabricar o adquirir de ninguna forma dispositivos nucleares con fines explosivos, aceptar el Régimen de Salvaguardias del OIEA sobre todos los materiales nucleares utilizados en actividades pacíficas de uso de la energía nuclear y finalmente no proveer materiales nucleares o medios para su producción de materiales fisionables a Estados No Poseedores de Armas Nucleares para fines pacíficos”, sin un acuerdo previo de salvaguardias conforme al Tratado de No Proliferación.

¹⁰⁴ En vigor en Chile desde 30 de Mayo de 1994.

5.6. El licenciamiento para las centrales nucleares

Uno de los mecanismos de control estatal sobre el uso de la energía nuclear, en cada una de sus actividades, es el licenciamiento de las etapas del ciclo de vida de la actividad respectiva. En este estudio solo se hará mención a lo relacionado con las centrales nucleares.

Bajo el término de “licenciamiento” de las centrales nucleares se comprende desde la solicitud para la emisión de las licencias, hasta su otorgamiento con las condiciones de validez por la que fueron extendidas. Esto lo realiza la Autoridad Reguladora Nacional (en Rusia, AFCN) que no solo considera el control a las organizaciones involucradas, sino también al personal en funciones que inciden en la seguridad nuclear y radiológica.

La Autoridad Reguladora Nacional es la institución estatal encargada para el otorgamiento de licencias y su posterior control y supervisión. La licencia final se otorga a la entidad encargada de operar la central nuclear.

Una central nuclear requiere de las siguientes licencias durante todo su ciclo de operación:

1. Licencia para el emplazamiento.
2. Licencias para el inicio de la construcción.
3. Licencia para la operación.
4. Licencia para el desmantelamiento.

Para cada una de estas licencias la entidad explotadora deberá presentar la documentación correspondiente que acredite y garantice la debida seguridad nuclear y radiológica en el proceso que le corresponde. Esta información, una vez entregada por el operador a la Autoridad Reguladora Nacional, pasa por un proceso de análisis y posterior aprobación o rechazo. La etapa de análisis es realizada por la Autoridad Reguladora Nacional con medios propios y también utilizando otras instituciones especializadas que puedan colaborar en el estudio y peritaje de la documentación entregada por los operadores. No obstante, la responsabilidad final por la emisión de la licencia la asume completamente la Autoridad Reguladora Nacional.

Adicionalmente hay que señalar que este proceso de licenciamiento no excluye la realización simultánea de cualquier otro tipo de procedimiento establecido en el país, como lo es por ejemplo el Estudio de Impacto Ambiental solicitado por las instituciones encargadas del control del medioambiente

Para la supervisión de los trabajos que se realizan en cada una de las etapas del ciclo de vida de la central nuclear y del cumplimiento de las condiciones por las cuales fue otorgada la licencia, la Autoridad Reguladora Nacional debe disponer de un personal altamente especializado y con todas las atribuciones que otorga la ley para realizar inspecciones periódicas al emplazamiento de las centrales nucleares. Esta especie de “policía nuclear” es la encargada de velar para que todas las empresas que utilizan reactores nucleares de uso civil cumplan estrictamente con las normas de seguridad previstas. Para realizar este trabajo tienen la facultad de detener la operación de una central nuclear si detectan incumplimientos a las normas o regulaciones establecidas en la licencia que le fuera otorgada. En el caso de las centrales en construcción, tienen la facultad de paralizar parte o totalidad de las obras.

Como se puede apreciar, este es un proceso complejo y tiene impactos y riesgos durante todas las etapas del ciclo de vida de la central nuclear. El primero efecto es fundamentalmente económico, por el atraso del proyecto, en el evento que no cumpla ciertos requisitos que signifique la solicitud de información adicional que fundamente la seguridad nuclear y radiológica o la detección de insuficiencia en la calidad de los trabajos o actividades que tengan una implicación directa en la condiciones de vigencia de la licencia y que, por lo tanto, afecten la seguridad nuclear y radiológica. El riesgo asociado está dado por la detención de los trabajos que pueden conllevar retrasos significativos en la ejecución de las obras, en la etapa de construcción, o en la operación de la central nuclear.

Por ello, las entidades explotadoras, responsables por todas las etapas del ciclo de vida de la central, toman las medidas correspondientes con el objetivo de minimizar estos riesgos y su consiguiente impacto económico. Para ello, utiliza inspectores propios durante la etapa de construcción, colaboración de centros de investigaciones para las actividades de apoyo científico-técnico y peritaje, así como establece un sistema de garantía de calidad para todas las etapas del ciclo de vida de la central nuclear, entre otras medidas.

5.7. La experiencia de la Federación de Rusia^{105, 106}

El sistema ruso para la administración estatal de las actividades de la energía nuclear, que inició su funcionamiento en el año 1954 cuando se instaló la primera central núcleo eléctrica en la entonces Unión Soviética, abarca tanto los aspectos económico-financieros como la parte tecnológica y la seguridad. Actualmente el órgano estatal encargado de la administración de la industria es la Corporación Estatal para la Energía Nuclear “Rosatom”, cuyo director general es nombrado por el Presidente de la Federación de Rusia.

Desde el punto de vista legislativo, las funciones de Rosatom son las siguientes:

Ejecutar las políticas estatales en el desarrollo de la energía nuclear, ejecutar las tareas del programa estatal de armamento, determinar las políticas de desarrollo de la rama nuclear, cumplir las tareas del programa estatal de armamento y los encargados de la defensa nuclear, así como poner en práctica la regulación jurídica y prestar servicios y administrar los bienes relacionados al uso de la energía nuclear y desarrollar las ciencias nucleares, la educación científica y profesional, así como ejecutar la cooperación internacional en esta rama.

ROSATOM controla a un holding de empresas estatales (Atomenergoprom), que se encargan de todos los aspectos de la Industria Nuclear civil, tal como la extracción de uranio, producción del combustible, producción de energía eléctrica, construcción de las centrales nucleares, investigaciones para la innovación y construcción de equipamiento.

En la Figura 5.4 se presenta la estructura organizativa de Rosatom y en la Figura 5.5 se explican las principales actividades de Rosatom, a través del Holding Atomenergoprom.

5.7.1. Rosenergoatom¹⁰⁷

Entre las empresas que Rosatom controla, la más importante es Rosenergoatom, compañía encargada de administrar las centrales nucleares que actualmente existen en Rusia. Sus atribuciones y funciones son:

¹⁰⁵ Elaboración propia basada en las leyes, normas y reglamentos vigentes para la energía nuclear en la Federación de Rusia.

¹⁰⁶ Ley Federal “Sobre el Uso de la Energía Atómica” de 21.11.2005, No. 170-L.

¹⁰⁷ Ley Federal “Sobre la Corporación Estatal de Energía Atómica “Rosátom” de 01.12.1996 No 317-LF, (Sistema GARANT 2009).

- Operación de las centrales nucleares.
- Soporte económico, financiero y comercial para dar cumplimiento a sus funciones como entidad operador y a nuevos proyectos.
- Despacho centralizado de la energía eléctrica producida.
- Colaboración internacional en el área de la seguridad nuclear.
- Capacitación del personal.

La Figura 5.4 muestra la estructura organizativa de la industria nuclear en la Federación de Rusia y la Figura 5.5 las principales actividades del Holding Atomenergoprom.

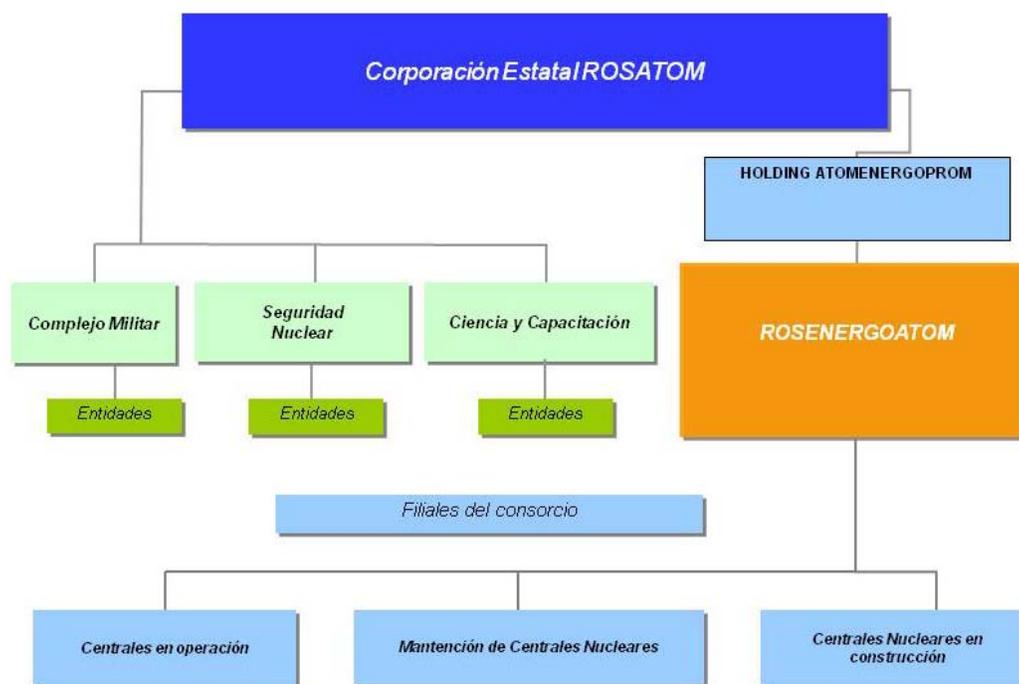


Figura 5.4 - Estructura organizativa de la Industria Nuclear en Rusia.

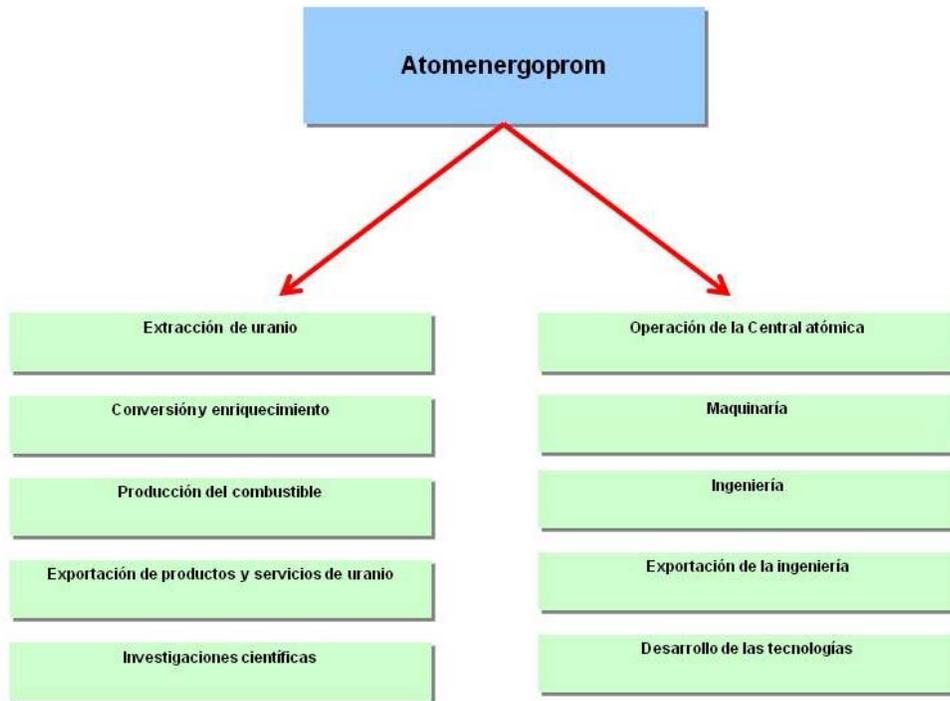


Figura 5.5 Principales actividades del Holding Atomenergoprom.

La Figura 5.6 presenta un diagrama de las actividades de Rosenergoatom.

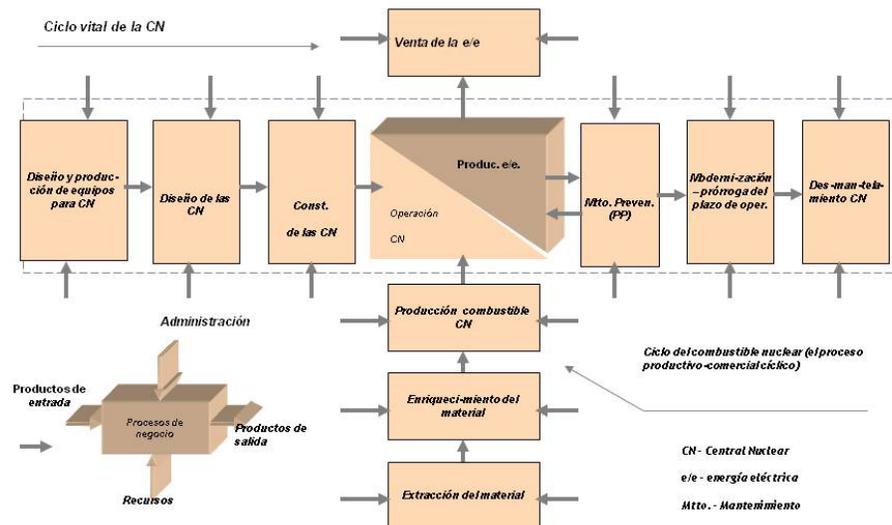


Figura 5.6 Actividades de Rosenergoatom.

De acuerdo con la actual legislación rusa, la responsabilidad de ROSENERGOATOM, además de administrar las centrales nucleares rusas, es garantizar la seguridad en todas las etapas del ciclo de producción de cada central nuclear, condición básica y necesaria para la validez de la licencia de la que actualmente disponen cada una de las centrales en operación.

5.7.2. La Autoridad Reguladora de Rusia

En Rusia las funciones de control de la energía nuclear (Autoridad Reguladora Nacional) las ejecuta la Agencia Federal de Control Nuclear (AFCN), organismo autónomo subordinado exclusivamente al Presidente del país, por lo que, de acuerdo a la legislación rusa, ningún organismo privado o estatal puede interferir con su actividad y toma de decisiones en materia de seguridad nuclear y otorgamiento de las licencias. Tales decisiones son definitivas y tampoco pueden ser impugnadas por ningún otro órgano del Estado.

Las reglas generales de la organización de la actividad de la AFCN están definidas por el “Reglamento de la Agencia Federal de Control Ecológico, Tecnológico y Nuclear”¹⁰⁸. La Figura 5.7 explica la estructura orgánica de la AFCN.

¹⁰⁸ Reglamento sobre el Servicio Federal de Vigilancia Ecológica, Tecnológica y Atómica, aprobado por el Gobierno de la Federación de Rusia de 30.07.2004 No. 401 (Sistema GARANT 2009).

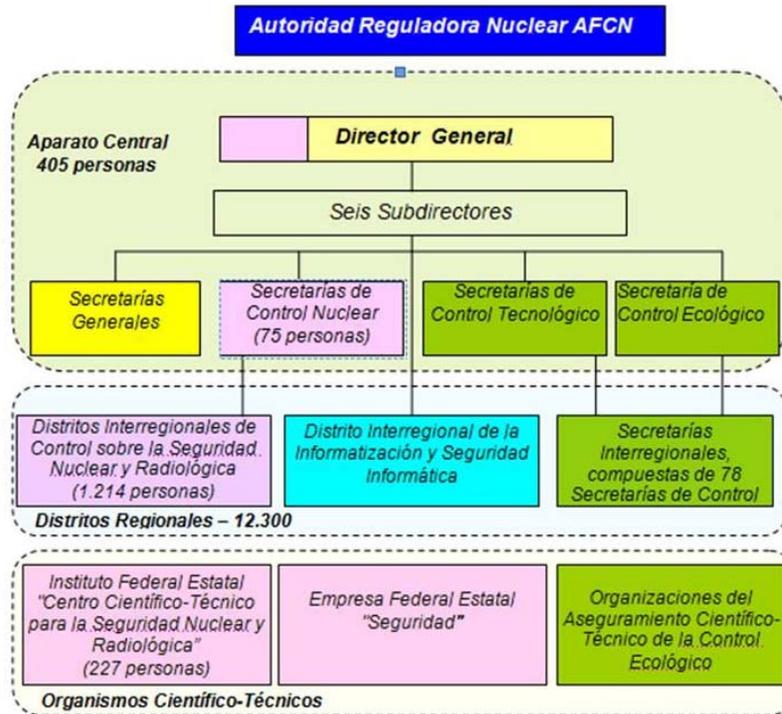


Figura 5.7 - Estructura orgánica de la AFCN.

Como cualquier entidad, la Autoridad Reguladora incurre en gastos para el desarrollo de sus funciones que están directamente vinculadas con el control de la seguridad de las instalaciones nucleares. Uno de los mecanismos estatuidos, que garantizan la independencia del funcionamiento de las entidades de vigilancia, es el establecimiento jurídico de un financiamiento de su actividad a través del presupuesto federal. La dinámica de este financiamiento para la AFV se recoge en la Figura 5.8 para el periodo 2005-2007.

Los montos en particular para cualquier Autoridad Reguladora estará en dependencia de la magnitud del programa que se desarrolle en una país particular que en el caso de la Federación de Rusia no debe ser comparable con el posible financiamiento que sería necesario para una autoridad de este tipo en el caso de Chile pues de desarrollarse un programa de este tipo los gastos serían menores teniendo que no serían programas del mismo alcance es decir, con un número de centrales nucleares diferentes.

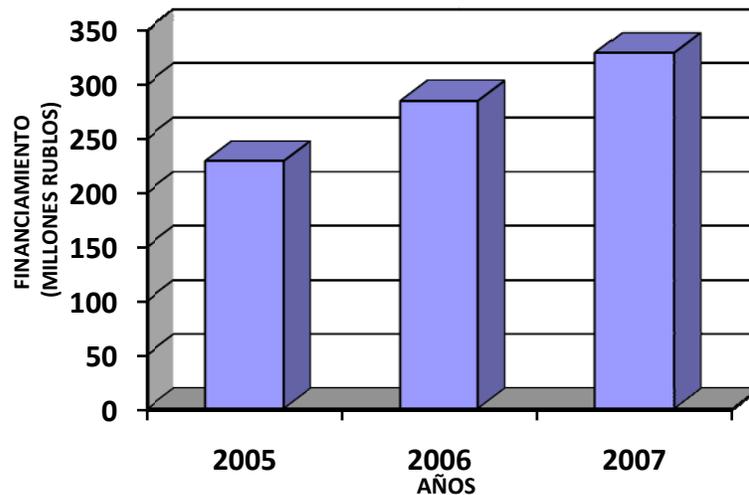


Figura 5.8 - *Financiamiento de la Autoridad Reguladora de la Federación de Rusia periodo 2005-2007.*

5.7.3. Otorgamiento de licencias en Rusia

La Agencia Federal de Control Nuclear (AFCN) es la única institución autorizada para emitir licencias que, al igual que en el resto de los países, esta es intransferible y se adjudica a la entidad operadora de la central nuclear.

La solicitud de la licencia debe estar acompañada por una serie de documentos que brindan toda la información establecida en el reglamento y que está vinculada a cada etapa del ciclo de vida de la central nuclear, fundamentando la seguridad nuclear y radiológica de la instalación.

Durante el proceso de revisión de la documentación entregada para la solicitud de la licencia, la AFCN lleva a cabo un proceso de verificación de la información entregada y se realizan experticias de los mismos para comprobar si garantizan adecuadamente la seguridad nuclear y radiológica del proyecto.

La entidad explotadora está en la obligación de entregar a la AFCN, durante el proceso de licenciamiento, toda la información técnica vinculada con la seguridad nuclear y radiológica de la central nuclear. Por otro lado, la AFCN tiene la facultad de suspender o anular la licencia expedida en caso de que:

- Exista una violación, por parte de la entidad operadora a las leyes federales u otros actos jurídicos en el ámbito del uso de la energía nuclear.
- El uso de información no veraz en los documentos presentados en la solicitud.
- Incumplimiento por parte de la entidad operadora, a las condiciones de vigencia de la licencia
- En caso de suspensión de la licencia, la entidad operadora no puede continuar operando la central hasta resolver el motivo de la sanción en los plazos que indican. La suspensión puede llegar a ser definitiva

5.7.4. Permisos y certificaciones para la ejecución de los trabajos en la central nuclear

Para realizar cualquier tipo de actividad en la central nuclear, la entidad explotadora debe recibir el permiso correspondiente del AFCN. La operadora debe “licenciar” a todos sus operadores con la AFCN. Se establece un listado de trabajadores de la central nuclear los que deben contar con los respectivos permisos de la Autoridad Reguladora Nuclear¹⁰⁹ para realizar sus labores profesionales en la central. Este listado se divide en 3 categorías: Cargos directivos, personal administrativo que controla la seguridad nuclear y radiológica, y el personal de operación.

Una condición importante exigida al personal para recibir el permiso es la ausencia de contraindicaciones médicas y psicofísicas para desempeñar determinada actividad, lo que será garantizado por el examen médico correspondiente.

5.7.5. Responsabilidades y obligaciones de la entidad explotadora

Como ya se ha mencionado, la entidad explotadora responde íntegramente por la seguridad de la central nuclear, así como por el manejo de los desechos radioactivos y los materiales nucleares. Si ocurriese un daño a un trabajador durante la ejecución de su trabajo, la

¹⁰⁹ Decreto del Gobierno de la Federación de Rusia de 3.03.1997 No. 240 “Sobre la confirmación de la lista de puestos de los empleados de los objetos del uso de la energía atómica, que deben recibir el permiso de la Agencia Federal de Vigilancia Ecológica, Tecnológica y Atómica para tener el derecho de trabajar en el terreno del uso de la energía atómica”, Sistema “GARANT” 2009.

entidad explotadora indemnizará a los afectados, sea éste mortal o menoscabo a la salud de las personas como consecuencia de un accidente que haya provocado emisión de elementos radioactivos o tóxicos. El respaldo financiero para cubrir estos imprevistos se respaldan por seguros con garantías estatales tomadas por la entidad explotadora.

Por otro lado, la entidad explotadora debe garantizar la protección física de sus instalaciones. Este es un sistema complejo de planificación, control y ejecución de un conjunto de medidas técnicas y organizativas dirigidas a:

- Prevención en la entrada de personal no autorizadas al interior de la central nuclear, del acceso no autorizado de materiales nucleares y sustancias radioactivas y de la sustracción y robos de material nuclear.
- Detección oportuna de cualquier atentado a la integridad y buen estado de los materiales nucleares y sustancias radioactivas, así como la prevención de actos terroristas y de sabotaje que amenacen la seguridad de la central
- Recuperaciones oportunas de materiales nucleares y sustancias radioactivas sustraídas sin la debida autorización.

La protección física en estrecha coordinación de la entidad explotadora con los órganos de vigilancia y protección del gobierno, se realiza en todas las etapas del diseño, construcción, operación y desmantelamiento de la central nuclear, así como en la gestión de los materiales nucleares y sustancias radioactivas, incluyendo su transporte. La entidad explotadora es responsable en brindar una adecuada protección contra eventuales incendios de la central nuclear.

Esta protección física también involucra el garantizar el control de las radiaciones en la zona de “protección sanitaria” de la central nuclear y en la “zona de vigilancia” Bajo el termino de “zona de protección sanitaria” se entiende al territorio alrededor de la central nuclear en el que el nivel de la dosis de radiación durante la operación de la central, puede superar la dosis de radiación permitida a la población. En cambio la “zona de vigilancia” es un territorio fuera de la zona de “protección sanitaria” en la que se ejecuta permanentemente un control radiológico que sirve de muestra lo que está ocurriendo en la población.

La selección, entrenamiento y el aseguramiento del nivel profesional del personal que trabaja en la central nuclear, es también una responsabilidad de la entidad explotadora. La seguridad y eficiencia de la central nuclear se basa fundamentalmente en el factor humano

es decir, en el aseguramiento de la actividad profesional del personal que se refleja en la ausencia de incidentes que amenacen la seguridad radiológica.

Por último, cabe señalar que el aviso y la información oportuna a través de los medios masivos de comunicación de cualquier incidente a la población, también es una responsabilidad de las entidades explotadoras.

Conclusiones

Las normas legales, en cualquier ámbito y especialmente en relación a las actividades de una industria productiva, establecen los parámetros necesarios para su buen funcionamiento con miras a garantizar lo más importante para una sociedad: el bien común. Por su complejidad e importancia, la tecnología nuclear, tanto para la generación de electricidad como en su aspecto armamentista, está sujeta a una serie de regulaciones internacionales que a lo largo de los años han probado ser adecuadas para su normal desarrollo.

Es importante comprender esto sobre la base de hechos concretos, ya que mientras por un lado se cierne todo tipo de temores especulativos sobre la energía nuclear, lo cierto que durante las últimas décadas se ha ido configurando un marco legal, que en este estudio hemos llamado “derecho nuclear”, el cual ha demostrado que cubre de manera eficiente y detallada cada aspecto de la industria, teniendo especial cuidado con todo lo relacionado a la seguridad y las amenazas externas que podrían influir negativamente en la proliferación de armamentos. Así, hemos sido testigos afortunados de como la investigación científica y el desarrollo tecnológico han dejado en el pasado los tristes recuerdos de los accidentes de Three Mile Island y Chernobyl, del mismo modo que eventuales incidentes relacionados con el terrorismo, como el tráfico de material nuclear o el robo de elementos radioactivos, subsisten en las ficciones literarias o cinematográficas sobre la guerra fría del siglo pasado, sin que se hayan registrado casos reales de importancia. En esto, sin duda, tiene capital relevancia el marco regulatorio con que cuenta la industria, capaz de prevenir y disuadir con éxito la ocurrencia de problemas de este tipo.

La legislación también regula el desenvolvimiento normal de la industria, estableciendo el correcto desempeño, tanto de los operadores de la central nuclear como de sus trabajadores y las autoridades que han de supervisar sus actividades, contando para ello con una completa y eficiente jurisprudencia internacional.

La colaboración entre las naciones, en esta materia específica del Derecho Nuclear, ha transcurrido de manera exitosa durante décadas, a pesar de la intrincada maraña de aspectos relacionados que sobrepasan las fronteras sociales, culturales y económicas. Ciertamente la industria nuclear ha probado tener mayor capacidad de entendimiento y de trabajar en equipo que cualquier otra industria, contando con altísimos grados de consenso y respeto de los acuerdos internacionales que son garantía de seguridad y eficiencia.

Sin embargo, no podemos desconocer que los desafíos futuros se presenta aún más complejos y desconocidos, producto principalmente de la crisis energética global y los problemas medioambientales que afectan al mundo, por lo que fortalecer esta institucionalidad es una tarea que no admite descanso, al contrario, demanda toda la atención posible.

A partir de lo señalado con anterioridad, queda evidente que el desarrollo de un programa nuclear de un país que opte por esta variante para diversificar su matriz energética, tiene un impacto sobre todo el sistema institucional por la necesidad de darle solución a los problemas antes enunciados y que parte por la creación y organización de la Autoridad Nacional Reguladora Nuclear.

Este impacto, que originará la forma en que el Estado/Gobierno dirigirá y controlará un programa de este tipo, puede constituir parte de las medidas que se analizan para modernizar las estructuras del Poder Ejecutivo de Chile. Su ejecución no depende necesariamente de una decisión previa por la opción nucleoelectrica sino forma parte de un proceso de estar listo en el momento oportuno para iniciar en tiempo el desarrollo del programa nuclear si se decide por él.

De no tomarse las medidas correspondientes en tiempo, se correrá el riesgo de que el Poder Legislativo y Ejecutivo del país no esté en condiciones de enfrentar un programa de este tipo en el evento que la decisión sea favorable a la energía nuclear, lo que puede construir una barreras para el desarrollo de esta alternativa y provocará demoras que tendrán un incidencia económica y social al no contar en el momento oportuno con la energía proyectada para el cubrimiento de la demanda.

En este contexto, para naciones como Chile -que aspira y cuenta con importantes ventajas y argumentos para ingresar al grupo de países desarrollados- incorporar a su legislación un “Marco Regulatorio Nuclear” en forma anticipada a la decisión que algún día se tomará, sea esta favorable o contraria a esta opción; se presenta como una oportunidad estratégica para su desarrollo, no solo por la posibilidad de incorporar la tecnología nuclear en su matriz energética, sino también de cara a los imperativos de la sociedad global que exige estar al día en todas las leyes que regulan aspectos de seguridad de aquellas tecnologías que relacionan unos países con otros, como ha quedado demostrado, con la tecnología nuclear.

Bibliografía

- 5.1.- Convención sobre Seguridad Nuclear, INFCIRC/449, OIEA, 5 julio 1994.
- 5.2.- Convención sobre la protección física de los materiales nucleares, INFCIR/274 Rev. 1 OIEA, Mayo 1998.
- 5.3.- Convención sobre la pronta notificación de accidentes nucleares, INFCIRC/335, OIEA, Septiembre 1986.
- 5.4.- Convención sobre asistencia en caso de accidente nuclear o emergencia radiológica, INFCIRC/336, OIEA, Noviembre 1998.
- 5.5.- Convención Conjunta sobre seguridad en la gestión del combustible gastado Enero 1998.
- 5.6.- Ley Federal “Sobre el Uso de la Energía Atómica” de 21.11.2005, No. 170-LF, (Sistema GARANT 2009).
- 5.7.- Ley Federal “Sobre la Corporación Estatal de Energía Atómica “Rosatom” de 01.12.1996 No 317- LF, (Sistema GARANT 2009).
- 5.8.- Reglamento sobre el Servicio Federal de Vigilancia Ecológica, Tecnológica y Atómica, aprobado por el Gobierno de la Federación de Rusia de 30.07.2004 No. 401 (Sistema GARANT 2009)
- 5.9.- Decreto del Gobierno de la Federación de Rusia de 3.03.1997 No. 240 “Sobre la confirmación de la lista de puestos de los empleados de los objetos del uso de la energía atómica, que deben recibir el permiso de la Agencia Federal de Vigilancia Ecológica, Tecnológica y Atómica para tener el derecho de trabajar en el terreno del uso de la energía atómica”, Sistema “GARANT” 2009.
- 5.10.- Normas y reglas higiénicas 2.6.1.24-03 “Reglas higiénicas de diseño y explotación de las centrales nucleares”, aprobadas por el Inspector Jefe Estatal de Sanidad de la Federación de Rusia de 22.04.2003.
- 5.11.- A. M. Agáпов, G.A. Nóvikov, A. I. Iorysh, O.A. Suptáyeva, Sobre la existencia del derecho nuclear y la elaboración del Proyecto Legislativo “Sobre el licenciamiento de la actitud en el terreno del uso de la energía nuclear”, www.proatom.ru.

Parte II

Impactos y riesgos de la generación núcleo-eléctrica

La segunda parte del estudio se ha estructurado en 5 capítulos. El primero de ellos describe los diferentes aspectos que hay que tener en cuenta, de acuerdo con las normas y regulaciones de carácter internacional establecidas para ello, durante el proceso que se lleva a cabo para la selección de la ubicación de la central nuclear, así como las características que deben ser evaluadas durante las investigaciones que se llevan a cabo en este proceso y por último, la utilización del terreno por este tipo de generación y su comparación con las otras fuentes de energías acordadas para este estudio. En el capítulo siguiente se efectúa un análisis comparativo de los diferentes impactos que tiene la generación núcleo eléctrica y su comparación con las fuentes de energía fósiles (petróleo, gas, carbón), la energía hidráulica y las energías renovables no convencionales (eólica y solar). El tercero aborda los aspectos económicos relacionados con la generación de electricidad y la comparación del costo del KW instalado y el costo unitario de generación (KWh) de las diferentes fuentes de energía analizadas en el estudio, así como el análisis de diferentes riesgos de la generación nucleoelectrica. La problemática de los recursos humanos para el desarrollo de un programa de generación núcleo eléctrica se aborda en el siguiente capítulo para pasar posteriormente a los aspectos sociales relacionados con este programa. En el último capítulo de esta segunda parte del estudio se recogen los diferentes riesgos que han sido señalados a lo largo del estudio para un programa nuclear, así como se analizan otros que también son de importancia que deben tenerse en cuenta.

Capítulo 6

Selección del Emplazamiento

6.1. Etapas y criterios^{110, 111, 112}

Tomando en consideración el impacto en la economía de una región que generan las obras relacionadas con el emplazamiento y puesta en marcha de una central nuclear, se deduce que los estudios relativos a la localización y selección del lugar apropiado reviste una importancia fundamental. Por ello, el estudio de localización debe realizarse en forma metódica y sistémica: primero, considerando todos los factores involucrados, y segundo, evaluando y estudiando los factores asociados, su complementación e interacción simultánea.

Un estudio de emplazamiento para nuevas centrales nucleares tiene además otras múltiples dimensiones que se deben analizar, especialmente cuando se trata de una obra de envergadura en que las condiciones ambientales influyen fuertemente en las inversiones a realizar y el impacto socioeconómico en la región, que sin duda es enorme.

En los años 60 y 70, al inicio del “boom” de la actividad nuclear, la seguridad se enfocaba principalmente al diseño y operación de las centrales nucleares, mientras que los estudios de localización se realizaban teniendo en cuenta más bien criterios geoestratégicos, técnicos y económicos por sobre los de seguridad. No se analizaba en profundidad las características de los emplazamientos que influían directamente sobre el diseño final de la central nuclear, como por ejemplo las condiciones sísmicas, la probabilidad de

¹¹⁰ Código sobre la seguridad de las centrales nucleares: Emplazamiento, 50-C-5, OIEA, Viena, 1989.

¹¹¹ Basic safety principles for nuclear power plants: 75-INSAG-3 rev. 1(INSAG-12), Report by the International Nuclear Safety Advisory Group, IAEA, Vienna, 1999.

¹¹² Site evaluation for nuclear installations: safety requirements NS-R-3, IAEA, Vienna, 2003.

inundaciones, la adecuación de los materiales superficiales, etc. Los análisis del emplazamiento de esa época no se diferenciaban profundamente de lo que una central convencional requería.

En los 80, debido a las consecuencias del accidente de la Central Three Mile Island en los Estados Unidos, y a la madurez de la industria nuclear en países desarrollados y a la posibilidad de incrementar el mercado nuclear con la exportación de esta tecnología a países en desarrollo, el OIEA, por ser el organismo regulador de los usos pacíficos de la energía nuclear a nivel mundial, decide encarar un programa de normas para la industria nuclear, donde se pone énfasis en la seguridad. Así nacen los Códigos de Práctica y Guías de Seguridad.

Estas guías tienen cinco objetivos que abarcan todo el espectro del desarrollo y mantención de la industria nuclear:

- Marco Regulatorio
- Emplazamiento
- Licenciamiento (Tecnología)
- Garantía de calidad
- Normas de seguridad

Estos 5 códigos establecen los objetivos y requerimientos básicos que hay que cumplir para conseguir una adecuada seguridad en el funcionamiento de las centrales nucleares.

En lo referido a la localización, las guías del OIEA establecen la seguridad como requisito indispensable para la elección del emplazamiento y, en segundo lugar, los condicionamientos geopolíticos o económicos. El principal objetivo consiste en definir los parámetros para la protección de la población y el medioambiente frente a repercusiones radiológicas resultantes de eventuales fugas accidentales de radioactividad. Según estas guías, para determinar si un emplazamiento resulta idóneo se deben analizar en primer lugar todos aquellos efectos eventuales que puedan afectar a la seguridad del emplazamiento, tales como los efectos naturales (terremotos, tsunamis, inundaciones, etc.) y los efectos generados por la actividad humana (represas, fabricas peligrosas, etc.). Con posterioridad se deben estudiar las características del lugar y los alrededores que puedan influir en como se dispersan los materiales radioactivos en una eventual fuga radioactiva, analizar los vientos dominantes y las poblaciones ubicadas en la dirección del viento (a

barlovento del emplazamiento). También se debe analizar la densidad y distribución de la población del sector para eventuales planes de evacuación. En resumen, evaluar en detalle el riesgo para los individuos y la población ante una posible avería de la central nuclear que signifique fuga radioactiva al ambiente.

Además de exponer los criterios que se recomiendan para la selección del emplazamiento de centrales nucleares, los códigos del OIEA también recomiendan determinadas técnicas para realizar el estudio de cada una de estas variables y establecen pautas de procedimiento, a fin de que se asegure la calidad del trabajo realizado.

El accidente de Chernobyl, en el año 1986, puso en situación crítica a la industria nuclear. Este accidente creó una conciencia negativa en la sociedad acerca de los riesgos que podía implicar esta tecnología en general. Al mismo tiempo y en relación directa con él precedente negativo sentado luego de Chernobyl, comenzó a plantearse el concepto NIMBY (not in my backyard: no en mi patio trasero), que cuestionaba la instalación de la industria nuclear por cuanto supuestamente afectaba el entorno en que viven las personas. Del mismo modo, con una mayor conciencia pública respecto del medioambiente, los países más desarrollados, como Estados Unidos, Canadá, la Unión Europea y Rusia, crearon normativas específicas sobre el impacto negativo que produce la industria sobre el medioambiente, regulando la instalación de nuevas construcciones de cualquier industria de gran envergadura y especialmente supeditando la instalación de las centrales nucleares a estrictos estudios de impacto ambiental sobre la región en cuestión. Esto dio una nueva dimensión a los estudios de emplazamiento y le sumó a la seguridad de la tecnología empleada, el cuidado y respeto por el medioambiente.

Esto generó la paralización de nuevos proyectos, incluso, detención de centrales en funcionamiento (Alemania). Este planteamiento, que surgió en algunos países desarrollados en los años 80, no consideraba que las sociedades para continuar su proceso de crecimiento y desarrollo, necesitaban disponer de energía abundante a valores razonables y estables. No quisieron en definitiva esos países pagar el costo político que significaba en esa época aceptar el uso de la energía nuclear. Esta postura fue copiada en gran medida también por los países en vías de desarrollo.

Esta política energética generó un inusitado impulso al uso del carbón como la forma más barata y rentable para continuar con los consumos de energía que los países requerían. No se tomaron en cuenta los efectos negativos al medioambiente generado por el material particulado que emiten las chimeneas de centrales a carbón y menos aún se tomó en cuenta el “efecto invernadero” sobre el clima que provoca esa forma de generar energía.

A fines de la época de los 90, esta concepción negativa sobre la industria nuclear, comienza gradualmente a cambiar, especialmente por la alerta que algunos científicos enunciaron respecto al cambio climático que provocaban las emisiones de carbono proveniente del consumo de combustibles fósiles.

El Comité INSAG (International Safety Nuclear Advisory Group) formaliza los nuevos enunciados de la seguridad nuclear, centrando el principio de “seguridad a las personas” como un aspecto básico a cumplir para los nuevos proyectos nucleares que comenzaron a prepararse. Y uno de los más importantes, según INSAG es la “adecuada selección del emplazamiento”, por cuanto si se presta adecuada atención a esa etapa, y se cumplen estrictamente todas las recomendaciones de INSAG, se pueden minimizar una parte importante de los riesgos de esta industria.

En lo referido al emplazamiento de las centrales nucleares, el documento INSAG-12 destaca que la preferencia por uno u otro sitio influye decisivamente en la seguridad de la central. La correcta elección debe responder a un balance de factores que se complementan, tales como los económicos, la aceptación del público y la seguridad. También menciona que tienen que preverse los cambios futuros que pudieran ocurrir en el emplazamiento durante toda la vida útil de la instalación.

Posteriormente el OIEA en el año 2003 hace una revisión de sus manuales teniendo en cuenta todos los principios y avances que se produjeron en el ámbito del conocimiento científico y tecnológico. En esta revisión (serie NS-R-3) se introducen nuevas recomendaciones al proceso de selección del emplazamiento, confirmando a este procedimiento como la tarea más importante para iniciar un proyecto nuclear.

6.2. Metodología para la Selección del Emplazamiento¹¹³

La complejidad de un proyecto de esta naturaleza hace necesaria una metodología flexible y generalista en un inicio, para después ajustarse a exigentes parámetros de seguridad que determinarán el emplazamiento definitivo para una central nuclear.

La cantidad de datos necesarios en un proceso de selección aumentan a medida que avanza el estudio de emplazamientos. Esto lleva a la necesidad de contar en etapas avanzadas, con un equipo de expertos en las diferentes disciplinas en las que se centrará el estudio. El

¹¹³ Ídem 109-111

estudio y evaluación de los emplazamientos de centrales nucleares involucra las siguientes etapas conforme a la Guía NS-R-3 del OIEA.

6.2.1. Selección;Error! Marcador no definido.

En esta etapa se realiza una investigación sobre una gran región en base a criterios simples y bien definidos. El objetivo general es obtener una representación completa de las diferentes zonas de la región para continuar el proceso de selección. Se utiliza información existente y disponible sobre algunas de las características necesarias de los emplazamientos para eliminar extensos territorios de la región de estudio de toda consideración.

El resultado de este proceso será un número considerable de emplazamientos potenciales, englobados en diferentes zonas aptas para la instalación. Se crea un catastro de todos aquellos posibles sectores en un país donde eventualmente se podrían instalar centrales nucleares, el cual se hace considerando los puntos geográficos que requieren de energía y aquellos que a priori reúnen las condiciones (por ejemplo, que tengan disponibilidad de agua, baja densidad poblacional, altos requerimientos de energía, etc.). Sobre la base del catastro se elige los sitios de interés sobre los cuales habría voluntad de iniciar un proyecto de generación núcleo-eléctrica. Solo en esta etapa pueden primar los aspectos estratégicos y económicos que siempre exige el inversionista. En términos generales se consideran los siguientes aspectos en esta etapa:

- Disponibilidad de agua.
- Distancia respecto a los centros a los cuales va destinada la energía eléctrica.
- Densidad poblacional de la zona.
- Las características naturales de la región que puedan contribuir a un adecuado depósito de sustancias radioactivas.
- Grado de dificultad para la ejecución de medidas ingeniero-técnicas necesarias por el desarrollo del proyecto.

6.2.2. Etapa de Caracterización

Esta etapa supone el estudio e investigación de los emplazamientos seleccionados en la etapa anterior para demostrar que son aceptables desde varios puntos de vista, en particular desde la seguridad. Se seleccionan todos aquellos sitios que reúnen las condiciones para la instalación de la central nuclear.

Para la selección final del sitio resulta importante considerar el acceso a los mercados energéticos, los planes de desarrollo de la región, el consentimiento de la población y el entorno político e institucional que acompaña a la decisión del emplazamiento de la central nuclear.

Un sitio será seleccionado si primero cumple con todos los requisitos relativos a la seguridad y luego si es preferido respecto a otros sitios en cuanto a los requisitos no relacionados con la seguridad.

Para llevar a cabo la selección final, es preciso disponer de la siguiente información:

- Características geológicas del sector.
- Características meteorológicas.
- Urbanización.
- Población, dinámica, densidad y su composición demográfica.
- Ciudades más cercanas y sus características.
- La estructura del Producto Regional Bruto y su dinámica.
- Balance energético de la zona y su potencia instalada.
- Información financiera respecto del desarrollo de la industria y la agricultura y su pronóstico futuro.
- Información respecto del mercado de consumo y su potencial en la región.
- Determinar aquellos factores sobre los cuales depende el desarrollo socioeconómico de la región.
- Determinar aquellos aspectos sociales, costumbre locales y educación que influyen en el comportamiento de la población.

En esta etapa queda seleccionada la ubicación definitiva del emplazamiento sobre el cual posteriormente se solicitarán los permisos respectivos a las autoridades correspondientes.

6.2.3. Etapa Pre operacional

Una vez seleccionado el emplazamiento, comienzan los trámites de solicitud de los permisos para construir una central nuclear de acuerdo al proyecto desarrollado por el inversionista. Esta solicitud es remitida a las autoridades ambientales de la región y a la Autoridad Nacional Regulatoria Nuclear. No obstante lo anterior, los estudios e investigaciones iniciados en etapas anteriores continúan perfeccionándose en el emplazamiento seleccionado. Esto sirve para completar y corregir la evaluación de las características del sitio. Los datos que se van obteniendo, permiten también completar la evaluación final del modelo a usar en el diseño de la central proyectada.

6.2.4. Etapa Operacional

Esta etapa corresponde al inicio de las obras de construcción una vez aprobado el proyecto por las autoridades ambientales y de Regulación y obtenido la debida Licencia para iniciar la construcción. Sin embargo, el estudio del emplazamiento continúa, incluso, cuando la central entra en operación. En realidad estos estudios continúan a lo largo de todo el ciclo de vida de la central. Esto permite monitorear algunas características que evolucionan con el paso del tiempo, como por ejemplo las condiciones demográficas en las cercanías de la central, las condiciones geológicas del suelo, las condiciones meteorológicas, etc., lo cual asegura ajustar a tiempo los mecanismos de seguridad diseñados ante cualquier cambio detectado.

6.3. Características de los emplazamientos relacionadas con la seguridad y no relacionadas con la seguridad

A lo largo de todo el estudio se revisan diferentes características de los emplazamientos. Se pueden distinguir al principio entre las relacionadas con la seguridad y las no relacionadas con la seguridad, teniendo siempre presente que es una definición arbitraria. Estas características y sus interrelaciones se pueden observar en las Figuras 6.1 y 6.2.

6.3.1. Características relacionadas con la seguridad

Estas características se pueden agrupar en 3 grandes grupos:

- **Físicas:** corresponden a las características del sitio que tendrán un impacto directo sobre la seguridad de la central, entre ellos se puede destacar la sismicidad de la zona, la capa superficial del terreno, los suelos, la actividad volcánica y el sumidero final de calor (en caso de Chile, lo lógico es que el sumidero sea el mar)

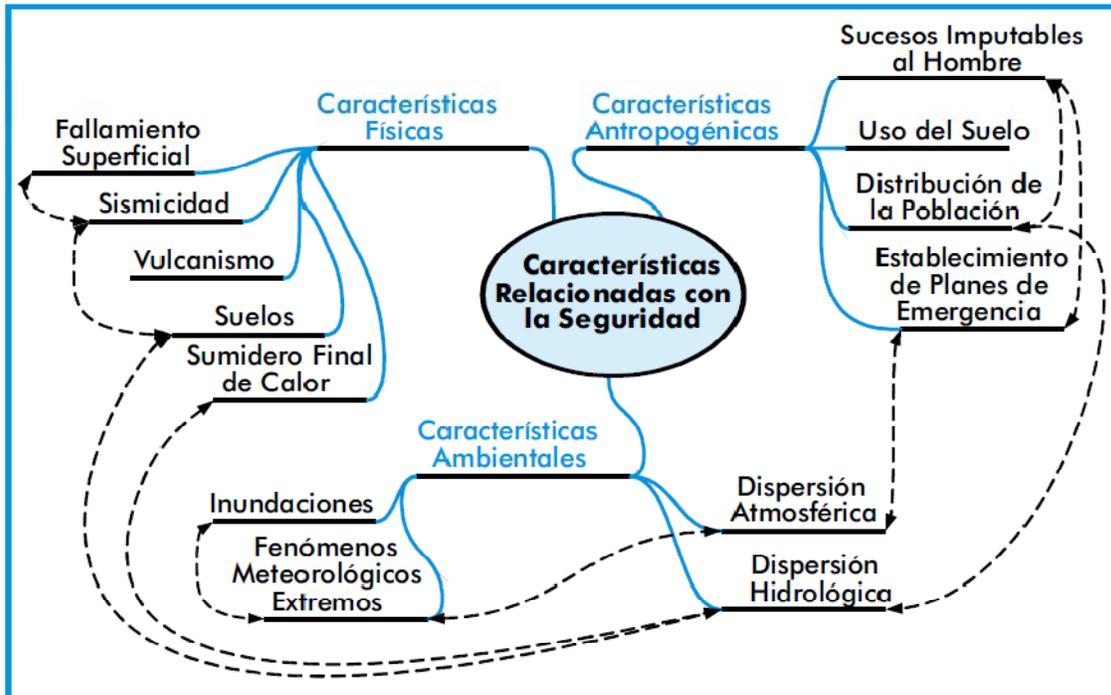


Figura 6.1 Características relacionadas con la seguridad y su interrelación

- **Antropogénicas:** corresponden a las actividades que lleva a cabo el ser humano en la zona, uso que se le da al suelo, distribución de la población y el establecimiento de planes de emergencia.
- **Ambientales:** están relacionadas con los fenómenos meteorológicos, los vientos predominantes, la posibilidad de inundaciones y las formas de dispersión de eventuales fugas.

Las características relacionadas con la seguridad establecerán la viabilidad para la instalación de una central nuclear en un emplazamiento determinado, mientras que las características no relacionadas con la seguridad darán el emplazamiento óptimo de acuerdo a los criterios de desarrollo que se sigan. Cabe destacar que en un sitio que no cumpla con las características relacionadas con la seguridad y que no puede ser compensado mediante características de diseño, será excluido de toda consideración.

El objetivo principal de la evaluación de los sitios en términos de seguridad nuclear es el de proteger a la población y al ambiente de las consecuencias radiológicas por eventuales fugas accidentales de radioactividad. Se deben tener en cuenta:

- Efectos de eventos externos que pueden afectar la seguridad.
- Características del sitio y su ambiente que podrían influir en su instalación.
- Características demográficas de la zona, y la implementación de medidas de emergencia.

Además de proveer la base técnica para los informes de seguridad -a ser remitidos a la Autoridad Regulatoria Nuclear-, la información obtenida permite realizar la evaluación de impacto ambiental sobre al riesgo radiológico.

6.3.2. Criterios a considerar no relacionados a la seguridad

Básicamente son:

- **Criterios económicos:** son aquellos costos que influyen directamente sobre la inversión a realizar y los costos de operación y mantenimiento. Entre ellos se puede citar la distancia a la red de distribución eléctrica, la distancia a las vías de transporte, el sistema de refrigeración que se utilizará (refrigeración de “paso único”, con “torres de enfriamiento” o mixto).
- **Criterios sociales y legales:** están relacionados a la legislación vigente, a la formación de recursos humanos y al uso del suelo que se le da a la zona donde se emplazará la central.

- **Criterios ambientales:** estos criterios son todos aquellos que están relacionados con los posibles impactos ambientales que ocasionará la futura instalación y la mitigación y control de los mismos.

Son claras las interrelaciones que se dan entre las características relacionadas con la seguridad y las no relacionadas con la seguridad. Si por ejemplo se elige que el tipo de refrigeración de la central sea de paso único, esto influirá directamente en la localización de la central, los análisis de dispersión hidrológica, el estudio del sumidero final de calor y los impactos ambientales que se deberán estudiar.

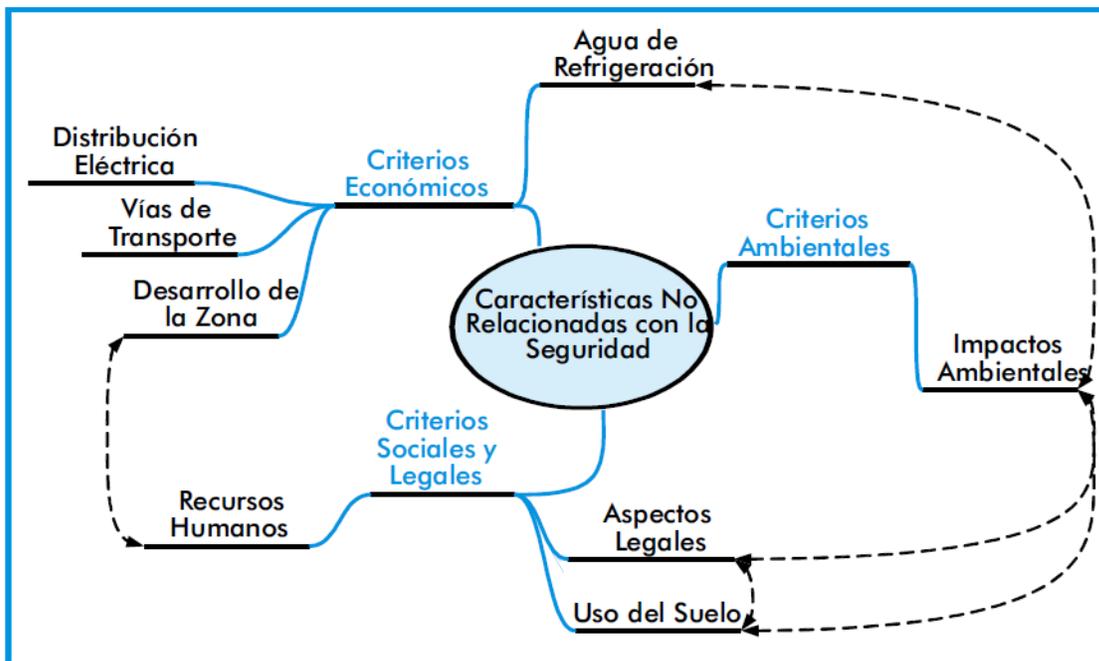


Figura 6.2. Caracterización de los emplazamientos no relacionados con la seguridad.

6.4. Factores socioeconómicos a considerar

6.4.1. Red de distribución eléctrica

La distancia entre la central generadora y los potenciales consumidores, y la presencia de infraestructura adecuada de una red de distribución, determinan el esquema final de distribución desde la central nuclear hacia los consumidores. Un criterio importante a tener en cuenta para la selección del emplazamiento, es la presencia o ausencia de una adecuada red eléctrica a fin de no entrar en grandes gastos para asegurar la distribución eléctrica.

6.4.2. Condiciones de transporte

La existencia de vías férreas, carreteras, vías fluviales o marítimas, cerca del emplazamiento permitirá reducir los gastos de construcción de la infraestructura vial que se requiere para transportar hacia el emplazamiento todos los elementos que componen una central nuclear, desde el reactor, turbinas, etc. Muchos de ellos constituyen piezas de gran tamaño, por lo tanto hay que considerar este aspecto para la logística del transporte durante la etapa de construcción de la central y también durante todo su período de operación.

6.4.3. Condiciones sociales

La ubicación del emplazamiento de la central nuclear cerca de las localidades de una ciudad o poblado, permitirá reducir los gastos para la construcción de viviendas e infraestructura social para los trabajadores vinculados a la construcción y operación de la central nuclear. Esto permitirá elevar el nivel de adaptación de las familias de los trabajadores de la central nuclear. En caso contrario hay que considerar la creación de un poblado en campo abierto para asegurar las condiciones sociales del personal.

La presencia de centros de poblado cerca del emplazamiento de la central nuclear permite utilizar el vapor resultante de la operación para calefacción de la población o para desalinizar agua de mar, provocando con ello un efecto socioeconómico adicional.

6.4.4. Información respecto a la región

La existencia de estudios e investigaciones ingenieriles realizadas en los emplazamientos seleccionados permite reducir los plazos de las investigaciones de ingeniería y de la preparación del terreno para la construcción, aumentando la exactitud de los cálculos preliminares realizados y reduciendo las inversiones que se requieren en esa etapa.

6.5. Factores naturales que limitan la elección de un emplazamiento

Desde el punto de vista de factores naturales que influyen en la decisión de elegir un emplazamiento, hay dos criterios básicos a considerar:

6.5.1. Los factores que prohíben

6.5.1.1. Agua

Si no hay agua, sea esta dulce o salada, no se puede construir una central nuclear.

6.5.1.2. Geológicos

Bajo ninguna circunstancia se debe construir una central nuclear en un emplazamiento cuyo terreno tenga fallas geológicas activas. Se trata de uno de los factores que requiere mayor cuidado, planificación e inyección de recursos para los estudios respectivos, que en promedio no toman menos de 12 meses de desarrollo. Si bien la tecnología moderna ha sido capaz de desarrollar sistemas de seguridad activa y pasiva capaces de enfrentar con éxito cataclismos naturales de cuya magnitud no se tiene registro histórico, así como accidentes o atentados terroristas, la prudencia aconseja desestimar posibles emplazamientos ubicados sobre fallas geológicas activas, calidad inadecuada del suelo u otros similares. Para ello es necesario realizar mediciones que consisten básicamente en colocar sensores especiales en el sitio elegido y monitorear la actividad geológica y sísmica por medio de la detección, registro y análisis de las vibraciones del suelo.

6.5.2. Los factores que limitan

Son aquellos factores naturales que eventualmente pueden limitar pero no impedir la construcción de una central nuclear. Esto significa que para llevar a cabo el proyecto propuesto, en este contexto se ha de considerar el uso de tecnologías adicionales que habitualmente encarecen el presupuesto inicialmente definido. De la lista de factores naturales que limitan en la selección del emplazamiento se distinguen las condiciones sísmicas e hídricas.

6.5.2.1. La sismicidad¹¹⁴

Aquellos sectores cuya sismicidad es igual o superior a 7 puntos en la escala MSK, son considerados como un factor limitante para seleccionarlos como emplazamiento. Sin embargo la factibilidad de iniciar un proyecto nuclear en tales regiones es enteramente

¹¹⁴ Apreciación del peligro sísmico de las partes de la instalación de las instalaciones nucleares y los de peligro radiacional en razón de los datos geodinámicos, Norma RB-019-01, Academia de Ciencias Estatal de Rusia, M. 2001.

posible, pero exigirá el uso de tecnología especial, construcción de edificios y el uso de equipamiento con requerimientos anti-sísmicos. Esto conlleva al encarecimiento del proyecto en un 10% por cada punto de sismicidad a partir del grado 7 de la escala de MSK.

Si bien Chile es una de las naciones del mundo que cuyo territorio presenta mayor índice de actividad sísmica, su diversidad geográfica ofrece una serie de potenciales emplazamientos donde este riesgo no representa amenazas con la actual tecnología disponible y, por el contrario, ofrecen otras ventajas importantes para la planificación de un proyecto de estas características. Esto se ve en la zona norte desértica de Chile a orilla del océano pacífico, en donde la presencia de agua, requisito indispensable, es abundante; la baja densidad demográfica, significa un bajo impacto social al proyecto, y el suelo montañoso de la cordillera de la costa, permite la creación futura de efectivos y seguros depósitos finales de desechos radioactivos.

Sin embargo la alta actividad sísmica de Chile es tal vez el factor de riesgo más importante a la hora de analizar la opción nuclear. Siendo esta una materia en la que no existen más que aproximaciones, sobre la base de experiencias en lugares que no presentan índices como los de Chile, resulta interesante la opinión del Ingeniero civil geográfico chileno Rodolfo Godoy, quien señala:

"Chile es una de las tres naciones más sísmicas del mundo, de hecho es en nuestro país donde se ha experimentado el movimiento telúrico mas fuerte a nivel mundial desde que existen registros; el terremoto de Valdivia (año 1960), que tuvo una magnitud de 9.5 grados en la escala de Richter, es quien ostenta el triste record. Para tener una idea de lo que esto significa, hay que recordar el sismo del año 1985, que afecto principalmente a la regiones Quinta y Metropolitana, el cual "solo" registro 7.7 grados Richter; o él gran terremoto de junio del 2005 ocurrido en el norte grande, el cual anotó 7.9 grados en igual escala. (...) Otra de las naciones sísmicas que integran la lista es Japón, el cual es azotado por grandes terremotos con un promedio muy similar al de Chile. Sin embargo, la matriz energética de los japoneses es bastante distinta a la nuestra, ya que cuentan con 55 centrales nucleares en operación y una en construcción, con las que generan el 30% de la energía eléctrica que consumen.

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; pero debido a las extremas medidas de seguridad con que se edifican, estas resultaron

absolutamente ilesas. Además, como medida de protección, sus reactores se detuvieron 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.

Otro notable ejemplo de convivencia entre energía nuclear y regiones altamente sísmicas es Taiwán, quien con alta ocurrencia de fenómenos telúricos y es de un tamaño similar al de la VIII Región de Chile y posee 6 centrales nucleares.

Si bien la naturaleza es impredecible y en ocasiones altamente destructora, los ejemplos mundiales y los elevados estándares de seguridad internacional en construcción de centrales permiten responder positivamente una de las interrogantes planteada en Chile respecto a si se puede o no construir centrales nucleares de potencia.

6.5.2.2. Los recursos hídricos disponibles

Tal como se indicó anteriormente, uno de los criterios que limitan la elección de un emplazamiento definitivo es sin duda el hidrológico. Es de máxima prioridad garantizar el suministro permanente del volumen adecuado de agua para lograr una correcta refrigeración de la central nuclear.

Las necesidades de agua de una central nuclear dependen, en primer orden, de la elección que se realice del modo de refrigeración de los condensadores de la central nuclear (de paso, estanque de enfriamiento, torres de enfriamiento, enfriadores aéreos y radiadores, etc.).

El sistema más eficaz y seguro es el “de paso”. Se aplica para aquellas centrales ubicadas a orilla del mar o de grandes ríos. Sus ventajas radican en los bajos costos de construcción de obras y bajo costo de operación. Este sistema se utiliza ampliamente en países de Europa como Francia, Gran Bretaña, Suecia y Finlandia.

La necesidad de garantizar el abastecimiento de agua para una central nuclear, requiere también conocer en detalle los requerimientos de consumo, que están asociados a los siguientes sistemas de refrigeración propios de cualquier central nuclear:

- Sistema de refrigeración de los equipos de la turbina (condensadores de las turbinas y los consumidores auxiliares de la Sala de Máquinas), que absorben el calor de los condensadores y de la parte del equipamiento auxiliar.
- Sistema de refrigeración de los consumidores importantes de la central eléctrica de reserva diesel, que absorben el calor de los sistemas de seguridad de la sección del reactor.
- Sistema de refrigeración de los consumidores no importantes, que absorbe el calor del equipamiento auxiliar de la sala de máquinas de la sección del reactor y otros consumidores del área industrial de la central nuclear.

El gasto general del agua de refrigeración en todos los sistemas de refrigeración para una central nuclear de 1.000 MW es del orden de 4.400.000 m³/24 horas.

Para la reposición de las pérdidas de agua en los sistemas de refrigeración por rotación (pérdidas por evaporización, arrastre y soplado) y el aseguramiento de las necesidades de agua técnica de la central (necesidad de la limpieza química del agua) está previsto un sistema para el suministro de agua técnica. Para asegurar el agua técnica se prevé un gasto de 0,8 - 1,2 m³/s. por reactor. El consumo de agua de enfriamiento de una central nuclear con una potencia de 1.150 MW con refrigeración del sistema básico y auxiliar con torres de enfriamiento y de los consumidores importantes en piscinas con rociadores, se muestra en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Consumo de agua de una central nuclear¹¹⁵

Pérdidas	Unidad de Medida	Cantidad		Pérdidas medias-anales
		En verano	En invierno	
Pérdidas en torres:				

¹¹⁵ Informe técnico « Realización de las investigaciones de ingeniería con el objetivo de la preparación previa para el proyecto de la construcción de la central nuclear.

Pérdidas	Unidad de Medida	Cantidad		Pérdidas medias-anales
		En verano	En invierno	
<ul style="list-style-type: none"> • 1 bloque energético 	m ³ /h	2.317	1.501	1.885
<ul style="list-style-type: none"> • 2 bloques energéticos 	m ³ /h	4.634	3.002	3.770
Pérdidas en piscinas rociaderas				
<ul style="list-style-type: none"> • 1 bloque energético • 2 bloques energéticos 	m ³ /h	106	92	97
	m ³ /h	212	184	194
Consumidores de toda la central (para extinción de incendio y tratamiento de agua)				
<ul style="list-style-type: none"> • 1 bloque energético 	m ³ /h	105	105	105
<ul style="list-style-type: none"> • 2 bloques energéticos 	m ³ /h	210	210	210
Sistema de rotación de purga				
<ul style="list-style-type: none"> • 1 bloque energético 	m ³ /h	1.730	1.119	1.294
<ul style="list-style-type: none"> • 2 bloques energéticos 	m ³ /h	3.460	.238	2.588
Eliminación de aguas residuales:				
<ul style="list-style-type: none"> • - 1 bloque energético 	m ³ /h	115	115	115
<ul style="list-style-type: none"> • 2 bloques energéticos 	m ³ /h	230	230	230
Consumo total de agua:				

Pérdidas	Unidad de Medida	Cantidad		Pérdidas medias-anales
		En verano	En invierno	
<ul style="list-style-type: none"> • - 1 bloque energético 	m ³ /h	4.373	2.932	3.496
<ul style="list-style-type: none"> • 2 bloques energéticos 	m ³ /h	8.746	5.864	6.992

6.6. La experiencia de la Federación de Rusia en la selección del emplazamiento

En Rusia los criterios a emplear para seleccionar un emplazamiento seguro son similares a lo ya descrito en el presente capítulo. Sin embargo dada la especial importancia que se le da en ese país al análisis de las condiciones naturales y tecnógenas del sitio, y Chile, por su condición de país altamente sísmico, es que a continuación detallamos los criterios a considerar por los que se rigen los especialistas antes de elegir el emplazamiento final. Estos criterios están regulados por 3 normas de la Autoridad Reguladora Nacional:

- NP-032-01 "Normas que determinan la ubicación de las centrales nucleares. Criterios y exigencias de garantías de seguridad";
- NP-031-01 "Normas para el diseño de las centrales nucleares sismo resistentes";
- NP-064-05 "Normas para garantizar acciones externas de origen natural y tecnógeno de la central nuclear".

Y los principales criterios utilizados que se desprenden de esas normas, son:

- características de la actividad tectónica de la región de ubicación de la central nuclear;
- ubicación de fracturas, rupturas, ante posibles terremotos;
- velocidades y gradientes de los movimientos de la corteza terrestre del sitio;
- las características de las vibraciones iniciales del terreno en el evento de un terremoto máximo;

- peligro de deslizamientos del suelo ante pendientes cercanas, considerando las condiciones del terreno y movimientos sísmicos considerando intensidad de terremoto grado 9 puntos en la escala de MSK;
- posibilidad del desarrollo de procesos cárnicos (termocárnicos), y de sufosión en la corteza;
- determinar la influencia en la seguridad de la central nuclear del aumento del nivel de las aguas subterráneas, y el sumergimiento del emplazamiento durante la difusión del caudal de aguas subterráneas, la filtración de las tierras irrigadas, escurrimientos de aguas, precipitaciones atmosféricas, el deshielo;
- intensidad de las tormentas y huracanes, valores máximos de velocidad de la rotación y de la velocidad progresiva de movimiento del vórtice, cambios de presión entre la periferia y el centro del embudo del vórtice;
- se determina el nivel máximo de agua a que puede llegar el sitio, y la duración de una posible inundación durante las precipitaciones, deshielo o tormenta;
- se evalúan las características de una eventual inundación a causa de un tsunami o al exceso de oleaje por tormentas teniendo en cuenta las condiciones sismo-técnicas, la configuración de la costa, los deslizamientos y el desmoronamiento de tierras al agua.

Conclusiones

El proceso de selección del emplazamiento para la construcción de una central nuclear, constituye un procedimiento complejo de valoración de diferentes variantes para su instalación. Si bien hay impactos inherentes al lugar mismo del emplazamiento, los cuales pueden ser menores y eventualmente subordinados al proyecto mismo gracias a los avances científicos y tecnológicos desarrollados durante las últimas décadas a partir de la experiencia recogida en los dos únicos accidentes registrados a la fecha, el factor más importante en esta materia es la elección apropiada del lugar, para lo cual se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Garantizar la seguridad nuclear y radiológica de las personas.
- Integración de la central nuclear a la red de transmisión de energía.
- Características geológicas, sísmicas y tectónicas del emplazamiento.
- Características hidrológicas y meteorológicas.
- Opinión pública.
- Aspectos socio-demográficos.
- La valoración de las consecuencias ambientales de la ejecución del proyecto.
- Infraestructura local disponible.
- Aspectos jurídicos, uso del suelo, etc.

La selección del emplazamiento debe ser hecha a partir de un análisis extenso y sistemático de todos los factores indicados arriba y su comparación objetiva para la selección de la variante más conveniente.

Es necesario destacar que todo proyecto de emplazamiento de una central nuclear ha de contar con la adecuada difusión a la población de sus características y ventajas sociales y económicas para la zona donde se realizará, dado que la oposición a priori de un sector de la sociedad, se debe básicamente a desinformación o publicidad contraria por parte de organizaciones antagónicas.

Determinar adecuadamente el emplazamiento de una central nuclear es sin duda el aspecto más crítico de la primera etapa del proyecto y está relacionado directamente con el mayor o menor riesgo de accidente que se tendrá a futuro. Si se cumplen todas las recomendaciones por parte del OIEA y la INSAG, el riesgo se minimiza, con lo cual, en esas circunstancias, al compararla con otras fuentes de energía limpia, como la hídrica, por ejemplo, los riesgos se hacen similares, por cuanto ambos sistemas son potencialmente peligrosos si sobreviene una catástrofe, la nuclear por fuga radioactiva que afecta a la salud humana y la hídrica por destrucción de la represa, que conlleva una destrucción masiva de aquellas poblaciones ubicadas en la dirección del río.

Comparar la energía nuclear con las fuentes eólicas y solares, consideramos que no tiene sentido, básicamente por la diferencia notable que hay en la cantidad de superficie usan una y otra y los altos costos de inversión de estas últimas.

Si comparamos la energía nuclear con las fuentes fósiles, la superficie a ocupar son similares en ambas, por lo tanto en ese sentido el impacto es similar en la etapa de construcción. El riesgo de un eventual accidente, es mucho mayor en la nuclear por las características del combustible que usa, pero este se controla con las medidas de seguridad que existen y que han demostrado a la fecha ser eficaces. Sin embargo si consideramos el impacto sobre el medioambiente durante la operación de ambos sistemas, es considerablemente más alto el impacto que ejercen los combustibles fósiles, por lo que la practica internacional recomienda restringir drásticamente su uso.

Bibliografía

- 6.1.- Instalación de las centrales nucleares. Los criterios básicos y las exigencias por el aseguramiento de la seguridad” (NP-032-01), ACE de Rusia, M. 2001
- 6.2.- La apreciación del peligro sísmico de las partes de la instalación de los objetivos nuclear y radiacional en razón de los datos geodinámicas. RB-019-01», ACE de Rusia, M. 2001.
- 6.3.- Las exigencias básicas a la composición y al volumen de las investigaciones en la selección del sitio y el emplazamiento de la central nuclear (art. 4.1 SPPNAE-87), Moscú, 2000.
- 6.4.- Dirección de la elaboración y el contenido de la argumentación de la seguridad ecológica de la central nuclear (Departamento de Seguridad Ecológica de la Central Nuclear de Rusia -91).
- 6.5.- Código sobre la seguridad de las centrales nucleares: Emplazamiento, 50-C-S, OIEA, Viena, 1989.
- 6.6.- Basic safety principles for nuclear power plants: 75-INSAG-3 rev. 1(INSAG-12), Report by the International Nuclear Safety Advisory Group, IAEA, Vienna, 1999.
- 6.7.- Site evaluation for nuclear installations: safety requirements NS-R-3, IAEA, Vienna, 2003.
- 6.8.- Barbarán G. A., Estudios de localización para el emplazamiento de nuevas centrales nucleares en Argentina, Comisión Nacional de Energía Atómica

Capítulo 7

Impacto Ambiental

7.1. Consideraciones de carácter general

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 adecuado 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 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 núcleo-eléctrica 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 de energía 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 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 de energía.
- **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 más adelante (ver sección 7.5).

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 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.

7.2. Comparación del impacto ambiental entre las diferentes fuentes de energía¹¹⁶

Las diferentes fuentes y tecnologías energéticas utilizadas para la generación eléctrica tienen impactos ambientales muy distintos. Por ello, en esta parte 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.

Como se menciona reiteradamente a lo largo del estudio, el carbón, el petróleo y en menor grado el gas, son los mayores responsables de la generación de emisiones nocivas. De acuerdo con la Tabla 1.5 del presente estudio el carbón en particular provee actualmente en el mundo un 40% de la energía eléctrica y las fuentes fósiles en su conjunto un 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, tanto en Chile como en el resto del mundo, en cuanto al compromiso que deben tomar los 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).

¹¹⁶ Kryshev I.I., Rjazantsev E.P. Seguridad ecológica del complejo energético-nuclear de Rusia. Moscú: IzdAT. 2000. 384 págs.

Para lograr este propósito, es necesario que la evaluación rigurosa de las diferentes fuentes de energía 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. 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 y sus áreas guardan una estrecha relación con la densidad de energía que se utilice. Así, en la Tabla 7.1 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
Eólica	5.000 - 15.000

Tabla 7.1 - Comparación entre fuentes de energía por superficie de terreno¹¹⁷.

¹¹⁷ Elaboración propia a partir de información suministrada por documentos del Foro Nuclear Español y el OIEA (Sustainable Development Nuclear Power, 1997:

En la Tabla 7.2¹¹⁸ se recoge el consumo de combustible y los residuos producidos en centrales térmicas (carbón, fuel oil y nuclear), donde se releja la influencia de la densidad energética de los combustibles considerados.

Tabla 7.2 - 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
Escorias, toneladas	69.000	Mínimo	Cero
Cenizas volantes, toneladas	377.000	Cero	Cero
Radiación: gases, Curies/año	0,026	0,001	1,85
Radiación: líquido, Curies/año	Cero	Cero	0,1

<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.

¹¹⁸ Nucleonor, España.

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-Kariwa¹¹⁹, 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 baja densidad de energía de las fuentes renovables, medida por los requerimientos de terreno por unidad de energía producida, ha demostrado que el área necesaria es significativamente mayor y está determinada por los requerimientos locales y las condiciones climáticas. Un ejemplo de esto se aprecia en la Imagen 7.2.



Imagen 7.1 - Vista área de la Central Nuclear Kashiwazaki-Kariwa en Japón con 8.212 MW de potencia instalada.

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



Imagen 7.2 - 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 7.2 y 7.3.

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.

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.



Imagen 7.3 - Represa Hidroeléctrica de Itaipú. El lago artificial tiene 29 millones de m^3 de agua, con unos 200 Km de extensión en línea recta y un área aproximada de 1.400 Km^2 . La potencia instalada es 12.900 MW, con 18 turbinas generadoras de 700 MW cada una.

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 fútbol), **recuerde que la central nuclear japonesa tiene 8.212 MW y sólo ocupa 420 Ha.**

En la Tabla 7.3¹²⁰ se presenta la comparación de emisiones al medioambiente por diferentes fuentes de energía y a partir de ella se harán los análisis correspondientes.

Tabla 7.3 - Comparación del impacto ambiental de las diferentes formas de producir electricidad (en toneladas por GWh producido). (TR - Trazas)

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

¹²⁰ US Department of Energy, Council for Renewables Energy Education and Worldwatch Institute.

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 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 7.2, 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 gas¹²¹.

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.

¹²¹ **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.**

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



(a)



(b)

Imagen 7.4 - *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.

7.3. 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/año¹²²; 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 7.1 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

¹²² Sv, Sievert. Unidad de medida de radiación absorbida por la materia orgánica. 1 SV equivale a 1 Joule/Kg de radiación absorbida.

radioactividad, y comparando sus resultados con los que se establecieron como línea base en el proceso de selección del emplazamiento de la central nuclear.

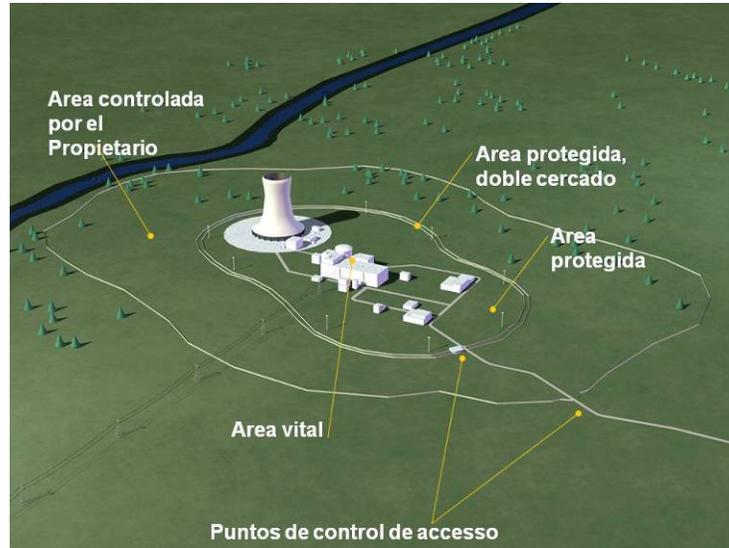


Figura 7.1- Representación esquemática de las zonas de seguridad para una central nuclear

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 ambiental 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 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 (ver Figura 7.2).

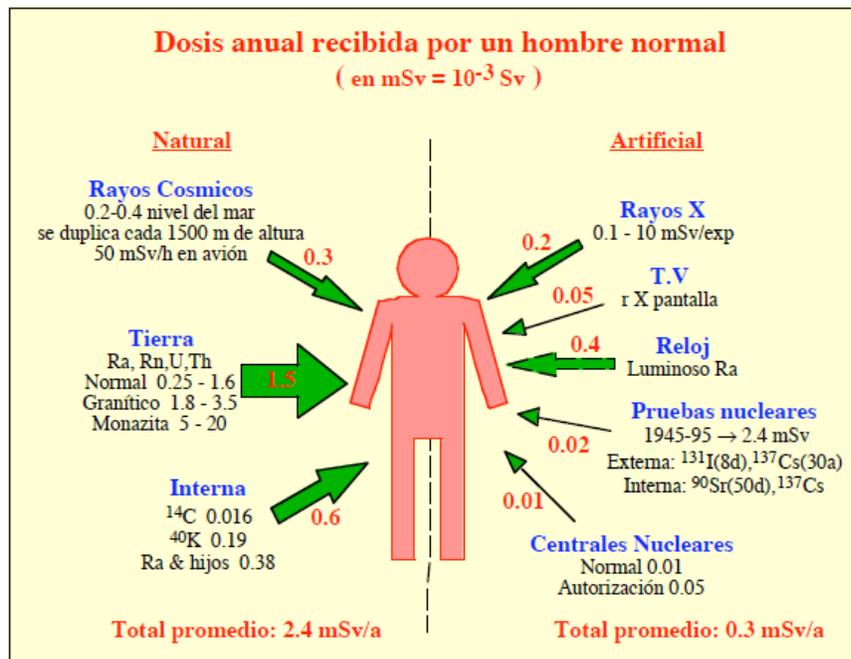


Figura 7.2 - Dosis anual de radiación recibida por un hombre normal (Fuente: Foro Nuclear de la Industria Española).

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 7.3 se presenta una de las soluciones técnicas para reducir esta contaminación.

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 central¹²³.

¹²³ http://www.tepco.co.jp/en/env-com/environment/report/env_sec/local/ka_35-02-e.html



Figura 7.3 - Representación esquemática de la toma de agua de mar a profundidad.

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)¹²⁴. 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.

7.4. 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 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.

¹²⁴ <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).

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.

7.5. 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 ENRESA¹²⁵ se presenta en la Figura 7.4.

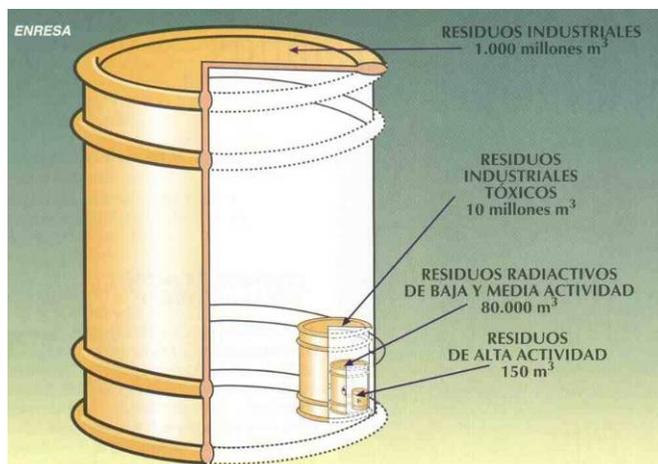


Figura 7.4 - Comparación de la generación anual de desechos en la Unión Europea.

Un análisis para el caso particular de la industria eléctrica se puede apreciar en la Figura 7.5 donde se recoge el tipo de desecho y su volumen por GW generado.¹²⁶

¹²⁵ 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.

¹²⁶ 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)

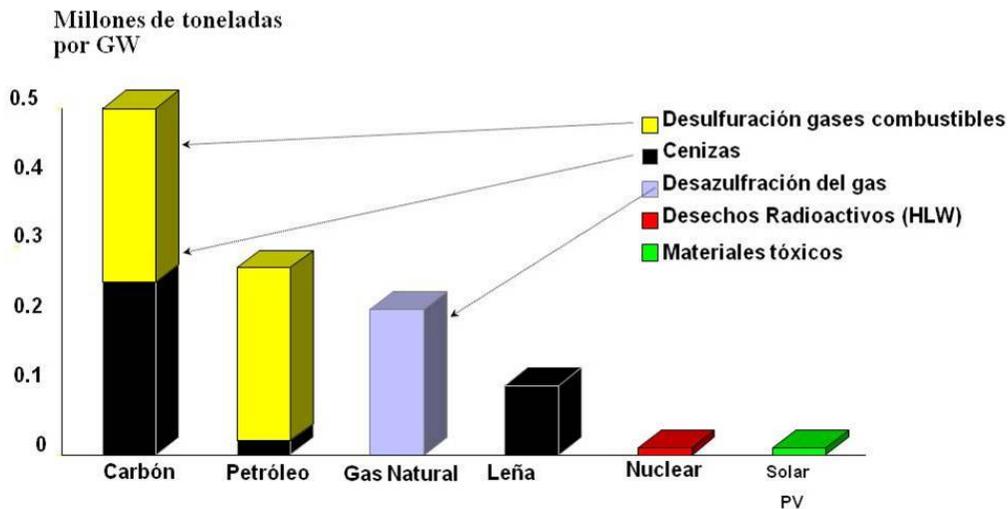


Figura 7.5 - Desechos anuales producidos en la elaboración del combustible y el funcionamiento de las centrales eléctricas.

7.5.1. Los desechos radioactivos; Error! Marcador no definido.

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.
- **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 mas de 40 años.

7.5.1.1. Desechos radioactivos producidos por las centrales nucleares^{127, 128}.

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.** De ellos se derivan dos tipos de residuos:
 - Residuos de 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 otro. 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 transmutación, para reducir la radioactividad de los mismos y los tiempos de vida media.

¹²⁷ Factors Relevant to Recycle or Reuse of Components Arising from the Decommissioning and Refurbishment of Nuclear Facilities: Technical Report Series 293, Vienna. IAEA, 1988.

¹²⁸ MacLauchlan A., NEA Study Finds Waste Weight is Key to Decommissioning Cost. Nucleon Weeks, 32, No. 42, P. 1-9.

- **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.¹²⁹

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.

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.

¹²⁹ Curie, antigua unidad de medida de la radioactividad. 1 Curie es igual a $2,2 \times 10^{12}$ desintegraciones por segundo.

Los residuos de alta actividad contienen desechos más 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.

7.5.1.2 Tratamiento de los desechos radioactivos

La principal razón para separar los residuos nucleares en diferentes categorías es que su tratamiento y, fundamentalmente su disposición final, depende de eso. Los residuos de baja actividad, luego de ser compactados y colocados en un contenedor metálico inoxidable, a su vez rodeado de un segundo contenedor de hormigón, pueden guardarse de manera segura en un emplazamiento en superficie. Si bien no se trata de sustancias con un grado de peligrosidad importante, dicho sitio debe ser mantenido hasta 100 años. Existen numerosos estudios y abundante experiencia que indica que este es un procedimiento seguro y que por la forma en que se ha diseñado, este doble mecanismo puede resistir sin dificultad durante este lapso de tiempo. Esto es, esencialmente, lo que se hace en todo el mundo, desde hace varias décadas, por ejemplo, con algunos residuos hospitalarios radiactivos.

Los residuos de media actividad en general se dividen entre los de vida media corta y los de vida media larga. Los primeros también pueden ser almacenados en superficie, en las mismas condiciones que los de la categoría anterior. Los de vida media larga requieren cuidados por un lapso mayor, por lo que resulta conveniente tratarlos de la misma manera que aquellos del grupo de alta actividad.

El tratamiento de los residuos de alta actividad es el que plantea mayores desafíos y controversias. Es posible identificar dos etapas en el tiempo. Una primera etapa -de unas pocas decenas de años- en que los residuos permanecen dentro de piscinas o silos refrigerados para disminuir el calor que liberan. Esto se debe a que el combustible usado contiene algunas sustancias de vida media corta y de alta radiactividad aún. Por ello, antes de pasar a la etapa siguiente es necesario permitir que se desintegren esas sustancias con la consiguiente liberación de calor. La segunda etapa es la del almacenamiento definitivo, que debe mantenerse en condiciones seguras por plazos superiores a 10.000 años.

Una buena parte del combustible usado por las centrales nucleares en el mundo se encuentra aún en la primera etapa de este proceso, por lo que los residuos de alta actividad suelen encontrarse en piscinas dentro del propio recinto de la central.

Para avanzar hacia la segunda etapa, los países que actualmente poseen la tecnología nucleoelectrónica han definido diferentes caminos, a saber: el reciclado o reprocesamiento del combustible usado, la conservación de los residuos en depósitos intermedios a la espera de avances tecnológicos para simplificar su gestión, o directamente a almacenar en forma definitiva los residuos.

La posibilidad de reciclar el combustible usado se basa en extraer la potencialidad como combustible que aún posee. El 95% del combustible quemado es uranio 238, que fue un mero espectador de la reacción en cadena dentro del reactor. El resto se divide en dos grandes categorías: un 4% son los productos de la fisión del uranio 235 y el 1% restante está formado por una serie de compuestos, llamados actínidos, que se produjeron debido a la captura de un neutrón por parte de un núcleo de uranio 238. La mayoría de estos productos son radiactivos. Dentro de los actínidos, el que más se produce es el plutonio pero también se generan los llamados actínidos menores, como el americio, el neptunio y el curio, todos ellos altamente tóxicos y con una larga vida media. Tanto el uranio 238 como el plutonio, es decir el 90% del residuo, pueden transformarse a su vez en combustible para futuras centrales nucleares.

El reciclado de los residuos nucleares presenta dos ventajas comunes a todo proceso de reciclado. Por un lado, permite la utilización de sustancias que de otra manera se perderían y por otro, disminuye la carga tóxica de los residuos, al extraer, por ejemplo, el plutonio

que es la sustancia más tóxica contenida en ellos. También aparecen nuevos problemas como los riesgos derivados del transporte y la manipulación. Más aún, ante la evidencia que, por razones tecnológicas y económicas, no es esperable que en todos los países se instalen plantas para reciclar combustible. A modo de ejemplo, a partir del reciclado de los residuos en Francia se obtiene la sustancia denominada MOX (un tipo de combustible que aprovechando el plutonio que resulta de quemar el uranio es mezclado en un pequeño porcentaje con uranio poco enriquecido) la que es a su vez utilizada como combustible de algunas de sus centrales.

En la Figura 7.5^{130, 131, 132} se aprecia la disminución de la cantidad acumulada del combustible nuclear utilizado y otros desechos nucleares en Francia, gracias a los perfeccionamientos tecnológicos y al reprocesamiento.

El proceso de reciclado produce a su vez residuos (a veces denominados “cenizas”) que si bien ocupan un volumen menor, siguen siendo altamente radiactivos. Estos residuos contienen los actínidos menores y productos de fisión del uranio que también presentan largas 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 m³ de residuos de alta actividad vitrificados por cada tonelada de metales pesados, lo que implica que el reprocesamiento del combustible usado de un año de una central de 1.000 MW pueda llevar a un volumen de 15 a 20m³ de residuos vitrificados de alta actividad.

¹³⁰ Krakowski R. A., Bathke C. G. Reduction of Worldwide Plutonium Inventories Using Conventional Reactors and Advanced Fuels: A System Study. Los Alamos. 1999. P.67.

¹³¹ Poplavsky V. M., Usanov V. I., Chebeskov A. N., et al., Evaluación de la eficiencia de las medidas para la disminución del riesgo de difusión de los materiales dividibles en base a los modelos periciales del análisis de sistema. Energía Nuclear. Vol.91. Lanz.5. Noviembre. 2001. 354-362 págs.

¹³² Ptisyna N.V., Chitaikin V.I., Shibarshov L.I. Plutonium and its Chemical Compounds: the Problems of Nuclear Weapons Non-Profleration. Managing Plutonium Surplus. P.157-170. Kluwer Academic Publishers.

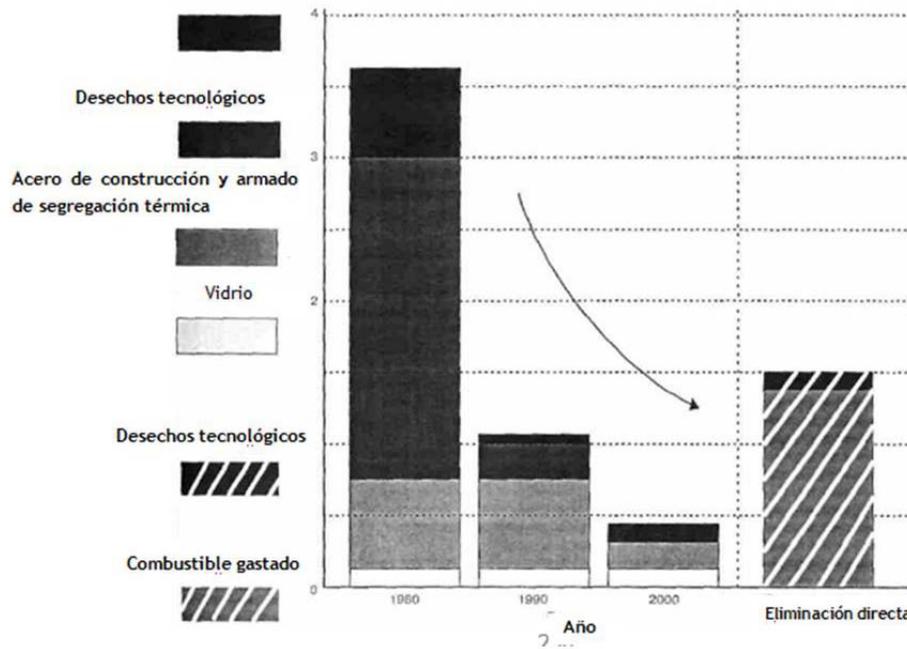


Figura 7.5 - Disminución de los desechos radioactivos en el reprocesamiento del combustible nuclear gastado en las centrales nucleares de Francia.

En el mundo, países como Francia, Japón, Inglaterra y Rusia, entre otros, han optado por reciclar el combustible usado para extraerle el uranio y el plutonio. Otros como Estados Unidos, Canadá, Suecia o Finlandia todavía disponen el “combustible quemado” sin reciclar.

Otro camino para avanzar hacia el almacenamiento definitivo, es la conservación de los residuos en depósitos transitorios, diseñados para resistir sin dificultades durante dos o tres siglos, a la espera de que se terminen de desarrollar soluciones tecnológicamente más avanzadas que permitan modificar las características de los residuos, reduciendo de manera significativa su carga tóxica, y, por ende, su tiempo de almacenamiento forzado en condiciones muy controladas. Un ejemplo de ello es el Almacén de Desechos Radioactivo del El Cabril en España que se muestra en la imagen 7.5.



Imagen 7.5 - Centro de Almacenamiento de Desechos Radioactivos "El Cabril", España.

Una de las estrategias tecnológicas en estudio consiste en separar los diferentes elementos tóxicos y radiactivos que aún subsisten en los residuos reciclados, como los actínidos menores y los productos radiactivos de la fisión del uranio 235, e intentar transmutarlos en sustancias con vidas medias más cortas. Cabe destacar que dada la relación entre la vida media y la actividad de una sustancia, el acortamiento de la vida media por la transmutación producirá un mayor nivel de actividad. Desde el punto de vista de la física, esta transmutación es un proceso bien conocido, pero aún no se ha puesto en marcha a escala industrial por cuestiones fundamentalmente económicas. En caso que se consiguiera hacer operativa esta práctica, posterior al reciclado de los residuos radiactivos, se obtendría un avance mayúsculo: reducir los períodos de almacenamiento de los residuos de 10.000 años o más a sólo 100 años, que son lapsos semejantes a los de almacenamiento de los residuos nucleares hospitalarios y de otras ramas industriales.

El tercer camino referido más arriba es proceder directamente a la disposición final de los residuos utilizando los conocimientos tecnológicos actuales. A lo largo del tiempo, se han considerado y/o ensayado diversas opciones, como diluir estas sustancias en la atmósfera o en el mar, enterrarlas en el fondo marino, o enviarlas al espacio (sol). La idea predominante por ahora, es el almacenamiento en un recinto a ubicarse en capas geológicas profundas, estables y secas, el que luego se sellan de tal forma que el hombre no pueda volver a extraerlo. En el mundo se llevan invertidos miles de millones de dólares en el estudio de la mejor estrategia para que este almacenamiento garantice el confinamiento del material radiactivo por sobre los 10.000 años, aunque se produzcan inundaciones, glaciaciones, terremotos o guerras atómicas. Los estudios parecen indicar que esto es posible, pero el

costo final es aún incierto. Esta estrategia también se puede aplicar a los residuos de remanentes del proceso de reciclado.

Al momento actual no existen instalaciones para la disposición definitiva de los residuos de instalaciones nucleares en operación. En cualquier caso, los países adoptan provisiones económicas para disponer de recursos a la hora de proceder a la disposición final de los residuos. Esto se logra mediante un fondo que se obtiene a partir de la venta de la energía generada por la central, a lo largo de su vida útil.

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.
- 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.

Conclusiones

Del estudio realizado en este capítulo se puede concluir que no hay ninguna fuente de energía se sea totalmente “limpia” al considerar toda las etapas del ciclo de vida de las centrales generadoras de electricidad. Todas en su utilización para la generación de electricidad provocan un impacto al medioambiente. Por tanto, el aspecto ambiental, es una variable que tiene un peso considerable en el proceso decisorio entre las opciones a ser adoptadas para garantizar la oferta de energía en un país o región.

La generación de electricidad con combustibles fósiles (gas, petróleo y carbón) a nivel mundial provee el 66% de la energía eléctrica y en el caso particular de Chile el 62,7%. Esta forma de generación de electricidad es una de las responsables de la emisión de gases nocivos y de efecto invernadero con efectos negativos sobre el clima, la disminución de la capa de ozono, la lluvia acida y los efectos negativos sobre la biodiversidad.

Por ello, el reto principal para asegurar el progreso económico y social que está íntimamente relacionado con los requerimientos de energía, radica en balancear la demanda creciente de energía con los requerimientos ambientales de manera de conformar una matriz energética consistente con ese principio y por tanto con el desarrollo sustentable.

Un rol importante en satisfacer estos requerimientos para el desarrollo lo pueden jugar las energías renovables (en particular en este estudio la hidráulica, la eólica y la solar) y la energía nuclear en una composición que estará en correspondencia con las características particulares de cada país.

Sin embargo, bajos factores de planta, la dependencia climática, su localización muchas veces alejada de los centros de consumo lo que reduce su competitividad por la construcción de líneas eléctricas adicionales y la solución al almacenamiento de la energía son unas de las limitantes que presentan las fuentes renovables de energía en comparación con la energía nuclear.

Al no generar gas efecto invernaderos y nocivos para el medioambiente, la energía nuclear, como industria altamente desarrollada se perfila como unas de las alternativas más viables para cubrir parte de la demanda creciente de energía, mas aun si existen compromisos de reducción de emisiones, meta cada vez más difícil de cumplir para países desarrollados que han optado por evitar la energía nuclear. Sin embargo, hay un rechazo por parte de la sociedad a su utilización para cubrir parte de la creciente demanda de energía como

consecuencia en particular del accidente de la central nuclear de Chernobyl y la falta de información en relación a esta fuente de energía.

Los desechos radioactivos generados fundamentalmente por el combustible nuclear es otro de los problemas vinculados con el impacto ambiental que pudiera tener esta fuente. Sin embargo, la gestión que se realiza de los mismos tanto en la central nuclear como en las instalaciones de reprocesamiento del mismo y su almacenamiento permite señalar que ese impacto es mínimo, y principalmente relacionado a la construcción y operación del almacén que al producto en almacenamiento y hasta la fecha no han ocurrido accidentes en esta actividad que hayan tenido consecuencias serias en el medioambiente. Por otro lado, la industria nuclear se encuentra desarrollando nuevas tecnología para reducción del volumen de los mismos, así como el nivel de actividad lo que reducirá aun más el posible impacto que pudieran tener los mismos.

Aun así, según índices objetivos, incluyendo la opinión de especialistas de distintas disciplinas, incluyendo el medioambiente, la operación de las centrales nucleares en los países que detentan esta tecnología, es adecuada para el medioambiente y la sociedad.

Bibliografía

- 7.1.- Kryshev I. I., Rjazantsev E. P., Seguridad ecológica del complejo energético-nuclear de Rusia. Moscú: Izdat. 2000. 384 págs.
- 7.2.- E. O. Adámov, Proyectos innovadores de reactores nucleares - ¿Capricho de los científicos o imperativo estratégico?, Sitio web oficial NIKIET (www.nikiyet.ru).
- 7.3.- Eficiencia de la tecnología de la energía nuclear: criterios del sistema de dirección del desarrollo / S.I. Rachkov. Moscú: EUFE (Empresa Unitaria Federal Estatal) TSNIATOMINFORM. 2008.
- 7.4.- Política energética de la Federación Rusa: Resumen. Agencia Internacional de Energía, París. 1996.
- 7.5.- Krilov D. A., Influencia de las centrales nucleares y de las centrales energéticas a base de gas natural y carbón al medioambiente y la salud de las personas en Rusia, tomando en cuenta los ciclos de combustión correspondientes para la generación de energía eléctrica. Preprint IBRAE №96-07. Moscú. 1996.
- 7.6.- Moyseev N. N., Tareas matemáticas del análisis del sistema. Moscú: Ciencia. 1981. 486 pág.
- 7.7.- Guidance for Comparative Assessment of the Health and Environmental Impacts of Electricity Generation System. IAEA Training Course. Amman. Jordan. 04.10-12.11.1998. P.213.
- 7.8.- Pigford T. H., Materials and Environmental Release Flowsheets. Teckhnecon Inc. 1972.
- 7.9.- Krakowski R. A., Bathke C. G., Reduction of Worldwide Plutonium Inventories Using Conventional Reactors and Advanced Fuels: A System Study. Los Alamos. 1999. P.67.
- 7.10.- Poplavsky V. M., Usanov V. I., Chebeskov A. N., et. al., Evaluación de la eficiencia de las medidas para la disminución del riesgo de difusión de los materiales fisibles en

- base a los modelos periciales del análisis de sistema. Energía Nuclear. Vol. 91. Lanz. 5. Noviembre. 2001. 354-362 págs.
- 7.11.- Ptisyna N. V., Chitaikin V. I., Shibarshov L. I., Plutonium and its Chemical Compounds: the Problems of Nuclear Weapons Non-Profileration. Managing Plutonium Surplus. P.157-170. Kluwer Academic Publishers.
- 7.12.- Acompañamiento informativo de los procedimientos del desmantelamiento de los objetivos de la energética nuclear. Resumen analítico, Informe de NTTS GAN. Inv. № 440/577, 1992. 96 págs.
- 7.13.- Factors Relevant to Recyclic or Reuse of Components Arising from the Decommissioning and Refurbishment of Nuclear Facilities: Technical Report Series 293, Vienna. IAEA, 1988.
- 7.14.- MacLauchlan A., NEA Study Finds Waste Weight is Key to Decommissioning Cost. Nucleon. Weeks. 32. No. 42. P.1-9.
- 7.15.- Oussanov V. I., Pankratov D. V., Popov E. P., et al., Long-Lived Residual Activity Characteristics of Some Liquid Metal Coolants for Advanced Nuclear Energy Systems. Global`99. Int. Conf. on Future Nuclear Systems. 30.08-02.09.1999. Jackson Hole. Wyoming. USA. 1999.
- 7.16.- Popov E. P., Zabrodskaia S. V., Tsikunov A. G., Usanov V. I., Estimación de los límites admisibles del contenido de las mezclas en los materiales de la pantalla, los cuales no exigen enterramiento y defensa de los reactores rápidos. Preprint FEI-2592, Obninsk, 1997.
- 7.17.- Horasanov G. L., Blokhin A. I., Bases de la creación de un refrigerante de plomo de baja actividad con un enriquecimiento isotópico para instalaciones perspectivas energético-nucleares. Cuestiones de la Ciencia y la Técnica Nuclear. Azufres. Constantes nucleares. Lanz.1. 2001. 131-143 págs.
- 7.18.- Cierjacks S., Low-Activation Fusion Materials Development and Related Nuclear Data Needs, Proc. of Advisory Group Meeting, IAEA-572, Vienna. 1990. 53 p.
- 7.19.- Usanov V. I., Tsikunov A. G., Trojanov M. F. y otros, Radioactividad remanente de los materiales al dar de baja a los reactores rápidos. Energía Nuclear. T.78. Lanz.6. 1995. 417-425 págs.

- 7.20.- Oussanov V. I. et al., Potential of the Non-Waste Concept under NPP Decommissioning, Global`2001, Paris, France, 09-13.09.2001.
- 7.21.- Rachkov V. I. y otros. Eficiencia de la tecnología de la energía nuclear. Criterios de sistema y las direcciones del desarrollo. TSNIATOMINFORM. 2008. 228 págs.
- 7.22.- O. E. Muratov, M. N. Tihonov, Desafíos globales a la energética nuclear de Rusia. Proatom.ru. 02.11.2007.
- 7.23.- Koryakin U. I. Alrededores de la energética nuclear de Rusia: nuevos desafíos - Moscú: GUP NIKIET, 2002. -334 págs.
- 7.24.- Ivanov S. N. Estado moderno y dinámica del desarrollo del complejo de energía nuclear de Rusia // Izv. AN. Energética, 2007, № 1, 3-9 págs.

Capítulo 8

Costo de la Energía Nuclear¹³³

8.1. Ventajas económicas de la energía nuclear

En la primera parte del estudio se señaló que las reservas de combustible fósiles del planeta se están agotando, pero a pesar de esto su uso sigue siendo la principal forma de producir electricidad y los impactos sobre el medioambiente por la utilización de estas fuentes de energía se comienzan a percibir en el cambio climático a nivel mundial. En directa relación con la creciente escasez de recursos y como una medida para frenar el calentamiento global, las naciones han suscrito acuerdos que tienen incidencia en el mercado de los combustibles, tales como el Protocolo de Kioto, firmado por la mayoría de los países del mundo y cuyas normas para la reducción de emisiones implican una exigencia adicional a la complicada industria de generación eléctrica tradicional.

Pero desde el punto de vista de la energía nuclear este aspecto significa una ventaja importante, por las siguientes razones:

1. Baja contribución del precio del combustible en la estructura del costo de generación de la energía eléctrica y en correspondencia, una baja sensibilidad a las fluctuaciones del precio del combustible en el mercado.
2. Aseguramiento de un volumen estable de suministro de electricidad a un precio estable durante un periodo largo de tiempo.
3. Mínima influencia en el medioambiente y por lo tanto la posibilidad de utilizar la energía nuclear para consumir en el mercado interno del país las cuotas de carbono conforme a lo establecido en los mecanismos del Protocolo de Kioto.

Adicionalmente se puede establecer que debido a los altos costos de extracción y transporte del petróleo, gas y carbón, la energía eléctrica producida por una central nuclear es más barata en comparación a estas, ya que el combustible nuclear que en ella se emplea tiene costos de extracción y de transporte significativamente menores. La Figura 8.1 ofrece una

¹³³ Este capítulo se desarrolla para cumplir con los requerimientos del mandante establecidos en Términos de Referencia, en particular, al requerimiento de analizar los diferentes aspectos económicos de la generación de electricidad y su comparación con las fuentes de energía que se evalúan en el estudio.

comparación entre los costos de generación de la energía eléctrica para diferentes fuentes de energía.

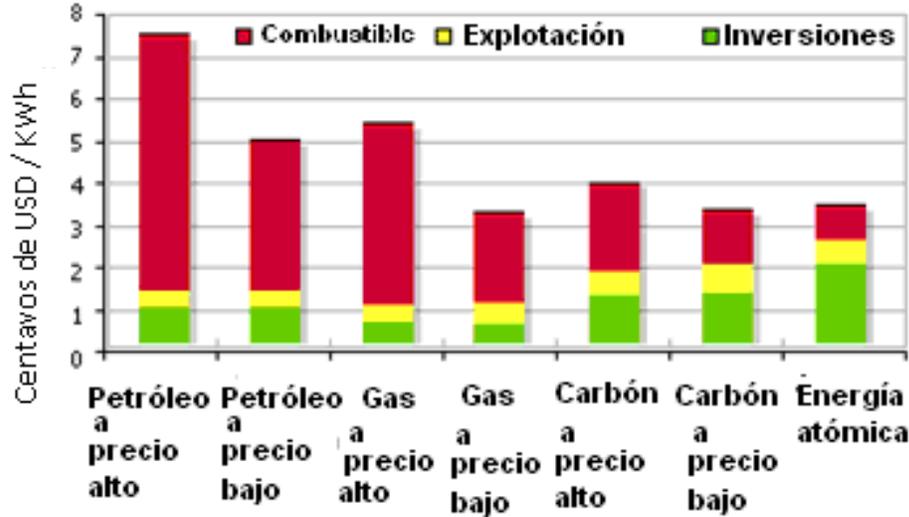


Figura 8.1 - Costo de generación de la energía eléctrica, producida con diferentes tipos de combustible.

Por lo anterior, es importante recalcar que una de las ventajas importantes y significativas de la energía nuclear es la estabilidad del precio en el largo plazo. Los componentes de la estructura del costo de la generación de electricidad de origen nuclear son notablemente diferentes a los otros tipos de energías. Esto se debe a que el costo de la generación está directamente relacionado con las inversiones de capital que son requeridas para la construcción de las centrales nucleares y no por el costo del combustible. Muy distinta es la situación cuando las centrales son a petróleo, gas o carbón. Para el cálculo del precio de la energía eléctrica producida por una central nuclear, el componente combustible no constituye más de 25%, en cambio para las centrales termoeléctricas fósiles este componente puede llegar hasta el 80% (Figura 8.1). Esta es la principal particularidad que permite asegurar estabilidad en los precios de la energía eléctrica de origen nuclear, lo que garantiza al usuario final seguridad y precios asequibles, además influir sobre la fluctuación de precios que ejercen otras fuentes de energía sobre el mercado.

En la Figura 8.2¹³⁴ es posible apreciar el aumento significativo -de aproximadamente el doble- del precio de combustibles como el gas y carbón, con respecto al combustible nuclear, valor que es empleado para determinar el costo de la energía eléctrica producida usando estas fuentes. El aumento de este componente (combustible) genera un aumento del precio de la energía eléctrica en un 9% en las centrales nucleares, un 31% en las centrales de carbón y un 66% en las que utilizan gas.

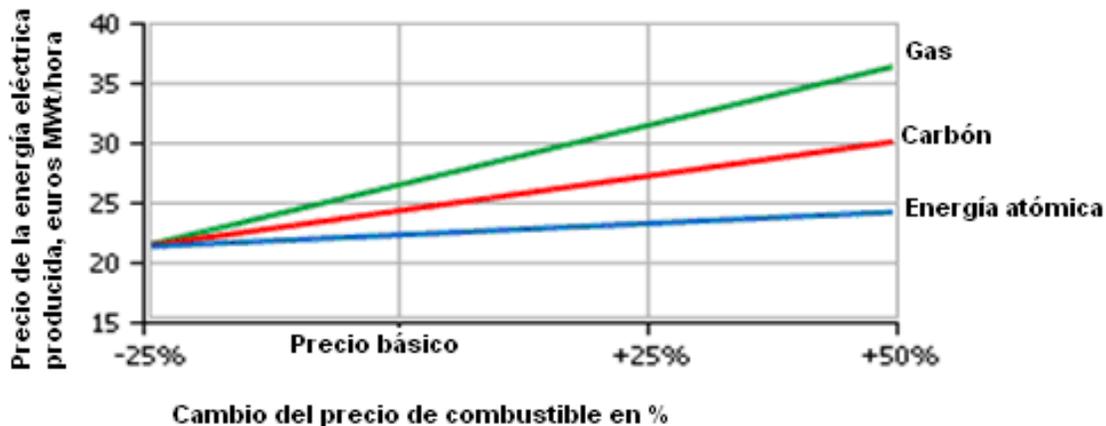


Figura 8.2. - Dependencia del precio del combustible en el costo de la energía producida.

Así, la energía nuclear adquiere un rol importante en el mercado por su mayor independencia del precio del combustible que utiliza con respecto al precio final de la electricidad que produce. Si esto lo comparamos con las ventajas de las fuentes de energía renovable (como la accesibilidad y su amplia difusión) el resultado es similar, tanto por la inestabilidad y lo impredecible de la fuente renovable, así como por la alta inversión de capital que requieren.

8.2. Costos de la construcción y operación de las centrales nucleares

Uno de los argumentos de los detractores de la energía nuclear es el aspecto relativo a las altísimas inversiones de capital que son requeridas para las primeras etapas de la

¹³⁴ Tarjanne Risto, Kivistö Aija, Comparison of electricity generation costs, Lappeenranta University of Technology, Faculty of Technology, Department of Energy and Environmental Technology Research Report EN A-56, Finland, 2008.

construcción de una central núcleo- eléctrica. Si bien esto es correcto, ya que los costos de inversión sobrepasan por ejemplo a los de una central hidroeléctrica de similar potencia, estos se compensan rápidamente con la diferencia favorable en el precio del combustible, principalmente y a la estabilidad en el tiempo

Por eso, para evaluar la competitividad de los diferentes tipos de centrales, es imprescindible considerar todos los gastos e ingresos en que se incurre, desde el principio de la construcción hasta el desmantelamiento de sus instalaciones. Son muchos los factores que influyen en los índices de rentabilidad y competitividad del proyecto, pero entre los más importantes se pueden distinguir la tasa de descuento, las inversiones de capital para la construcción, los gastos de operación (incluido el precio del combustible), el coeficiente del uso de la potencia instalada (factor de planta), los gastos de desmantelamiento y los costos medioambientales, entre otros.

Puede decirse, que el factor principal que define la competitividad del proyecto es el costo de la energía eléctrica, el que a su vez depende en forma importante de todos los factores antes mencionados. Por esto, al momento de tener que optar por una central nuclear o una de carbón, por ejemplo, la balanza puede inclinarse a favor de una o de otra, tan sólo cambiado cualquiera de estos parámetros.

Un método internacionalmente aceptado para el cálculo del costo de generación de la energía eléctrica, es el método de los costos nivelados (levelised cost method). Este método consiste en igualar el flujo de gastos (capital, operación, desmantelamiento) con el flujo de ingresos de la venta de energía eléctrica. Como los ingresos por la venta de energía eléctrica ya tienen incluido el costo unitario de generación entonces, a partir de esta ecuación se puede determinar la influencia de la tasa de descuento, el factor de planta y otros gastos en el costo unitario de generación de la energía eléctrica.

Es decir, según esta metodología, para calcular el precio de la energía eléctrica en centavos de dólares de los Estados Unidos por KWh (o en dólares por un MWh) hay que sumar las inversiones del capital amortizadas y los gastos corrientes de operación.

Adicionalmente se debe tener en cuenta que para construir una central nuclear se debe gestionar la obtención de recursos para financiar la obra ya sean propios o a través de financiamiento externo (créditos). Ambas alternativas tienen un costo, a corto plazo y/o largo plazo, que se refleja en la tasa de descuentos, la que también debe ser considerada al definir la cuantía de las inversiones de capital y del costo de la energía eléctrica.

8.2.1. La tasa de descuentos

Por tasa de descuento habitualmente se entiende el índice apropiado que indica el rendimiento necesario de capital en un plazo determinado. Esta tasa, en primer lugar, depende de las tasas de mercado a largo plazo (que ya contiene las expectativas inflacionarias) y las de riesgo, que van implícitas en el proyecto y son muy importantes para los inversionistas. Una alta tasa de interés va a subvalorar los ingresos en el tiempo y como consecuencia, va a demandar un aumento del precio de la energía eléctrica para cubrir los gastos que, como se sabe, se efectúan en un porcentaje importante en la etapa de la construcción de la central, por lo que se descuenta en menor grado.

El costo de la energía eléctrica producida por una central nuclear es sensible a la tasa de descuento y al factor de planta (coeficiente del uso de la potencia instalada). A modo de ejemplo, los datos siguientes: la investigación del costo de la energía eléctrica, producida por las centrales nucleares y de carbón en la India¹³⁵, demostró que un aumento de la tasa de descuento de un 5% a un 10% significaría un aumento del costo de la energía eléctrica de las centrales nucleares en un 40%, y del resto de centrales en un 20%.

Estos datos se correlacionan con los publicados en World Nuclear Association en 2008, que claramente demuestran que con una tasa de descuento de un 5% y un 10% tiene lugar un aumento del componente de los gastos, lo que es un rasgo característico de las tecnologías eléctricas que son intensivas en capital inicial (ver Tabla 8.1¹³⁶). Con una tasa de descuento de un 5%, el nivel de los costos para la producción de la energía eléctrica en una central nuclear fluctúa en un rango de 23-48,9 USD\$/MWh, y con un 10% entre un 31,7-68,6 USD\$/MWh.

Tabla 8.1 - Proyección de costos de la generación de electricidad del OECD para el año 2010 con tasas de descuentos 5-10%. (2003 US cent/KWH, tasa descuento 5 y 10%, factor de planta 85%).

País	Nuclear		Carbón		Gas	
	5 %	10%	5 %	10%	5 %	10%

¹³⁵ L. A. Sachenko, Las bases metodológicas de la administración del riesgo en la energía nuclear, Autoreferat de la tesis a Candidato a Doctor en Ciencias Económicas, 2006.

¹³⁶ Tomado de el sitio WEB de la World Nuclear Association:
<http://www.world-nuclear.org/info/inf02.html>. OECD/NEA, 2005.

País	Nuclear		Carbón		Gas	
	5 %	10%	5 %	10%	5 %	10%
Finlandia	2,76	4,22	3,64	4,45	--	--
Francia	2,54	3,93	3,33	4,42	3,92	4,30
Alemania	2,86	4,21	3,52	4,09	4,90	5,00
Suiza	2,88	4,38	--	--	4,36	4,65
Holanda	3,58	5,32	--	--	6,04	6,26
Rep. Checa	2,30	3,17	2,94	3,71	4,97	5,46
Eslovaquia	3,13	4,55	4,78	5,52	5.,59	5,83
Rumania	3,06	4,93	4,55	5,15	--	--
Japón	4,89	6,86	4,95	6,91	5,21	6,38
Corea	2,34	3,38	2,16	2,71	4,65	4,94
EE.UU.	3.,01	4,65	2,71	3,65	4,67	4,90
Canadá	2,60	3,71	3,11	4,12	4,00	4,36

En atención a lo anterior, es posible definir cómo la competitividad del proyecto está sujeta a eventuales riesgos por cambios de valores en los parámetros variables o definibles, como lo son la tasa de descuento, el coeficiente del uso de la potencia instalada o factor de planta y el precio del combustible, los que en conjunto finalmente permitirán determinar el costo de la energía eléctrica en esas condiciones.

8.2.2. 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, lo que hace que la información sea limitada y a veces contradictoria.

Como se sabe, para la construcción de una central eléctrica la inversión de capital es elevada, lo que hace que, al definir la tasa de descuento, influya considerablemente en el costo de la energía eléctrica producida. Las investigaciones en este campo demuestran que incorporando los últimos logros y mejoras tecnológicas, las centrales nucleares han conseguido ser más económicas que las eléctricas que operan con combustible fósil. Por esto, entonces, las inversiones de capital varían mucho dependiendo del tipo de central que se trate. Por ejemplo, los gastos involucrados en la construcción de una central nuclear son más altos que para la construcción de una central térmica. Esto hace que para aquellas centrales con tecnologías que hacen uso de fuentes renovables de energía, el nivel de inversión de capital alcance a un 90% de la electricidad producida. El costo de la energía eléctrica producida por la central eléctrica, en más de dos terceras partes corresponde a inversiones del capital.

Durante la construcción de la central nuclear es cuando se realizan las inversiones reales en equipos y recursos humanos que son utilizados para todas las actividades de ingeniería y construcción en fase inicial del proyecto. Dentro de las inversiones de capital se puede entender: costos temporales (overnight costs) y tasa de descuento (ver Tablas 8.2, 8.3 y 8.4).¹³⁷

Tabla 8.2 - Inversiones en la construcción de centrales nucleares en 2005.

Tasa de descuento del capital 5%		Tasa de descuento del capital 10%	
País	Costos específicos de capital	País	Costos específicos de capital
China	1.000	China	1.750
Rusia	1.290	Rusia	1.740
Francia, Canadá, República Corea, EEUU, Brasil	1.500	EEUU, Canadá, Rumania	2.000
Finlandia. España	2.250	Finlandia, Turquía, China, Brasil, India	2.500
Japón		Japón	>3.000
Promedio de los países	1.500		2.630

¹³⁷ L. A. Sachenko, Las bases metodológicas de la administración del riesgo en la energía nuclear, Autoreferat de la tesis a Candidato a Doctor en Ciencias Económicas, 2006.

Tabla 8.3 - Los parámetros técnicos y costos de centrales a gas

País	Potencia Instalada [MW]	Eficiencia térmica [%]	Costo KW [USD\$]	Costo KW	
				5% (USD\$/KW)	10% (USD\$/KW)
Bélgica	350	52,6	761	820	884
Canadá	1.500	45,0	536	752	733
Dinamarca	337	57,0	809	887	971
Finlandia	700	56,0	622	689	727
Francia	660	52,0	739	923	918
Hungría	389	48,7	595	708	762
Italia	700	53,0	652	691	732
Japón	700	53,3	1.640	1.703	1.771
Corea	450	53,1	583	661	671
Holanda	250	54,0	725	871	909
Portugal	459	51,5	697	771	820
España	315	51,0	663	753	854
Turquía	1.360	35,4	402	440	468
EE.UU.	250	50,0	422	502	509
Brasil	900	50,0	677	1.001	861
Rusia	1.440	56,0	721	782	847
Centrales cuyos proyectos se realizan entre 2005 - 2010					
Holanda	350	60,0	664	804	836
EEUU	350	60,0	419	452	453

Tabla 8.4 - Parámetros técnicos y de costo de las centrales a carbón.

País	Potencia Instalada [MW]	Eficiencia térmica [%]	Costo KW [USD\$]	Costo KW	
				5% [USD\$/KW]	10% [(USD\$/KW)]
Bélgica	400	43,2	1.386	1.523	1.671
Canadá	3000	38,6	837	1.133	1.164
Dinamarca	400	47,5	1.329	1.447	1.574
Finlandia	500	42,0	885	983	1.039
Francia	572	42,0	1.346	1.584	1.770
Hungría	918	38,6	1.318	1.419	1.523
Italia	2.68	44,0	1.173	1.365	1.490
Japón	930	44,1	2.561	2.739	2.930
Corea del Sur	500	41,0	1.174	1.300	1.438
Holanda	600	45,0	1.254	1.494	1.635
Portugal	411	41,7	1.902	2.176	2.391
España	500	36,7	1.326	1.490	1.671
Turquía	340	34,0	1.476	1.641	1.819
EE.UU.	300	40,0	1.009	1.277	1.348
Brasil	315	33,0	1.258	1.735	1.589
China	1.200	39,0	772	966	1.114
India	920	34,0	935	1.002	1.048
Rusia	1.200	38,0	1.291	1.439	1.601

País	Potencia Instalada [MW]	Eficiencia térmica [%]	Costo KW [USD\$]	Costo KW	
				5% [USD\$/KW]	10% [(USD\$/KW)]
Centrales, cuyos proyectos se realizan entre 2005 -2010					
Holanda	800	47,0	1.553	1.842	2.022

País	Potencia Instalada [MW]	Eficiencia térmica [%]	Costo KW [USD\$]	Costo KW	
				5% [USD\$/KW]	10% [(USD\$/KW)]
EE.UU.	380	49,0	1.154	1.445	1.532

El análisis de estos datos demuestra, que en igualdad de condiciones, prácticamente en todos los países examinados, las inversiones de capital para la construcción de las centrales nucleares son más elevadas que las requeridas para la construcción de las centrales similares de gas (Tabla 8.3) y similares o más bajas, que las inversiones para la construcción de las centrales a carbón (Tabla 8.4).

Los gastos temporales no se consideran para determinar el valor de la tasa de descuento, pero esta tasa si incluye los gastos de los trabajos de investigación y desarrollo, suministro de equipos, trabajos de construcción y montaje, trabajos de servicio, costos de adquisición y gastos impredecibles. Durante la fase de construcción se definen la forma y cuantía de pagos de interés por concepto de financiamiento, independiente de donde provenga. Es así entonces, que una vez que la central nuclear comience a generar energía eléctrica, la central es capaz de pagar por si misma los gastos temporales y el interés de la inversión. En resumen, el precio de la energía producida debe cubrir estos gastos, así como también todo el resto de los gastos relacionados y relativos con la compra del combustible, mantenimiento técnico y operación de la central.

Tal como se ha mencionado, una parte considerable de la estructura del precio de la energía eléctrica producida en las centrales nucleares corresponde a la inversión de capital, cifra que alcanza en promedio a un 70-80%¹³⁸. Esta cifra se sustenta en que debido principalmente, a que las tecnologías nucleares son consideradas “jóvenes” y, en donde, los gastos por concepto de seguridad son elevados.

Esta situación no debiera mantenerse en el tiempo ya que en un futuro no muy lejano se espera un descenso de este componente generado en forma importante por una estandarización de los proyectos de las actuales centrales nucleares, más un aumento de la potencia energética por reactor, producto de la acumulación de experiencia y su aplicabilidad en forma directa en cada nuevo proyecto de construcción, y por el uso

¹³⁸ The New Economics of Nuclear Power, World Nuclear Association Report 2008.

efectivo de sistemas pasivos de protección y, además, por una disminución de los plazos de construcción y por el uso de tecnologías más eficaces en este tipo de construcciones industriales de gran tamaño.

Otro factor importante al momento de evaluar la inversión de capital al construir una central nuclear, es el plazo de la construcción. Mientras más tiempo se necesite para la construcción, más serán los gastos incurridos durante su ejecución, lo que retrasa el momento de la puesta en marcha e inicio de la operación comercial, y por lo tanto, retrasan los ingresos por concepto de la comercialización de la energía. Obviamente las centrales nucleares, en sí mismas, como proyectos tienen un ciclo de vida más extenso y duradero que el requerido para la construcción propiamente dicho; por esto, el aspecto más importante es lograr una eficiente administración del proyecto, lo que considera e incluye la organización, planificación, dirección, coordinación de los recursos humanos, equipos, tecnología especializada y materiales durante el ciclo vital del proyecto, todo esto con el objeto de conseguir resultados favorables en relación a las mediciones de los índices de volumen de trabajo, costo, tiempo y calidad.

Debido a la importancia de la administración de estos proyectos, en los últimos diez años se formó una nueva especialidad: “La prestación de servicios de administración de proyectos de construcción de centrales nucleares”. Es así entonces, que la tarea principal y una parte importantísima de los nuevos proyectos para la construcción de una central nuclear que incorporan sistemas automatizados de diseño y una gestión eficiente y efectiva de la información técnica proyectada para todo el ciclo vital de la central, permiten en definitiva garantizar resultados uniformes y estándares de este tipo para ser utilizados en estos proyectos.

En los actuales proyectos de inversión, considerados “más modernos”, la producción, la potencia y el lugar de emplazamiento de la central se definen en la etapa de “diseño conceptual” del proyecto y de los trabajos de desarrollo experimental (DCE). En esta misma etapa, se toman las decisiones respecto a los procesos, estrategias de producción, sistemas logísticos y de información. Estas decisiones son claves e influyen directamente en el costo final del proyecto de inversión de la central nuclear, en los costos futuros de su operación y en la rentabilidad general.

Que un proyecto sea económicamente atractivo depende directamente de la modalidad integral de su administración, de una correcta planificación de las tareas y resultados del Diseño Conceptual Experimental (DCE) y de la oportunidad de la incorporación de estos resultados al proyecto en ejecución, de modo de poder hacer los ajustes correspondientes antes del inicio de la construcción.

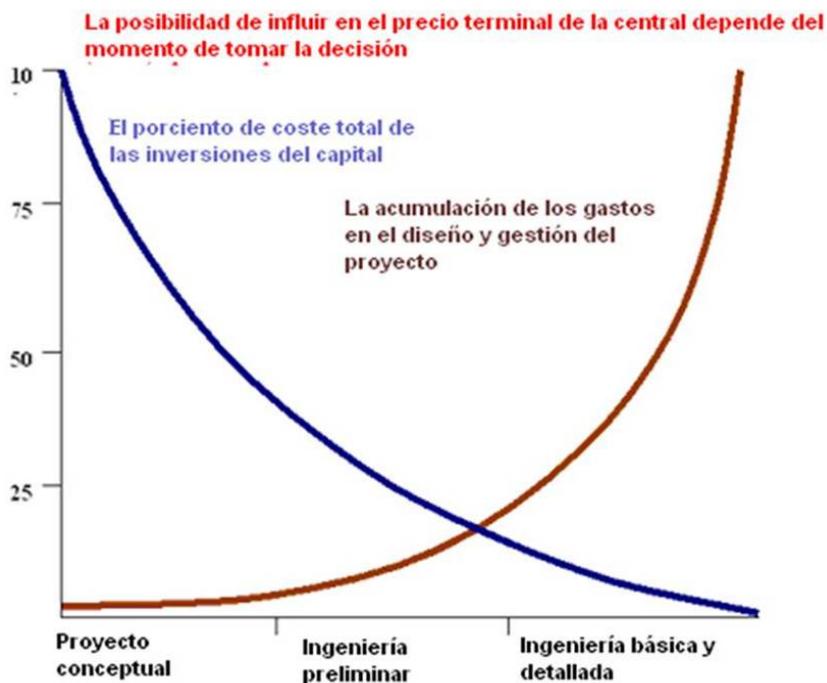


Figura 8.3. Influencia del tiempo de decisión en el costo final de la central nuclear.

Las eventuales economías que se pueden obtener de los principales gastos en estos proyectos se pueden alcanzar solo mediante la realización anticipada del DCE¹³⁹ (Figura 8.3) el que argumenta y determinan con exactitud los siguientes parámetros:

- La viabilidad técnica
- Los recursos y la rentabilidad.
- Los riesgos y la exposición del medioambiente.
- La planificación de la infraestructura.
- La integración de los participantes en base al sistema unificado de información;
- El ciclo vital.
- Los costos de inversión¹⁴⁰

¹³⁹ V. V. Kovaliov, Bases de la gestión financiera, M.: Finanzas y Estadística, 2000.

¹⁴⁰ U. V. Fedósova, Competitibilidad de las tecnologías de energía nuclear: Análisis económico, Estrategia atómica, No. 6, 2005.

A continuación se muestra una tabla unificada de las actividades organizacionales enfocadas a conseguir una disminución o eliminación de aquellos factores de riesgo que influyen negativamente en los plazos de realización de los proyectos, para la puesta en marcha de nuevas centrales nucleares.

Tabla 8.7 - *Actividades para conseguir un aumento o disminución de los riesgos a medida que se incrementa el periodo de puesta en marcha de una central nuclear.*¹⁴¹

Riesgo	Consecuencias del riesgo (factor, que demora la puesta en marcha de la unidad energética)	Actividad de disminución (eliminación) de riesgo	Resultado esperado
1. Inexactitudes de la producción (latentes).	Eliminación de los desperfectos revelados o provenientes de una adaptación defectuosa del equipo (la reparación, modernización o el reemplazo)	La participación del personal de las organizaciones de la puesta en marcha, en las pruebas de entrega en las fábricas productoras del equipo.	Disminución de la probabilidad de suministro de equipo que no corresponde al proyecto.
2. Desperfectos en la construcción (latentes, reveladas durante el ensayo).			
3. Desperfectos en los ensayos de entrega en la fábrica.	Detenciones no planificadas para eliminar los defectos del equipo.	El testeo y algunos ajustes del equipo en los stands especiales hasta su entrega para el montaje (armadura electrificada de los aparatos protectores).	La entrega para montaje del equipo comprobado y previamente ajustado.

¹⁴¹ Saakov E. S., Riasny S. I., Fomín M. N., Optimización de la duración y de los gastos para la puesta en marcha de una central nuclear, Recopilación MNTK-2008, M, 2009.

Riesgo	Consecuencias del riesgo (factor, que demora la puesta en marcha de la unidad energética)	Actividad de disminución (eliminación) de riesgo	Resultado esperado
		Diseño y producción del equipo estático y móvil (stands), contando los complejos móviles para el diagnóstico técnico de la armadura, el ajuste de las válvulas de seguridad etc.	El equipamiento en el emplazamiento de la central nuclear, con el equipo para realizar pruebas tanto durante la puesta en marcha, tanto durante la operación.
Deficiencias en el análisis del proyecto hasta el inicio de los trabajos de puesta en marcha (TPM). Desperfectos del proyecto. Desperfectos de la tecnología del proyecto (documentación del proyecto).	Eliminación de discordancias y errores del proyecto, revelados durante los TPM. Realización de un nuevo ensayo después de modificar el proyecto.	Análisis del proyecto de la central nuclear por parte de las organizaciones participantes en la PM (puesta en marcha) en la etapa de diseño del proyecto técnico (participando incluso en las decisiones de diseño, esquemas, algoritmos, de la seguridad, de la protección tecnológica y bloqueos etc.)	Reducción en la cantidad de desacuerdos del proyecto. Descenso de la cantidad de modificaciones del proyecto, efectuadas en el proceso de la puesta en marcha de la unidad, según los resultados de los TPM.

Riesgo	Consecuencias del riesgo (factor, que demora la puesta en marcha de la unidad energética)	Actividad de disminución (eliminación) de riesgo	Resultado esperado
Documentación inadecuada con respecto a la puesta en marcha del proyecto, correspondiente a los ensayos en las unidades energéticas de serie	Realización de los ensayos en las unidades de serie de las centrales nucleares a nivel de los ensayos de la unidad de cabeza de serie dada (los ensayos y las medidas amplias de la unidad de la central nuclear, contando el uso de los aparatos de medición supernumerarios deben efectuarse sólo en las unidades de cabeza)	Explicación de la reducción del número de experimentos y mediciones físicas a las unidades de serie de la central nuclear con la zona activa estándar	Reducción de la duración de las etapas de marcha física y energética.
		Optimización del número de los sistemas de pruebas de puesta en marcha (SPPM). El uso máximo para las mediciones de los sistemas de diagnósticos reglamentarios.	Reducción del volumen de trabajos durante las pruebas, el montaje y desmontaje de los SPPM.
Número no óptimo pruebas dinámicas y termohidráulicas	Sobre evaluación del número de las pruebas dinámicas y termohidráulicas del mismo tipo, efectuadas en las etapas de la EI y EIE.	Optimización del número de pruebas dinámicas y termo hidráulicas en las etapas de la EI y EIE. Reducción de la cantidad de pruebas	La disminución en el costos de los materiales y del trabajo y de la vida del equipo

Riesgo	Consecuencias del riesgo (factor, que demora la puesta en marcha de la unidad energética)	Actividad de disminución (eliminación) de riesgo	Resultado esperado
		del mismo tipo, repetidas en diferentes niveles de potencia.	
<p>1. La no concordancia entre el presupuesto de suministros y montaje del equipo con el gráfico de los TPM.</p> <p>2. El incumplimiento del presupuesto de suministro.</p>	<p>Un desorden en la secuencia del montaje del equipo de acuerdo a los sistemas de secuencia del cumplimiento de los TPM, que también puede estar causado por el incumplimiento del gráfico de suministro</p>	<p>Organización de la administración del proyecto para la puesta en marcha de la unidad de la central nuclear con el uso de la SAI de la construcción, del suministro y de la puesta en marcha a base del software moderno</p>	<p>Realizar el suministro y montaje del equipo en tal orden que garantiza el cumplimiento consecutivo de los TPM</p>
<p>Falta de preparación de los trabajos de construcción, montaje del SAD PT y del suministro de la energía eléctrica para suplir sus propias necesidades.</p>	<p>La “No” aprobación de las tareas cumplidas para cumplir con el suministro de la energía eléctrica a los consumidores debido a esquemas temporales y manejo manual de los aparatos electro propulsores y el control organoléptico</p>	<p>La incorporación oportuna de los subsistemas y del equipo de los SAD PT, necesarios para el inicio de los TPM (en la parte de control del equipo de la unidad energética, del control y registro de los parámetros).</p>	<p>Exclusión de la repetición y del reemplazo de los ensayos.</p>

Riesgo	Consecuencias del riesgo (factor, que demora la puesta en marcha de la unidad energética)	Actividad de disminución (eliminación) de riesgo	Resultado esperado
	de funcionamiento del equipo. La repetición de ensayos, su reemplazo a las etapas más remotas de los TPM.	El termino del suministro de energía para suplir las necesidades propias requeridas para el inicio de la etapa “trabajos antes de la puesta en marcha”	

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 de 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 8.6.¹⁴²

Tabla 8.6 - Comparación de costos de la construcción de nuevas potencias de generación.

Instituto Tecnológico de Massachusetts	Ministerio de economía, industria y finanzas de Francia	TARJANNE & LUOSTRAINEN (Finlandia)	Academia Real de Ingenieros	Universidad de Chicago	Asociación nuclear Canadiense
--	---	------------------------------------	-----------------------------	------------------------	-------------------------------

¹⁴² The New Economics of Nuclear Power, World Nuclear Association Report, 2008

Divisa	\$	€	€	£	\$	Can\$
Inversiones de capital por KW						
Nuclear	2.000	1.280	1.900	1.150	1.500	2.347
Centrales de gas	500	523	600	300	590	711
Centrales de carbón	1.300	1.281	860	820	1.189	1.600
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
Costo de la energía eléctrica por MWh						
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
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 costo, no se toman en consideración los gastos relacionados con la realización del primer proyecto de serie (FOAKE¹⁴³), 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, los investigadores de los diferentes proyectos se basan en diferentes parámetros con diferentes valores, para establecer la tasa de descuento.
- Al calcular el costo 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 central, el que fluctúa alrededor de 5%; que obviamente depende de la duración de la prestación de servicio y del volumen de trabajos para el desmantelamiento que conlleva el proyecto.
- Finalmente, respecto a los diferentes niveles de vida en diferentes países, al evaluar los costos del personal se utilizan diferentes cifras iniciales.

¹⁴³ First Of A Kind Engineering: Primero de una ingeniería tipo.

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 con otras fuentes de energía a una tasa de descuento del 8% y menos y, con una inversión de capital de 1.800 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.

8.3. Costos y riesgos de operación¹⁴⁴

8.3.1. Riesgos de operación

Como se ha mencionado anteriormente, los principales riesgos se concentran en el período de construcción de la central nuclear, pero adicionalmente, existen una serie de riesgos relacionados con su operación que son importantes de mencionar y conocer.

Los riesgos relacionados con la operación de la central nuclear se dividen en dos categorías:

- **Los riesgos comerciales.** Estos riesgos existen en todo tipo de centrales en magnitudes diferentes, por ejemplo, la variación del precio del combustible, la fluctuación del precio de la energía eléctrica, etc. Los riesgos de combustible para las centrales nucleares son considerablemente más bajos que para las centrales eléctricas tradicionales, así entonces un aumento considerable del precio del combustible nuclear no influye en los ingresos de la empresa. En condiciones de economías de libre mercado, la industria nuclear funciona bajo las regulaciones del operador del sistema energético, el que depende de los costos de producción en el sistema, con esto, las empresas con costos más bajos gozan de prioridad. Es decir, las empresas operadoras de centrales nucleares poseen un suficiente grado 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 de combustible fósil. Antes, algunas centrales nucleares tenían una baja productividad, relacionada directamente con las largas detenciones fuera del plan de mantenimiento, pero últimamente el factor de planta aumentó considerablemente y esto en definitiva se ve reflejado en el precio y en el costo general del proyecto.

¹⁴⁴ L. A. Sachenko, Las bases metodológicas de la administración del riesgo en la energía nuclear, Autoreferat de la tesis a Candidato a Doctor en Ciencias Económicas, 2006.

- **Riesgos de la política vigente y de regulación.** Hay países nucleares que por distintos motivos tomaron la decisión de deshacerse en forma gradual o por completo de la energía nuclear (Italia y Alemania) lo que hizo que tomaran una serie de medidas a nivel de gobierno para acortar la vida útil de las centrales nucleares respecto a lo señalado en el proyecto original. En algunos casos, las empresas a pesar de esta acción, tuvieron que seguir realizando pagos, especialmente lo relacionado con los cumplimientos adquiridos antes de esa decisión política¹⁴⁵ y cumplir además exigencias adicionales de seguridad exigidas por parte de los órganos de vigilancia, también estas motivadas por decisiones políticas. Estos ejemplos demuestran la importancia de la situación política y de la existencia de regímenes estables y predecibles para el control y licenciamiento del desarrollo de la energía nuclear.

8.3.2. Costos de operación

Se entiende como costos de operación a aquellos gastos relacionado con el funcionamiento, reparación y mantención de las centrales nucleares, así como también los costos asociados a los recursos requeridos para la obtención del producto final, entre los que se cuentan los materiales de reposición y modernización y el combustible necesario.

Un factor importante al momento de determinar el costo de la energía eléctrica, producida a partir del carbón y/o gas, es la ubicación de la central. Y, a su vez, la ubicación y tipo de central dependen, principalmente entre muchos otros factores de: la existencia o no de yacimientos naturales de este combustible orgánico en una determinada zona de un país y, la facilidad de acceso a este punto. Es obvio, que mientras más difícil, complicado sea el acceso o que esté muy lejos el yacimiento de la central, esto encarecerá el precio del producto final. Luego se puede decir, en líneas simples que en aquellas zonas que carecen de carbón o gas, o en zonas donde su transporte es difícil, resultará siempre más conveniente construir una central nuclear, a pesar de que se trate un monto de inversión de capital inicialmente más alto.

¹⁴⁵ Un caso en particular es el Programa Nuclear Filipino que por diferentes problemas lo detuvieron en 1986 y el gobierno filipino concluyó de pagar en el 2007 la deuda adquirida, más de 150000 dólares de los Estados Unidos por día.

A continuación se muestran dos tablas con un resumen de los costos medios de producción de energía eléctrica en Estados Unidos y la estructura unificada de los costos de operación de una central nuclear¹⁴⁶.

Tabla 8.7 - Costos promedio de producción de energía en las centrales nucleares de EE.UU.

	1981	1985	1990	1995	2000	2003
Costos de operación y mantenimiento	1,41	1,93	2,07	1,73	1,37	1,28
Combustible	1,06	1,28	1,01	0,69	0,52	0,44
TOTAL:	2,47	3,21	3,08	2,42	1,89	1,72

Tabla 8.8 - Estructura de Costos de Operación de las Centrales Nucleares hacia 2007.

Costos condicionalmente constantes	Costos variables	% de la producción total
	Combustible nuclear	16,7
Amortización de los fondos principales		11,0
Salario		11,8
Seguro social		4,6
Servicios de carácter		8,2

¹⁴⁶ The New Economics of Nuclear Power, World Nuclear Association Report, 2008, basado en información entregada por: Federal Energy Regulatory Commission (USA) y Electric Utility Cost Group (USA)

Costos condicionalmente constantes	Costos variables	% de la producción total
industrial		
Materiales auxiliares		9,6
Transportación y vertido del combustible		2,4
Otros		17,2
Pagos de los créditos bancarios de corto plazo		0,6
Impuesto sobre la tierra		0,4
Impuesto del transporte+ fondo de carreteras		3,0
Descuentos a diferentes fondos		7,1
Otros Costos		2,3
Fondos especiales de investigación		3,8
Coste		81,5
	Recargo de los fondos de circulación	4,0
Contenido de la esfera social		5,12
Desarrollo de la		1,8

Costos condicionalmente constantes	Costos variables	% de la producción total
producción		
Impuestos		7,58
Beneficios		18,5

Es importante recalcar que para las centrales térmicas el parámetro crítico al momento de determinar costos de operación y precio de la energía es el precio del combustible que usa. Esta elevada sensibilidad del precio de la energía eléctrica con respecto al precio del combustible se explica sólo por su alto porcentaje de participación en la estructura de los gastos, y por lo tanto, en el precio final.

Existe una particularidad muy atractiva de las centrales nucleares y es el bajo costo del combustible nuclear en comparación con el carbón y el gas, teniendo en cuenta que $\frac{3}{4}$ partes del costo del combustible nuclear corresponden no al uranio, sino, a su enriquecimiento y una adecuada preparación para su aplicación en el reactor; y, aún así, es tres veces más barato que el carbón y 4-5 veces más barato que el gas. El uranio es una fuente concentrada de energía, que es fácil y barata de transportar. Un kilogramo de uranio natural es capaz de producir 20.000 veces más energía, que la producida por un kilogramo de carbón.

Así también una central nuclear también requiere de menores gastos de operación. El costo de la energía eléctrica nuclear es 10 veces menor que la energía producida a partir del carbón; pero, se debe recalcar que los gastos del combustible no definen por sí solos el costo final de la energía eléctrica, ya que está el factor -importante- de la inversión de capital, que como ya vio, en el caso de la energía nuclear es alto.

8.4. Coeficiente de utilización de la potencia instalada (Factor de Planta)

Debido a la alta inversión requerida para construir una central nuclear, el costo de la energía eléctrica producida es muy sensible no sólo a la tasa de descuento, sino también al coeficiente del uso de la potencia instalada (factor de planta). Por ejemplo, una investigación de una organización científica finlandesa demostró que el aumento del uso de

las potencia instalada (factor de planta) de un 80 % a un 90% origina una disminución del costo de la energía de las centrales nucleares en un 9%, en las de carbón en un 5% y en las de gas en un 3%¹⁴⁷.

El factor de planta permite demostrar cómo se utiliza la potencia instalada de la central eléctrica. Si, por ejemplo, no se consume toda la energía producida por la central, entonces no se usa todo el capital, lo que influye en la competitividad respecto a otros proyectos más económicos.

Es evidente que los costos de operación dependen mucho de la potencia de la central. Al aumentar la potencia se aumenta el consumo del combustible, lo que lleva al aumento del costo de operación y la disminución de la proporción de las inversiones de capital en el costo final de la energía. Entonces la proporción (%) de las inversiones de capital es más alta en las centrales nucleares pues el aumento del factor de planta lleva a una disminución considerable del costo de la energía.

En el periodo 1990-2004 el incremento total de la generación nuclear fue de aproximadamente 714 TWh (aproximadamente un 40%) debido a la combinación de 3 factores fundamentales: un incremento de la disponibilidad de las centrales nucleares¹⁴⁸, nuevas construcciones y modernización de las centrales nucleares en operación. De acuerdo con la Figura 8.4 el factor de planta medio mundial aumentó de un 72,3% en los años 90 a un 83,2% en el 2004 hoy en día. El aumento de la disponibilidad de las centrales nucleares fue el contribuidor fundamental a este incremento¹⁴⁹ (pasando de 72,3% a 83,2%) aportando por tanto el 57 de este incremento. El próximo en importancia fueron las nuevas construcciones de centrales nucleares y por último las modernizaciones de las centrales nucleares en operación.

Esto permite demostrar la comparación del aumento de las potencias nucleoenergéticas en el mundo, que crecen no más que en 1% al año, con la tasa de crecimiento de la producción de la energía eléctrica en las centrales nucleares, que alcanza un rango de hasta un 3% anualmente.

¹⁴⁷ L. A. Sachenko, Las bases metodológicas de la administración del riesgo en la energía nuclear, Autoreferat de la tesis a Candidato a Doctor en Ciencias Económicas, 2006.

¹⁴⁸ International Status and Prospects of Nuclear Power, IAEA, Vienna, 2008.

¹⁴⁹ Operating Experience with Nuclear Power Stations in Member States in 2007, IAEA, Vienna 2008.

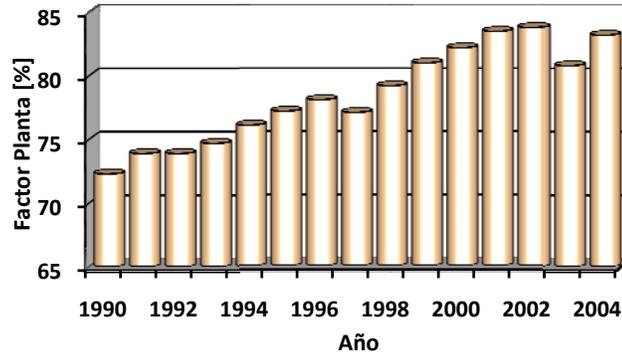


Figura 8.4 - Comportamiento medio del factor de utilización de la potencia para las centrales nucleares en el período 1990-2004.

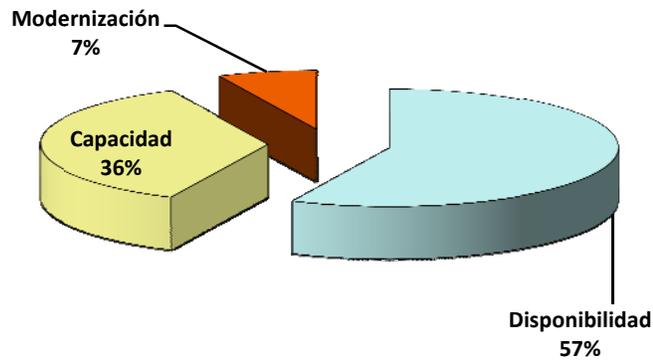


Figura 8.5 - Factores que contribuyeron al aumento de la generación núcleo-eléctrica en el período 1990-2004.

8.5. 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 central, 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 ajustes por el plazo (60 años) el costo real es del orden de un 5%¹⁵⁰. La Tabla 8.9¹⁵¹ ofrece una comparación de estos costos entre los diversos países que cuentan con tecnología nuclear.

Tabla 8.9. Costos de desmantelamiento de las centrales nucleares en diferentes países.

País	Tipo de reactor	Potencia [MW]	Variante 1		Variante 2	
			desmontaje		desmontaje después	
			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

8.6. Costos medioambientales¹⁵²

¹⁵⁰ 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.

¹⁵¹ Ídem 146.

Los costos medioambientales son muy importantes e influyentes en la producción de la energía eléctrica de las centrales y deben ser evaluados, revisados, valorizados, y al mismo tiempo, incluidos en la inversión de capital inicial, esto porque las instalaciones requieren cumplir y estar sujetas a ciertas restricciones de tipo medioambiental que evidentemente afectará su diseño e implementación, lo que puede hacer variar el monto de la inversión. Estos costos deben ser debidamente valorizados mediante la cuantificación de los eventuales daños que puedan producir estas centrales al medioambiente.

Según algunas estimaciones, el costo del impacto de las centrales de carbón en la salud y en el medio ambiente es el doble del costo producido por la energía eléctrica en general y un 30% superior al costo del impacto producido por las centrales a gas.

Además, hay que tener en cuenta que en virtud de la puesta en vigor del Protocolo de Kyoto, el uso del combustible orgánico está vinculado con una carga fiscal complementaria de las empresas. Luego, según los cálculos de la Sociedad Nuclear Canadiense, la liberación en la atmósfera de una tonelada de CO₂ cuesta a la empresa responsable 16 dólares canadienses. Esto evidentemente ocasiona un aumento de los costos de la producción de 1 MWh en las centrales de carbón, el cual según cálculos de especialistas, es un 27 % en el carbón y en un 8% para la central a gas.

8.7. Incentivos para proyectos de construcción de nuevas centrales nucleares

Es una práctica normal en algunos países el diseñar medidas o políticas dirigidas a estimular las inversiones en nuevas unidades nucleares. Como regla general en estos casos se proponen nuevos mecanismos de licenciamiento y planificación, cuyo objetivo es disminuir los riesgos vinculados con la prolongación de los plazos de construcción. En algunas circunstancias se examinan también determinados estímulos financieros. Entre los países occidentales en este campo predomina Estados Unidos, donde se aplican medidas tales como la prestación de garantías de créditos y exenciones fiscales con el objeto de aumentar la atracción de los inversionistas.

Otro factor que aumenta la atracción económica de los proyectos de construcción de nuevas centrales son aquellos proyectos en los que el gobierno puede influir directamente como por ejemplo, la política del cambio climático. Si un gobierno toma medidas orientadas a

¹⁵² B. V. M. Konanenko, Métodos y modelos de la evaluación de los proyectos de inversión de la modernización de los objetos de la energética nuclear, Autoreferat de la tesis a Candidato a Doctor en Ciencias Económicas, RGB, 2005.

reducir las liberaciones de CO₂, significa que eventualmente no permitirá un aumento del precio de la energía eléctrica, entonces en ese escenario las centrales nucleares gozarán de una posición ventajosa (si la estructura de precio en el mercado de la energía eléctrica se basa en un promedio entre el costo máximo y el mínimo, como lo es en Chile).

Sin embargo, existen ciertos riesgos para el inversionista, en los cuales no puede dimensionar o planificar adecuadamente los plazos. Particularmente, son los riesgos del licenciamiento (ante todo el riesgo de prolongación de los plazos o renuncia de la licencia en virtud de algunos obstáculos que pudieran aparecer durante el proceso del licenciamiento). Además, estos riesgos están vinculados con los precios del manejo de los desechos y del desmantelamiento de la central.

Con el fin de minimizar estos riesgos y contar con las adecuadas garantías para el inversionista, en el eventual caso de que surjan estos inconvenientes, es deseable contar con la participación del Estado. En la práctica mundial se estila y se usan los siguientes mecanismos para lograr un aumento en la competitividad de los proyectos de construcción de las centrales nucleares:

- Garantías de parte del gobierno, vía compensaciones a la empresa productora en el evento de una caída imprevista de los precios de la energía eléctrica.
- Garantía para la compra de la energía eléctrica.
- Operar con una amortización acelerada (para disminuir el impuesto sobre las utilidades y aumentar el activo circulante).
- Incentivos fiscales para la producción y las inversiones.
- Que el proyecto esté incorporado al programa de apoyo a la reducción de las emisiones medioambientalmente peligrosas (como en proyectos de energía eólica).

Todas estas medidas permiten incrementar los valores de los parámetros financieros y comerciales del proyecto de construcción de una central nuclear, en el que se incluye la tasa interna de retorno (TIR).

Un ejemplo interesante con respecto a la existencia de un nivel de compras garantizado de la energía eléctrica es la experiencia de Finlandia. Cuando la compañía finlandesa TVO manifestó su intención de construir una quinta central nuclear en ese país, contó con más de 50 clientes interesados en participar de este proyecto (representantes de la industria pesada y de municipalidades), para lo que efectuaron un acuerdo a fin de definir el monto

de las compras garantizadas de esta quinta unidad, fijando el precio en forma anticipada. Tales acuerdos permitieron cubrir cerca del 90% de la producción futura de la central¹⁵³.

8.8. 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 - 1.000°C).

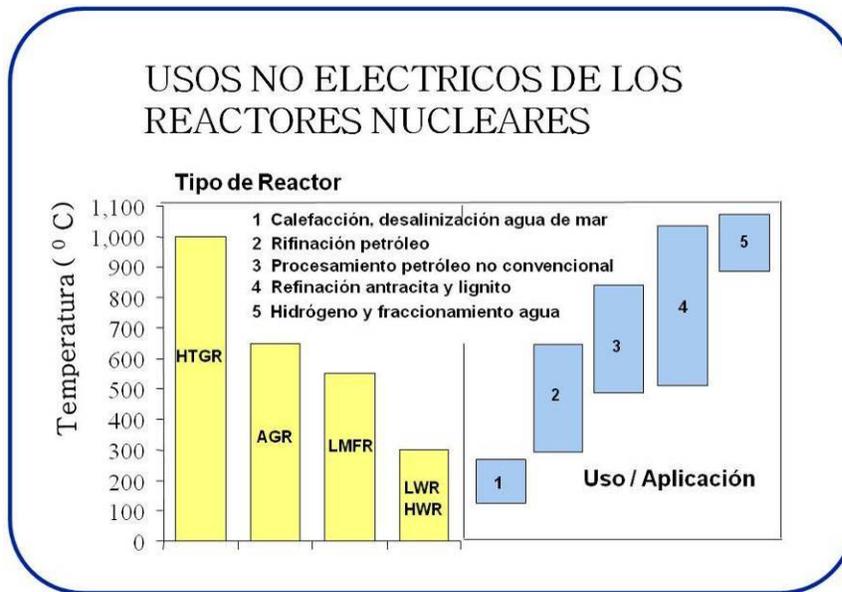


Figura 8.4 - Otros usos no eléctricos de los reactores nucleares.^{154, 155}

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

¹⁵³ J. Redding, C. Muench, R. Graber, The Business Case for Building a New Nuclear Power Plant in the U. S., Proceedings of ICAPP, Spain, 2003.

¹⁵⁴ Nuclear Energy Applications beyond the Power Sector, Climate change and nuclear power plant 2008, IAEA.

¹⁵⁵ Market Potential for Non-electric Applications of Nuclear Energy, Technical Reports Series No. 410, IAEA, Vienna, 2002.

fuentes no convencionales, la producción de hidrogeno para el transporte. En la Figura 8.4 se recogen estas aplicaciones y las características de los reactores nucleares que pueden ser usados con estos fines.

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).¹⁵⁶

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.

¹⁵⁶ Nuclear Reactors for the Space en <http://www.world-nuclear.org/info/inf82.html>.

Conclusiones

Las ventajas económicas de la energía nuclear no se limitan simplemente al costo y por ello la evaluación tampoco puede estar circunscrita a este aspecto. No obstante, siendo este un elemento de capital importancia para la toma de decisiones resulta especialmente atractivo saber que existe una serie de argumentos a favor, los cuales se pueden resumir de acuerdo a lo siguiente:

- Bajo costo del combustible.
- Baja incidencia del precio del combustible nuclear en la estructura del costo de generación.
- La permanente actualización tecnológica de las nuevas centrales nucleares, lo cual ha disminuido los impactos ambientales y los riesgos sobre la población que genera esta industria.
- Esta tecnología, al no emitir gases de efecto invernadero, permite que la industria nuclear participe económicamente en el mercado interno -dentro de sus propias cuotas- conforme a los mecanismos de Kyoto.

Por otra parte, las desventajas económicas de las centrales nucleares tienen relación con:

- Altas inversiones de capital inicial.
- Alto periodo de construcción.
- Una alta percepción de la tasa de descuento.

La construcción y operación de una central nuclear puede ser beneficiosa y el financiamiento de tales proyectos puede conseguirse a partir de las estructuras comerciales formales, siempre que se mantengan las condiciones de cumplimiento de la existencia de un balance correcto de los riesgos y de la rentabilidad. Los países que desean estimular inversiones en el área de la energía nuclear deben tomar medidas tendientes a conseguir una disminución de los riesgos que están en su área de control, por ejemplo aquellos vinculados con el licenciamiento y planificación, manejo de los desechos y el desmantelamiento de la central.

Es importante también y beneficioso que todas las cuestiones y conversaciones respecto del programa nuclear sean de consenso nacional, esto hará que disminuyan los riesgos políticos. Considerando, que por su naturaleza, los proyectos de energía-nuclear son de largo plazo, también es necesario que estos programas gocen del apoyo de la sociedad, lo que disminuye el riesgo de cambio de la política en caso de cambio de gobierno.

Por último cabe señalar que las centrales nucleares son un componente importante de la diversificación de la fuente de energía, es decir, son una garantía de la minimización de riesgos económicos para un país. Así lo es por ejemplo, el surgimiento de una deficiencia de la energía eléctrica respecto de la necesidad de re-equipamiento de las potencias energéticas ó por las interrupciones del suministro de los recursos energéticos, que son bastantes si la producción está basada en solo un tipo de fuente de energía.

Bibliografía

- 8.1.- New economics of nuclear power. WNA 2008.
- 8.2.- L. A. Sachenko, Las bases metodológicas de la administración del riesgo en la energía nuclear. El auto epítome de la tesis del candidato de las ciencias económicas, 2006 página 14
- 8.3.- V. V. Kovaliov, Bases de la gestión financiera. M.: Finanzas y estadística. 2000, p. 357
- 8.4.- U. V. Fedósova, Competitividad de las energías y tecnologías nucleares: el análisis económico. Estrategia nuclear, No 6, 2005. p. 21. Estrategia nuclear, No 6, 2005 p. 21.
- 8.5.- Saakov E. S., Riasny S. I., Fomín M. N., Optimización de la duración y de los gastos para la puesta en marcha de la central nuclear, Recopilación MNTK-2008, M, 2009, p 900-901.
- 8.6.- J. Redding, C. Muench, R. Graber. The Business Case for Building a New Nuclear Power Plant in the U.S. // Proceedings of ICAPP. Spain. 2003.
- 8.7.- Projected costs of generating electricity, IEA-OECD NEA, 2005 г. p. 27
- 8.8.- The New Economics of Nuclear Power. WNA Report 2008. p. 7
- 8.9.- V. M. Konanenko, Métodos y modelos de la evaluación de los proyectos de inversión de la modernización de los objetos de la energética nuclear, Resumen de la tesis del Candidato a Dr. en Ciencias Económicas. RGB, 2005, p. 27.
- 8.10.- Tarjanne Risto, Kivistö Aija, Comparison of electricity generation costs, Lappeenrante University of Technology, Faculty of Technology, Department of Energy and Environmental Technology Research Report EN A-56, Finland, 2008.

Capítulo 9

Recursos humanos¹⁵⁷

9.1. Desarrollo de los recursos humanos, científicos y pedagógicos

Se ha dicho, y existen argumentos suficientes para sostenerlo, que la tecnología nuclear, junto con la aeroespacial, constituye el pináculo que el desarrollo científico de la humanidad ha alcanzado hasta hoy. Por eso y dado el nivel de complejidad que reviste y el enorme cúmulo de conocimientos e información relacionada con el tema, la ciencia nuclear demanda altos grados de especialización y capacitación.

Es por esta razón que contar con recursos humanos adecuadamente calificados es una de las condiciones esenciales para el éxito de cualquier proyecto o programa de generación núcleo-eléctrica. Sin personal calificado no puede planearse, construirse ni operarse adecuadamente una central nuclear y, por tanto, tampoco se puede garantizar la seguridad y la fiabilidad de sus instalaciones. La cantidad y calificación de los recursos humanos requeridos para un programa nuclear exitoso normalmente es subvalorado y la escasez resultante de este error suele ser un factor limitante en el desarrollo de los proyectos y la transferencia de tecnología hacia los países en vías de desarrollo.

Los accidentes de las centrales nucleares de Three Mile Island (Estados Unidos) y Chernobyl (Ucrania) confirmaron la importancia de contar con recursos humanos competentes para garantizar el funcionamiento seguro de estas instalaciones. Aunque hay diferentes factores que contribuyeron a las causas de estos accidentes, es innegable que los errores humanos jugaron un papel importante, tanto en su génesis como en su control. Las acciones adecuadas exigidas para prevenir un accidente sólo pueden garantizarse por la destreza y la habilidad de los operadores, lograda apropiadamente a través de una educación apropiada, el entrenamiento, la experiencia y una capacitación sistemática y permanente para el mantenimiento y fortalecimiento de tales competencias.

La energía nuclear es una tecnología exigente que requiere de conocimiento específico y excelencia en la actuación de las personas. La educación y el entrenamiento toman tiempo

¹⁵⁷ Este capítulo se desarrolla para cumplir con los requerimientos del mandante establecidos en Términos de Referencia, en particular, al requerimiento de analizar las necesidades de recursos humanos y su calificación. La información recogida en este capítulo es de elaboración propia a partir de la información brindada con este fin por el Departamento de Recursos Humanos del Consorcio Rosatom de la Federación de Rusia.

y demandan considerable esfuerzo, por lo que un programa para el desarrollo de los recursos humanos necesarios para un programa nuclear debe preverse con suficiente anticipación para que sea eficaz.

Por consiguiente, existe la necesidad fundamental de que, antes que se tome la decisión de dar comienzo a un programa nuclear, o por lo menos en forma paralela, el Estado proporcione el establecimiento e implementación práctica de un plan integral para la formación de los recursos humanos, el cual debe cubrir todos los aspectos implicados, incluyendo la determinación de las necesidades, tanto respecto a la calificación del personal como en cuanto a cantidad, así como programas de educación básica, certificación especializada y calificación a través de la experiencia.

En esta etapa previa es necesario también evaluar las capacidades organizativas, educacionales e industriales existentes en el país para satisfacer esas necesidades. El desarrollo de los recursos humanos con participación nacional en el programa de centrales nucleares debe estar considerado dentro del más amplio contexto de la estrategia de desarrollo industrial nacional y sus requerimientos generales de recursos humanos. Las habilidades y calificaciones especializadas que se requieren en la industria nuclear para la producción de productos y servicios pueden desarrollarse utilizando como base los mismos recursos humanos de la industria eléctrica convencional u otras industrias.

La infraestructura educativa existente en la mayoría de los países, por ejemplo los varios tipos de escuelas y universidades, normalmente es suficiente para asegurar una formación técnica básica. Sin embargo, esta debe proporcionar también una base adecuada para garantizar los entrenamientos especializados en aquellas áreas de la tecnología nuclear más complejas, según el programa previsto.

En la actualidad, un número importante de universidades de diferentes países que poseen esta tecnología, e incluso de países en vías de desarrollo, está ofreciendo continuamente cursos de preparación en disciplinas profesionales con especialización en áreas tales como la física nuclear, ingeniería nuclear, protección radiológica y de la salud, garantía de calidad, etc. Los requerimientos de recursos humanos para esta industria incluyen tanto las áreas de la energía convencional como las técnicas nucleares especializadas; por ello es lógico esperar que en países en vías de desarrollo se pueda garantizar la base educacional para, al menos, estas tecnologías convencionales.

Por otro parte, la especialización y el entrenamiento en las disciplinas nucleares o en aquellas disciplinas convencionales requeridas en la industria nuclear, están disponibles en países desarrollados como Rusia, Estados Unidos, Francia, España, entre otros. Tales entrenamientos consisten tanto en instrucción especializada como directamente en puestos

de trabajo relacionados con labores específicas. Este tipo de especialización también puede formar parte de acuerdos de cooperación internacional o del contrato suscrito con el proveedor principal de la tecnología. Antes y durante la construcción, licenciamiento y operación de una central nuclear varios cientos de funcionarios técnicos deberán pasar a través de un programa de entrenamiento. La mayor parte de ellos serán capacitados en el mismo puesto de trabajo (doblaje) para adquirir las habilidades necesarias para un correcto desempeño.

A fin de entregar una estimación de los volúmenes de graduados en instituciones educacionales demandados por la industria nuclear, a continuación se detalla información obtenida por la experiencia rusa, la cual resulta indicativa en cada una de las especialidades:

- Para asegurar la capacidad de trabajo de las centrales actualmente en operación en Rusia (31 centrales) se necesitan 90 nuevos graduados en las diversas especialidades nucleares, cada año.
- La plantilla de una central nuclear con dos bloques energéticos necesita 150 expertos, preparados en estas mismas especialidades.
- Para garantizar la preparación del personal necesario se encuentran abiertas cátedras de estas especialidades en 8 universidades.
- De acuerdo con la experiencia alcanzada en la construcción y operación de centrales nucleares rusas en el extranjero, en los contratos correspondientes se prevé la preparación del personal acordada entre las partes incluyendo la preparación en el puesto de trabajo (doblaje).

Es necesario también tener en cuenta que Rusia es un país productor de tecnologías nucleares, por lo que la cantidad de personal que se capacita en el país es muy superior a lo señalado previamente, pues una parte considerable de los especialistas graduados se destinan al trabajo en las instituciones científicas y de proyectos relacionados con estas tecnologías.

9.1.1. Indicadores cuantitativos y especialidades

Como se mencionó anteriormente, la construcción y la operación de una central nuclear origina la necesidad de contar con recursos humanos de alta calificación (ver Tabla 9.1,

Figura 9.1). Durante la construcción de la central nuclear participan los proyectistas, en la fase inicial de proyecto; y los constructores, los montadores y los ajustadores de las instalaciones y equipos, en fases posteriores.

Tabla 9.1 - Número aproximado de trabajadores en las diferentes categorías básicas de trabajo (considerando la construcción de un bloque energético de 1.000 MW).

Categoría trabajadores	Período de construcción [año]					
	1	2	3	4	5	6
Total de trabajadores para la construcción, el montaje, y puesta en marcha, incluyendo:	1.015	2.135	6.280	4.410	3.725	675
Constructores	950	1.620	2.670	2.550	1.180	75
Montadores mecánicos	-	45	1.350	225	950	40
Montadores eléctricos	5	95	870	430	690	40
Otros (trabajadores, ingenieros, técnicos, ajustadores y obreros auxiliares)	60	375	1.390	1.205	905	520
Personal de investigación y diseño	1.323	1.323	1.323	1.323	-	-

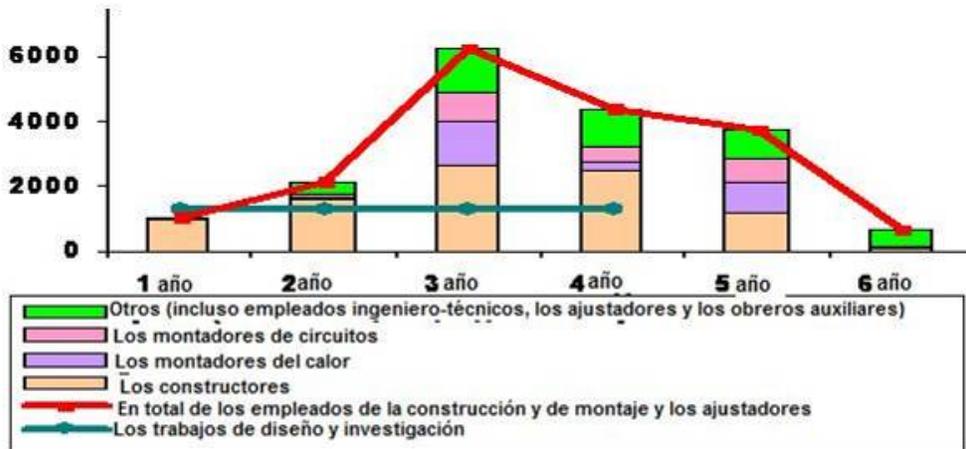


Figura 9.1 - Necesidades de recursos humanos para la construcción de una central nuclear típica, con reactor VVVER-1150.

Para las obras de una central nuclear de dos bloques son necesarios 8.000 trabajadores, destinados a la construcción y el montaje de la central. En la ejecución de los trabajos de construcción y montaje se establecen contratos con organizaciones locales y de otras regiones, para la preparación y el uso de los recursos humanos que posean la experiencia en los trabajos de construcción en las centrales nucleares.

En este estudio la valoración de las necesidades básica de trabajadores se analizará a partir de la construcción de una central de dos bloques energéticos, con una potencia de 1.000 MW cada uno. La valoración general de la cantidad de trabajadores para un bloque, de acuerdo con la experiencia rusa, se calcula según la siguiente expresión:

$$N_{300} = \frac{N_{1000} \times 1,5}{4}$$

Donde N_{300} es la cantidad de trabajadores para una unidad de energía por la potencia de 300 MW; y N_{1000} es la cantidad del personal sobre una unidad de energía por la potencia de 1.000 MW.

La precisión exacta del número de trabajadores para cada bloque energético depende del proyecto en concreto.

Durante la construcción de una central nuclear se ejecutan dos categorías de trabajos:

1. Los trabajos de carácter general de construcción, que ejecutan las empresas constructoras con cerca de 5.000 trabajadores,
2. Los trabajos de montaje, para cuya ejecución son necesarios cerca de 3.000 trabajadores. Durante estas labores se ejecutan obras especializadas de montaje, a cargo de especialistas de alta calificación, cuya cantidad está cerca de las 1.500 personas.

La cantidad de trabajadores vinculados a la operación para dos bloques energéticos será de 1.600, lo cual incluye 496 administrativos y de dirección, 525 empleados para la operación y 579 para los trabajos de mantenimiento. En las Tablas 9.2 y 9.3 se recoge la necesidad de trabajadores con educación superior y media profesional según las especialidades más demandadas.

Tabla 9.2 - Necesidades de especialistas con formación profesional superior.

Nº	Denominación de la especialidad	Cantidad de personas
1	Grupo de las especialidades energéticas, construcción de maquinaria energética y electrotécnica	21
2	Centrales termoeléctricas	32
3	Tecnologías del agua y del combustible en las centrales termoeléctricas y nucleares	16
4	Curso de preparación en electrotécnica	17
5	Reactores nucleares e instalaciones energéticas	45
6	Electrónica y automática de instalaciones físicas	19
7	Seguridad radiológica de la persona y el medioambiente	13
8	Centrales nucleares e instalaciones	77
9	Curso de preparación en electrotécnica, electromecánica y técnicos eléctricos	14
10	Equipos eléctricos y automáticos de instalaciones industriales y complejos tecnológicos	17
11	Física de metales	2
12	Metrología y aseguramiento metrológico	15
13	Construcción de equipos electromecánicos	8
14	Curso de preparación en telecomunicaciones	20
15	Curso de preparación en gestión de calidad	6
16	Computadoras, complejos, y redes	31
17	Sistemas informáticos y tecnológicos	15

Nº	Denominación de la especialidad	Cantidad de personas
18	Protección ingenieril del medioambiente	3
	TOTAL	371

Tabla 9.3 - Necesidades de especialistas con formación media profesional.

Nº	Denominación de la especialidad	Cantidad de personas
1	Centrales termoeléctricas	6
2	Equipos de suministro térmico y tecnología térmica	2
3	Tecnologías del agua, combustible y lubricantes en centrales térmicas	190
4	Seguridad radiológica	32
5	Centrales nucleares e instalaciones	31
6	Operación técnica y mantenimiento de instalaciones eléctricas y electromecánicas	89
7	Física de metales	3
8	Operación técnica de equipos de izaje y transporte, para la construcción y construcción de carreteras	3
9	Operación de medios de comunicación	14
10	Mantenimiento técnico de medios de cálculos y redes informáticas	4
11	Curso de preparación en tecnología química de materiales	16
12	Montaje y operación de instalaciones técnico-sanitarias interiores y ventilación	12
	TOTAL	412

9.2. Formación de trabajadores previo al inicio de operaciones

La preparación del personal destinado a operar la central nuclear en construcción debe ser asegurada por sus directivos en el momento de recibir la licencia respectiva, por parte de la Autoridad Reguladora Nacional (en el caso de la Federación de Rusia es la AFCN).

La selección, la preparación, los permisos de trabajos independientes y la calificación del personal son responsabilidad de la entidad explotadora de la central nuclear. El sistema de selección y preparación de estos recursos humanos deben estar orientados a alcanzar el control y mantenimiento del nivel de calificación necesario para garantizar el funcionamiento seguro de la central en todos los regímenes, así como la ejecución de las medidas destinadas a eliminar las eventuales consecuencias de posibles averías. El principal elemento del contenido con que se realice esta preparación debe ser la formación de una cultura de seguridad.

En este proceso de capacitación es necesario brindar experiencias prácticas de operación de la central nuclear, utilizando medios técnicos de enseñanza que incluyen simuladores de diferentes tipos. Una especial atención se presta a las acciones directamente relacionadas con posibles infracciones, errores de procedimiento y averías, así como la revisión exhaustiva de experiencias anteriores.

El personal de una central nuclear debe someterse periódicamente a controles médicos, ya que su estado de salud garantiza en gran medida la ejecución segura y confiable de las actividades que habrán de desempeñar en la central en que operan.

Todos los trabajadores seleccionados para desempeñarse en la central nuclear deben recibir instrucción específica para el puesto que ocuparán. Los programas de preparación para estas plazas de trabajo deberán estar preparados en un plazo no superior a 6 meses previos a la puesta en marcha de las obras de construcción, en directa coordinación con el programa de ajuste y puesta en marcha de las instalaciones físicas y energéticas, el cual considerará los siguientes contenidos:

- Estudio de los sistemas y equipamiento del bloque de la central nuclear.
- Estudio de las particularidades de la operación (los reglamentos, las disposiciones, las instrucciones de operación y de seguridad) de los sistemas y equipamiento.

- Estudio, en el lugar del ajuste y puesta en marcha de las instalaciones, del equipamiento, la maquinaria y los sistemas que prestarán servicios durante de la operación de la central nuclear.
- Participación en los trabajos de ajuste y puesta en marcha y pruebas de arranque de los sistemas y equipos.
- Realización de un examen de certificación.

La dirección de la central nuclear está obligada a concluir la preparación y los permisos de trabajo del personal antes de la puesta en marcha de la central nuclear y garantizar:

- La obtención de los permisos de trabajo otorgados por parte de la Autoridad Reguladora Nacional para iniciar los trabajos por parte del personal que participa en el programa de puesta en marcha física (en caso necesario).
- Formalización de las actas de comprobación de los conocimientos de los trabajadores que participan en la puesta en marcha.
- Emisión de la orden del director de la central nuclear sobre el permiso al personal para trabajar de manera independiente en la etapa de la puesta en marcha.

Del mismo modo, al comienzo de la puesta en marcha del bloque la dirección de la central nuclear debe garantizar también que:

- el personal de la central nuclear está completo, en correspondencia con la plantilla definida;
- todo el personal cuente con la preparación adecuada para el puesto de trabajo correspondiente así como con el permiso para desempeñarlo de manera independiente.

Como consecuencia de las altas exigencias de calificación del personal de operación de la central nuclear, su preparación para ocupar un puesto de trabajo dura en periodo de tiempo, que a continuación se detalla:

- Personal de la Sala de Control del Bloque (ingeniero jefe la instalación del reactor, ingeniero jefe de la instalación de la turbina): 7 meses de instrucción.
- Jefe de Turno del Taller (taller del reactor, taller de la turbina, taller de automática y metrología, taller energético, departamento de protección radiológica, taller

químico): con no menos de 2 años de experiencia de trabajo en los talleres, requiere 1 año de instrucción adicional.

- Jefe de Turno del Bloque de la central nuclear: 3 años de instrucción.

9.3. El Centro de Enseñanza y Entrenamiento

Para la preparación del personal de operación de un bloque energético se debe incluir en las instalaciones que se construirán un área destinada a funcionar como Centro de Enseñanza y Entrenamiento, el cual debe garantizar la:

- creación de una base material de información respecto al proyecto de la central nuclear, necesaria para capacitar a los operarios;
- preparación de instructores del Centro de Enseñanza y Entrenamiento;
- elaboración de programas de preparación para cada puesto de trabajo y para la capacitación del personal calificado, junto con el desarrollo de materiales metodológicos y de estudio necesarios;
- organización y ejecución del programa de preparación del personal y su capacitación permanente.

Por último, con seis meses de antelación a la puesta en marcha del reactor, los operadores de la central deben garantizar a la Autoridad Reguladora el funcionamiento exitoso de su personal ante un simulador a plena escala.

9.3.1. Certificación de los especialistas

Anualmente el personal de la central nuclear debe acreditar sus habilidades y conocimientos vigentes en relación a las tareas que realizan en la central nuclear.

El permanente aumento de la calificación del personal de la central se realiza con el objetivo de renovar los conocimientos teóricos profesionales y las practicas de trabajo y con una periodicidad de cinco años, en los centros de preparación profesional complementaria.

Conclusiones

Contar con especialistas y técnicos de alta calificación profesional es una de las necesidades más relevantes para el desarrollo de cualquier programa de generación de electricidad con tecnología nuclear. Este aspecto también es uno de los más relevantes para garantizar la seguridad en todas las etapas del ciclo de vida de una central nuclear.

Ciertamente, a la hora de dar inicio a la industria nuclear en una nación se ha de definir y desarrollar un completo plan de educación, formación y capacitación de profesionales destinados a desempeñarse como operarios, en las diversas plazas de trabajo que demandará el proyecto, a fin de garantizar no solo la operación de la central de energía sino la ejecución correcta de todas aquellas actividades que están vinculadas con esta en cada etapa, por ejemplo las realizadas por constructores, proyectistas, investigadores, administrativos, etc. Como regla, el total de trabajadores que se destina a una central nuclear de 1.000 MW es del orden de 800 personas, es decir 0,8 hombres por MW instalado.

La capacitación en la rama nuclear es una tarea difícil y compleja, cuya ejecución exitosa exige de una planificación impecable, la preparación oportuna y la revisión multilateral de la experiencia acumulada por la rama. Para realizar con éxito estas tareas, los países que no poseen un desarrollo propio de la industria nuclear cuentan con diversos mecanismos de cooperación internacional, como se demuestra en la experiencia de Rusia con países como Finlandia, India, China, Bulgaria, entre otros.

El grado de especialización de los operadores que requiere una central nuclear comienza con una base similar al nivel medio y superior de quienes se gradúan en especialidades convencionales para la industria eléctrica tradicional, por lo que un proyecto núcleo eléctrico representa la creación de nuevas oportunidades de trabajo que amplían considerablemente las oportunidades de estas personas que ya cuentan con una formación adecuada para el sector energético.

A partir de esta base se hace necesario el permanente entrenamiento y la capacitación en los temas específicos de la generación núcleo eléctrica, con lo cual la transferencia de conocimiento que recibe el país representa un avance enorme y un impulso sin paralelo para la actividad académica, la investigación científica y el desarrollo tecnológico, colocando a esa nación a la vanguardia mundial.

Bibliografía

La información recogida en este capítulo es de elaboración propia a partir de la información brindada con este fin por el Departamento de Recursos Humanos del Consorcio Rosatom de la Federación de Rusia. Adicionalmente, se utilizaron las siguientes fuentes:

- 9.1.- Guidebook on engineering and science education for nuclear power, IAEA, Vienna (1986)
- 9.2.- Frances Mautner-Markhof, Engineering and science education for nuclear power, Co-operative approaches exist to attain necessary standards of excellence, IAEA Bulletin 2/1988

Capítulo 10

Aspectos sociales

10.1. Significado social

Hoy más que nunca el bienestar de la sociedad moderna en su conjunto está determinado por la disponibilidad y el acceso garantizado a la energía eléctrica, tanto para la población, como para los centros industriales y productivos de los países. El nivel de complejidad alcanzado por la humanidad, el desarrollo de la ciencia y el frenético ritmo de producción es tal que la existencia misma de la sociedad está íntimamente relacionada con nuestra capacidad de contar con la energía que demandamos, cada vez en mayores cantidades. Los acontecimientos de los últimos años demuestran que las crisis que se producen ante la falta de suministro entrañan serias consecuencias que repercuten profundamente en nuestra civilización. En esto también tienen una importancia capital los fenómenos climáticos causados por el consumo de combustibles fósiles, hasta el tan antiguo como repudiable hábito de desatar la guerra para obtener control sobre estos recursos.

Sin duda, ha llegado la hora de hacer modificaciones profundas a la forma en que hemos encarado por siglos este problema y asumir, seria y responsablemente, el hecho cierto de que la producción sostenida de energía, presionada por la creciente demanda, inevitablemente repercute sobre los limitados recursos naturales, situación que conlleva a un alto grado de inestabilidad y amenaza tanto el precario equilibrio económico y social de nuestro mundo, como el delicado balance del planeta.

Surgen entonces dos preguntas claves que cada país debe plantearse a la hora de considerar sus requerimientos de energéticos: ¿Cuál es el verdadero nivel de consumo de energía que se requiere? y ¿se está dispuesto a pagar el precio y asumir la responsabilidad que conlleva el grado de desarrollo al que se aspira como sociedad? Para dar respuesta a estas interrogantes necesariamente se debe considerar un equilibrio adecuado entre las necesidades económicas del ser humano y el cuidado y respeto que se debe tener al planeta que nos alberga.

Hasta comienzos de este siglo las consideraciones medioambientales no tenían prioridad dentro de los planes de desarrollo de las naciones, por lo menos para la mayoría. Estos factores no gravitaban ni en su política económica ni en su planificación energética. ¿El motivo? Los costos calculados eran demasiado altos y su beneficio directo aparecía difuso, sino prácticamente inexistente. La luz de alerta en este sentido la provocó la irrupción del

cambio climático en la agenda de temas prioritarios. Se hizo evidente, sobre la base de antecedentes científicos, que este fenómeno es producto del calentamiento global de la atmósfera, ocasionado a su vez por la emisión de gases de efecto invernadero. Poco a poco y cada vez con mayor fuerza se generó el consenso internacional sobre esta realidad y el desafío de enfrentarla y resolverla en una acción conjunta y contra el tiempo. Hoy, afortunadamente, se ha expandido la certeza de que aquello que es bueno para el medioambiente también lo es para los negocios. Cuidar del planeta es una inversión rentable y en este sentido los proyectos sustentables de desarrollo energético aparecen con el doble carácter de ser prioritarios y ventajosos, en el escenario presente y, sobre todo, en el futuro inmediato.

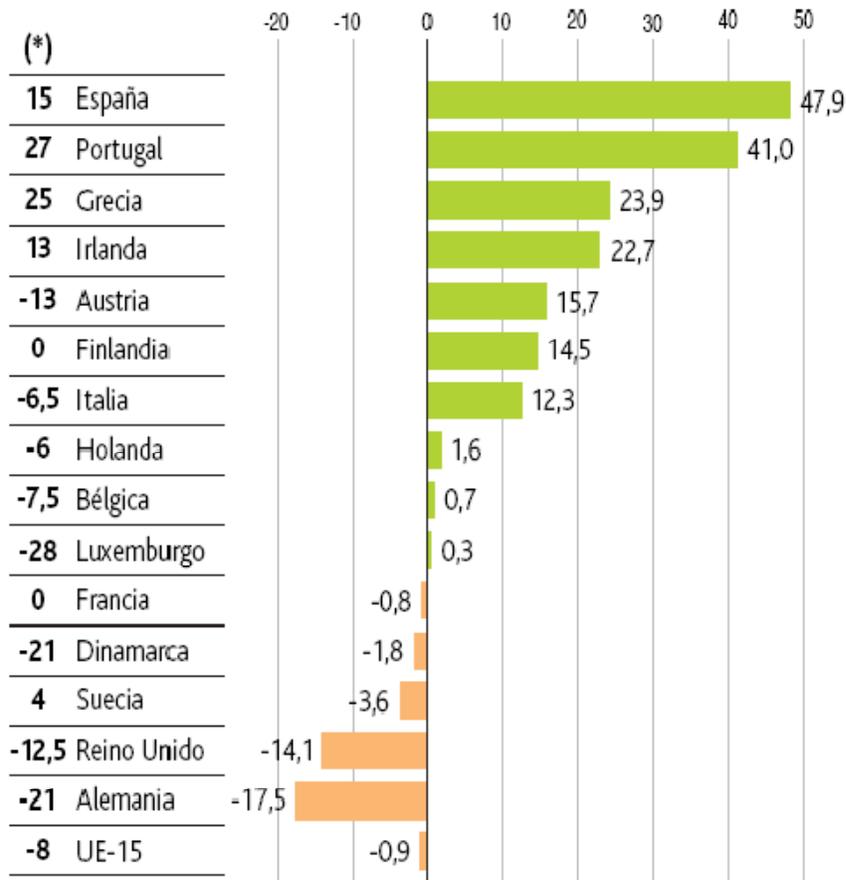
La Federación de Rusia ha sido uno de los países pioneros en ese sentido¹⁵⁸. En la sesión de la ONU del 6 de septiembre de 2000, el Presidente Vladimir Putin, confirmó la posición de su país respecto a este tema al señalar que “la energía es un tema eminentemente social que afecta no solo a un país sino a la humanidad entera”. Por lo tanto, es preciso hacer un esfuerzo común entre los países para formular un sistema internacional para el desarrollo energético sustentable. En otras palabras, crear una doctrina que contenga una nueva ideología energética basada en el principio de no dañar al planeta Tierra y tampoco afectar el desarrollo de la sociedad”. Para ello Putin propuso dar prioridad a los trabajos y las opiniones de los científicos que se desempeñan en esta área y definir aquellas tecnologías aptas para enfrentar el desafío. Este es un aspecto importante, ya que se sabe que existen tecnologías baratas y simples, especialmente en el rubro del transporte, que habrían permitido sustituir ya una parte de los combustibles fósiles, pero éstas aún no son de uso comercial debido al lobby de la industria petrolera. No es misterio ni secreto para nadie el poder que este sector ha ejercido sobre ciertos ámbitos relevantes de toma de decisiones a nivel mundial en la mayoría de los países desarrollados.

Hay que ser objetivos y reconocer que hoy la realidad dista mucho de lo ideal. Es necesario asumir que muchas naciones no han sido capaces de cumplir con las tasas definidas para reducir el aporte que deben realizar para disminuir la contaminación del medioambiente, según los acuerdos internacionales que se han adoptado en la materia, particularmente el Protocolo de Kyoto. Firmado el 10 de diciembre de 1997 como acuerdo final de Convención sobre Cambio Climático realizada en la ciudad japonesa de Kyoto, el compromiso de los países industrializados para reducir las emisiones de gases contaminantes en un promedio de 5% entre los años 2008 y 2012, en relación con los niveles registrados en 1990. Cada país signatario fijó sus propias metas: las naciones de la Unión Europea se impuso una

¹⁵⁸ E. P. Velikhov, La energética nuclear y termonuclear en el siglo XXI, Energía: Economía, la Técnica, Ecología, № 10, 2001.

disminución del 8%, mientras que Japón se planteó un 5%. En cambio, a algunos países con bajas emisiones se les autorizó a incrementarlas y también se fijó un complejo sistema de compensaciones que dio origen al mercado de los bonos de carbono.

Recientemente la Organización de Naciones Unidas informó que las naciones industrializadas no están ahora cumpliendo con sus metas y predice que para 2010 las emisiones estarán en un 10% por encima de los niveles de 1990.



(*) - *Compromiso de emisiones período 2008-2012 según Protocolo de Kyoto.*

Figura 10.1 - Cumplimiento del Protocolo de Kyoto en la Unión Europea.¹⁵⁹

¹⁵⁹ Energía y Cambio Climático, Documento elaborado por Foro Nuclear (Datos proporcionado por Agencia Europea del Medioambiente, 2006).

Es por eso, que la producción de energía tiene aun interrogantes sin resolver. Una de estas es lograr determinar cuál es el margen de riesgo aceptable socialmente para una u otra fuente de energía y alcanzar el equilibrio necesario entre beneficio inmediato e impacto ambiental.

El significado social y el grado de tolerancia al riesgo de cada una de las fuentes de energía¹⁶⁰ se encuentran vinculados de una manera peligrosa, ya que a mayor consumo, más alto es el bienestar de la población, pero esto a su vez trae consecuencias negativas sobre los recursos. Por lo tanto, existe una dualidad implícita en su mecanismo de puesta en marcha. Necesariamente el equilibrio pasa por una adecuada selección de las fuentes de energía disponibles, dando preferencia a aquellas que son relativamente baratas y que no conlleven al agotamiento de los recursos naturales.

Por todos los argumentos expuestos hasta acá, en la estructura de desarrollo energético de un país, la tecnología nuclear puede ocupar un lugar especial si así lo decide el gobierno de ese país. Una central nuclear no es un simple generador de energía eléctrica, representa algo más, ya que, al igual que la tecnología aéreo-espacial, es la cima del progreso científico-técnico de la humanidad y el resumen de importantes logros de la ciencia y la investigación. El propósito final de tantos esfuerzos, durante años, es poner la ciencia al servicio del hombre para resolver los problemas sociales, económicos y ecológicos que por medios tradicionales no se pueden solucionar.

Rechazar, a priori, la opción nuclear representa una falta de mirada global para abordar la problemática energética del mundo moderno, ya que no se trata de un asunto circunscrito a una determinada región, ni siquiera a un sector determinado de la economía en este caso, el energético. Del mismo modo, se trata de un prejuicio limitante para quienes deben ejercer la misión de gobernar, ya que priva a la población de una alternativa que podría ser beneficiosa para el país, sin siquiera darle la oportunidad de considerarlo. Además, quienes así proceden terminan siendo parte del problema sin contribuir para nada a la solución. Podrán estar movidos por las más loables intenciones, como es el caso de los activistas medioambientales, pero en el desconocimiento de los avances tecnológicos desarrollados por la industria nuclear terminan, sin duda involuntariamente, siendo útiles a los intereses de la industria del combustible fósil y está probado que por esa vía el efecto invernadero solo puede agravarse.

Distinto es el caso de las fuentes de energía renovables, sin embargo hay que asumir que su

¹⁶⁰ Subbotin S. A., Riesgo: Condición indispensable del desarrollo, Energía: Economía, Técnica, Ecología, №. 8, 2001.

desarrollo tecnológico aún está lejos de garantizar el suministro y la potencia de energía adecuados para las tasas de demanda actual.

Una prueba de genuino interés y disposición a enfrentar de manera seria estos desafíos es sin duda abrirse a estudiar la opción nuclear, ya que los argumentos de la comunidad científica internacional están hoy disponibles para entrar al debate y contribuir desde el punto de vista científico a encontrar una solución a las necesidades apremiantes del planeta que merecen toda la consideración y atención posible, con responsabilidad y visión de Estado para hacer lo correcto y no simplemente lo que garantiza popularidad.

10.2. Aceptabilidad social de la energía nuclear^{161, 162}

La tecnología nuclear ha estado envuelta en una serie de mitos y desinformaciones. En esto han influido mucho los accidentes de Three Mile Island (Estados Unidos) y Chernobyl (Ucrania), pero también el hecho de que las radiaciones son un peligro invisible para el ser humano y las personas no saben ni de qué se trata realmente ni cómo enfrentar esta amenaza, por lo que aumenta el temor hasta grados irracionales o supersticiosos.

La eventualidad de un problema en una central nuclear implica un aumento de la tensión social. Los aspectos básicos a los cuales teme la población son:

- Presencia de radiación que provoca daños biológicos al organismo
- Eventualidad de explosión del reactor con la posterior destrucción de la población más cercana y contaminación del territorio por años

Después los accidentes señalados, se formó la idea social dominante de que “un reactor nuclear es peligroso”. Si bien ha comenzado a ser superada en parte últimamente, desestimar por completo esta visión social no parece posible, pero si se puede disminuirla informando y educando debidamente a la opinión pública.

Hoy, una parte de la población está predispuesta emocionalmente en contra de lo nuclear, muy atenta a cualquier hecho o noticia que permita continuar argumentando en su contra. También hay grupos ecologistas con oposición muy fuerte, que se han transformado en

¹⁶¹ Ponukalin A. A., Estrategia de la dirección social del desarrollo de la energética nuclear, Tesis para optar por el grado de Candidato a Doctor en Ciencias Sociales, RGB, 2005.

¹⁶² Plankina N. A., La aceptabilidad social de la energética atómica: el análisis sociológico y la estrategia de la formación, Resumen de la Tesis Predoctoral, Las Ciencias, Sarátov, 2003.

verdaderos activistas en esa área. Ellos no quiere escuchar argumentos, no profundizan el problema en el contexto global de funcionamiento de la actual sociedad y tampoco proponen soluciones realistas al tema, pero sin embargo, gozan de cierta simpatía por parte de la opinión pública que mayoritariamente no diferencian entre “ecólogos” (cuando se oponen a algo lo hacen con argumentos y proponen alternativas) y “ecologistas” (simplemente se oponen, son activistas).

El hecho es que existe esa predisposición en nuestra sociedad, hecho que queda de manifiesto cuando, por ejemplo, ante la ocurrencia de algún incidente nuclear, por pequeño que este sea, los medios de comunicación no profundizan en sus verdaderas causas y se limitan a reproducir informaciones alarmistas. Por otro lado, cuando hay un informe nuclear positivo, este se publica en un contexto que al menos insinúa dudas, como por ejemplo el uso de colores negro y amarillo, acompañados de palabras o símbolos de elementos radioactivos que denotan “peligro”¹⁶³. Todo esto puede llegar a provocar incluso pánico en la población.

En el año 2006 la población de San Petersburgo, de Rusia, reaccionó con mucha alarma ante la publicación en los medios masivos acerca de un supuesto accidente en la Central Nuclear Leningrado, aunque lo que había ocurrido en realidad no era más que un incidente operacional que no significó fuga de radiación, pero dio motivo para que todos los días, durante varias semana, se publicaran noticias que en su mayoría eran insignificantes en relación a lo ocurrido, y más aún, si se leían detenidamente no era motivo de alarma alguna, pero en el contexto y enfoque editorial en que se presentaban las personas reaccionaban emocionalmente mal.

Por estos motivos es que una adecuada difusión de la tecnología nuclear en sus aspectos básicos - ¿cómo funciona? y ¿cuáles son sus mecanismos de seguridad?-, es fundamental y el Estado debe jugar un papel primordial en esto. No solo se debe considerar un material didáctico adecuado, también hay que tener presente los conceptos relacionados con la “psicología de masas”, la idiosincrasia y la estructura social del país.

Durante este proceso de difusión (que es permanente) se debe además destacar los siguientes aspectos inherentes a la tecnología nuclear:

- El nivel de vida de los trabajadores de una central nuclear.
- El nivel académico de sus trabajadores.

¹⁶³ Gamó E., Energía sin peligro, Energía: Economía, Técnica, Ecología, №. 8, 2001.

- La cantidad de empleos asociados de manera directa e indirecta que genera.
- El impulso que significa para la ciencia cuando se le da un uso adecuado a la infraestructura de una central nuclear, considerándola en algunos casos como un laboratorio para el desarrollo de investigaciones.
- El desarrollo de la industria relacionada con la construcción de la central nuclear.
- La seguridad energética que por este medio se alcanza para el país, pues le permite a los empresarios, en el contexto actual de economía de mercado, invertir con más seguridad en sus respectivos proyectos.

Por todo lo anterior es que la mayoría de los países coinciden en que antes de optar por la generación núcleo-eléctrica hay que tener en cuenta que “el riesgo de radiación debe ser socialmente aceptable”. Esta consideración se encuentra formulada en la mayoría de los documentos oficiales de aquellos países con experiencia en la generación de electricidad por medios nucleares. La opinión de estos países es que la sociedad debe conocer los fundamentos básicos de esta tecnología y tener una opinión lo más técnica posible respecto a ella, pues solo de esa forma, podrá comprender los argumentos que dará el gobierno para una eventual construcción de centrales nucleares. Es por eso que en estos países se le da mucha importancia a la “información que se le brinda al país” con relación a este tema. El método más común utilizado es ubicar centros de difusión en las principales ciudades, en los cuales se muestra, mediante mecanismos didácticos, el funcionamiento de una Central Nuclear. En estos centros la entrada es gratuita y la información que se proporciona a la población se realiza mediante el uso de maquetas y medios audiovisuales adecuados.

Por ejemplo, en Rusia se tomó la decisión de incrementar el aporte nuclear a su matriz eléctrica de un actual 17% a un 25%. Dentro del contexto de este proyecto se consideró también el aspecto social de difusión de este plan nacional, al cual se le denominó: “La Seguridad Nuclear y Radiológica de la Federación de Rusia para los años 2000-2006”. Su objetivo principal era disminuir, en este periodo de tiempo, el grado de alarma en la sociedad por el riesgo de impacto radiológico en las personas y en el medioambiente, por los nuevos proyectos nucleares que se pusieron en marcha.

La experiencia internacional señala que los países que optaron por la energía nuclear lo hicieron básicamente por los siguientes motivos:

- Necesidades de gran cantidad de energía y que esta fuera independiente de las condiciones naturales (recursos hídricos) y factores internacionales externos (combustibles fósiles)

- Aspiración de insertarse en el grupo de países que disponen de tecnologías de avanzada para acceder al conocimiento que permite utilizar el átomo para generar, no solamente electricidad, sino también el uso de reactores nucleares de investigación que permiten realizar investigaciones propias, por un lado, y por otro cubrir los requerimientos indispensables en el campo de la medicina, la construcción y la prospección geológica.

La mayoría de los países que utilizan hoy la tecnología nuclear tomaron la decisión en los años 70 y 80 y sin mayores consultas a la población. Hoy no es aconsejable hacerlo de este modo. Es preciso que la gente esté debidamente informada antes de iniciar un proyecto nuclear en un país. También hay que tener en cuenta que la tendencia actual es traspasar al sector privado la función de generación de electricidad. Esta situación tiene ventajas en todo lo relativo a los aspectos económicos, pero hace más difícil realizar la labor de difusión social, por cuanto el interés del sector privado es local y eminentemente económico, no así el del Estado.

En países como Chile, donde el sector privado tiene un rol activo en la generación eléctrica, si se llegase optar por incorporar la tecnología nuclear, sería necesario elaborar una estrategia común de trabajo público-privado, en donde el Estado debe asumir su rol social y de control y el sector privado, su papel de inversionista y operador, lo cual ha demostrado ser una buena combinación de intereses.

10.3. Impacto laboral

Analizando los aspectos positivos desde el punto de vista del impacto social, con la construcción de las centrales, 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 - 6.000 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.

La explotación de una central nuclear 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 alcanzándose alta disciplina laboral que puede ser transferida al resto de las industrias y servicios del país.

10.4. Riesgo subjetivo y objetivo

Desde el punto de vista formal la central nuclear es una empresa de producción, que en el contexto de un país cumple con una multitud de funciones, prácticamente en todos los aspectos: socio-económico, psicológico, cultural, de costumbre, político, etc. Pero por el modo de producción de su producto final (electricidad) - mediante la fisión del átomo - la central nuclear presenta un eventual peligro para el medioambiente y los habitantes. Por eso en un sentido objetivo y subjetivo es una importante fuente de amenaza.

La amenaza objetiva está relacionada con eventuales averías de una central nuclear, producto de la cual pueden derivar efectos negativos vinculados a una fuga radioactiva, su influencia sobre el medioambiente y los efectos nocivos sobre la población colindante a las instalaciones averiadas. La identificación de este eventual peligro, la ubicación de sus instalaciones en las zonas industriales y habitadas de las ciudades obliga a incluir a las centrales nucleares en la categoría de instalaciones industriales que están sometidas a controles rigurosos por parte de órganos e instituciones especializados¹⁶⁴.

La amenaza subjetiva, a su vez, es la tensión a la que está sometida la persona por supuestas amenazas que no siempre se corresponden con el verdadero grado de riesgo que existe realmente, condicionado por distintas circunstancias. En la actualidad, uno de los factores esenciales de tal condición lo constituyen las ya citadas averías en Three Mile Island¹⁶⁵ y Chernobyl¹⁶⁶, cuyas causas fueron detalladamente explicadas a la población de

¹⁶⁴ Ponukin A. A., *Energética Nuclear: Peligro Objetivo y Subjetivo*, Problemas Científicos de la Seguridad Nacional de Rusia, Saratov 2003.

¹⁶⁵ <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html>.

las regiones donde se encuentran estas centrales y que aparecen publicadas en las citas realizadas. A pesar de esto, en la opinión pública subsisten distintas versiones al respecto, incluyendo explicaciones místicas de la tragedia, así como imperfecciones en la tecnología misma, errores de diseño, sabotaje o errores de operación. También se habló de experimentos científicos realizados incluso por supuestos enemigos que provocaron un sismo inducido de baja intensidad que afectó los procesos físicos en el reactor y como resultado ocurrieron fenómenos desconocidos como la formación de un campo magnético cuya influencia provocó el accidente, etc. De todo se habló.

Una particularidad de la mentalidad humana es que en situación de amenaza, su cerebro calcula involuntariamente la probabilidad de un acontecimiento desfavorable y en caso de que esa sea alta, surge el miedo constante que provoca un desajuste emocional y consecuencias somáticas adversas al organismo. Si además consideramos que el riesgo es desconocido, por cuanto el individuo está mal informado, los rumores hacen presa fácil de esta persona y el desajuste emocional es aún mayor en tales circunstancias. En estas situaciones las personas que están expuestas al riesgo, sea este real o inexistente, adquieren un estado mental negativo, el cual puede llegar a ser muy contagioso entre la población y con relativa facilidad puede “cundir el pánico”. Dependiendo de cómo se maneje esta situación esto se verá reflejado en el estado mental de la población, con lo cual en definitiva, la sociedad oscila entre un índice de bienestar a un índice de infortunio social.

Los riesgos, tanto el objetivo como el subjetivo, intervienen en el desarrollo de la persona y de la sociedad. Teóricamente, el riesgo es considerado como la probabilidad de que puede pasar un acontecimiento indeseable a causa de la influencia casual o intencional sobre aquellos acontecimientos puestos en marcha. Habitualmente el riesgo objetivo supone la apreciación de los posibles resultados negativos para un evento y la probabilidad de aparición de tales consecuencias, las cuales incluyen pérdidas económicas concretas y naturales. La característica del riesgo se calculará como el producto de las consecuencias por su probabilidad¹⁶⁷. Los autores del trabajo: “Riesgo: condición indispensable del desarrollo” (ver bibliografía) estipulan que entre la seguridad S , el peligro NS y el riesgo RZ hay una correlación: $NS = RZ/S$. Ya que la seguridad y el riesgo son valores inversamente proporcionales, la gestión de la seguridad se hace mediante la gestión del riesgo y viceversa.

¹⁶⁶ <http://chernobyl.undo.org/english/docs/chernobyl.pdf>, “Chernobyl’s legacy: health, environmental and socio-economic impacts”, 2005.

¹⁶⁷ [Subbotin](#) S. A., Riesgo: Condición indispensable del desarrollo, Energía: Economía, Técnica, Ecología, № 8, 2001.

Por consiguiente, un modelo formal de riesgo es un modelo de probabilidades de eventos que permite calcularlos bajo determinadas condiciones. Al realizar el cálculo de riesgos se determina el daño posible, así como su gravedad y los elementos de riesgos objetivos y subjetivos¹⁶⁸. Debe considerarse que la percepción individual de los riesgos por lo general es mayor al de su valor objetivo.

Existe una tendencia a la divergencia en la percepción del riesgo entre la opinión pública y los expertos. El grado de tal divergencia crece con el tiempo, las apreciaciones del riesgo hechas en las declaraciones de los gobiernos no siempre se consideran fiables. Una confianza algo mayor se le da a las declaraciones de los representantes de la industria y los medios informativos. Las opiniones de las organizaciones defensoras del medioambiente, los amigos y los familiares gozan de una confianza considerablemente mayor. A fin de cuentas, la decisión sobre la aceptabilidad de algo nuevo se toma no sólo en base a la metodología de la apreciación del riesgo, sino también teniendo en consideración cómo este nuevo riesgo es reconocido por la persona, ya que todo lo que ésta reconoce como realidad para ella, tendrá también determinadas consecuencias reales para la sociedad.

La metodología de la apreciación del riesgo en la energía nuclear está bastante desarrollada y en muchos casos este puede ser medido y evaluado. La evaluación del riesgo del impacto de la tecnología nuclear sobre el medioambiente es más simple que para otras tecnologías, incluida la solar, en una escala comparable. Sin embargo, estas apreciaciones fundadas hasta en las mediciones cuantitativas, son poco convincentes para la población. Por ello, es importante aplicar métodos de comparación con otras tecnologías, considerando la influencia sobre el medioambiente y las personas no sólo desde el punto de vista de la calidad de su salud y el bienestar, sino también considerando las consecuencias mentales, sociales y genéticas. El construir una central nuclear modificará en esa región la atmósfera social psicológica en la población y las relaciones internas en ella. Las ventajas de la energía nuclear chocan muchas veces por las dimensiones de las consecuencias de un eventual accidente nuclear.

La energía nuclear le ha planteado a la persona exigencias y grandes desafíos, el problema es que a las personas no les gusta asumir responsabilidades complejas superiores a sus acciones del día a día. Según la expresión de E. Gamo¹⁶⁹, “...la humanidad ocupa todo su ingenio para obtener energía, y después sin talento alguno la gasta, la despilfarra y ensucia irremediablemente el medioambiente...”.

¹⁶⁸ Afanasiev A. A. Costo del riesgo del daño a la salud, *Energía: Economía, Técnica, Ecología*, № 10, 2000.

¹⁶⁹ Gamo E., *Energía sin peligro*, *Energía: Economía, Técnica, Ecología*, No. 8, 2001.

Lo que es importante no es la energía misma, sino la actitud que para con ella tienen las personas. Cualquier recurso no es simplemente combustible, comida o información, como lo es una cosa o una propiedad en sí. Es también el conjunto de conocimientos de como conviene usar lo que se dispone y de una mejor manera, más eficaz y más segura. La aceptabilidad de la energía nuclear se vincula no tanto con la disminución de los riesgos de esta tecnología, sino con la toma de conciencia por parte de la población, de porque se está recurriendo a ella y cuáles son los beneficios futuros del país al aplicar esta tecnología.

Finalmente, aparece el problema del costo del riesgo por eventuales daños a la salud o la vida de las personas, en condiciones en que el riesgo haya sido impuesto al hombre y en situación en que él mismo lo aceptara bajo ciertas condiciones, estando en ese caso dispuesto a sacrificar la salud o la vida. El costo del riesgo depende de la probabilidad de la ejecución del peligro y el valor del daño esperado, considerando la edad, los gastos médicos, la pérdida de los ingresos por enfermedad, el empeoramiento de la calidad y la esperanza de vida. El costo del riesgo debe tomar en cuenta el daño moral, así como el grado de sufrimiento y sus consecuencias mentales. Aquí cobra importancia el hecho de diferenciar en cómo surgen los sufrimientos - ante la aparición del impacto o en ante la ansiedad que genera un estado de espera de las eventuales consecuencias¹⁷⁰.

También es posible considerar el pago por evitar el riesgo. Por ejemplo, si se evita el riesgo vinculado a la actividad de una nueva central nuclear, ¿cuánto costará al que aspira evitar un riesgo semejante?. Se trata en este caso de lo que no tendrán, pero podrían tener. El pago por evitar el riesgo se limita a los ingresos personales. Por eso, la magnitud promedio del costo del riesgo es proporcional al PIB específico.

Todavía no está determinado el valor concreto del costo del riesgo del daño a la salud, que igualmente describiría bien todos los tipos de gastos. Sin embargo, se ha elaborado cierto procedimiento para la apreciación del costo del riesgo de las enfermedades no fatales del cáncer como resultado de una avería radiológica en la central nuclear. Es posible una definición semejante de los costos del riesgo de otras enfermedades catastróficas. Surge el problema de la aceptabilidad del riesgo del daño determinado y su costo concreto.

En todo caso, el valor económico del riesgo representa el consentimiento público de pagar por evitar el riesgo (la estimación en dinero del costo de tal riesgo para los habitantes de la Federación de Rusia es de 50 mil dólares americanos), en un caso, o el consentimiento de la compensación por sufrirlo voluntariamente, en otro caso. El costo social del riesgo ecológico

¹⁷⁰ Afanasiev A. A., Costo del riesgo del daño a la salud, *Energía: Economía, Técnica, Ecología*, № 10, 2000.

para un grupo de la población puede ser calculado como el valor medio del monto, que la persona acepta pagar por evitar el riesgo, o la compensación por el riesgo de cada uno de quienes sufrieron el impacto en este grupo de la población, multiplicado por el número de los pobladores. El valor medio se determina en base a la multitud de valores individuales, que son necesarios para que el individuo decida pagar por evitar el riesgo, o aceptar el riesgo.

Tiene una importancia clave la definición de la esencia del riesgo y su medida según los parámetros esenciales objetivos y subjetivos. Esto está vinculado con que el riesgo siempre es de grupo, y el valor del costo del riesgo resulta de la consideración de que el riesgo es de dominio común sin relación con las personas a quienes pueden causarles la enfermedad o la muerte.

En la higiene radiacional se usa el enfoque de la valoración objetiva de la "aceptabilidad" del riesgo radiacional. Así, por ejemplo, en Rusia la protección radiológica del personal de las centrales nucleares, la población y el medioambiente se regula por el documento normativo "Normas de protección radiológica-99" (NPR-99), que estipulan los significados de los niveles admisibles de la influencia radiacional en forma de valores de las dosis de irradiación. Existe un criterio único de la valoración de lo que es una dosis de irradiación. La dependencia dosis-efecto para las dosis colectivas de irradiación permite fundamentar cuantitativamente y objetivamente la norma, la admisibilidad higiénica de irradiación o la aceptabilidad para el factor radiacional del impacto.

En las Normas NPR-99, la definición del "riesgo radiacional" es una definición completa que sustituye a la definición de "peligro radiacional". A la estimación objetiva en el uso terminológico profesional, el riesgo radiacional tiene una forma numérica y se limita por la valoración objetiva cuantitativa según el criterio "la salud de la persona". A diferencia de la apreciación objetiva sanitaria de la radiación, el juicio subjetivo del peligro de la radiación es una estimación compleja, en la que se toma en cuenta una situación concreta. Además, el juicio subjetivo toma en consideración la correlación utilidad/daño independientemente de la formulación de la pregunta "del peligro de la radiación" o "del riesgo del impacto radiacional".

Los resultados presentados son una ilustración de investigaciones recientes de varios autores.^{171, 172} La población, valoraba de forma diferente el peligro del impacto radiacional por los ensayos del arma nuclear que por los procedimientos médicos durante la radiografía.

¹⁷¹ Doroguntsov S. I., Ralchuk A. N., Manejo de la seguridad ecológica y antropogénica en el contexto del paradigma del desarrollo sostenible, Pensamiento Científico, Kiev, 2002.

¹⁷² Subbotin A., Riesgo: Condición indispensable del desarrollo, Energía: Economía, Técnica, Ecología, No. 8, 2001.

Las apreciaciones del riesgo radiacional varían según las personas de diferentes profesiones. En la descripción científica existente es necesario un análisis, es decir, separar cada factor del resto, describirlo y someter a examen solo aquellos factores a los cuales se le pueden atribuir significados numéricos, para los cuales pueden estar determinadas y descritas las leyes de la dependencia mutua.

Al estimar el peligro radiacional, en su conjunto, una persona no profesional (la mayoría) no distingue el factor radiacional como independiente. Tal mirada completa aquella representación abstracta sobre el riesgo radiacional, que existe en la ciencia.

La esencia de la aceptabilidad social del riesgo radiacional consiste, como la suma de opiniones subjetivas de la población, y que la opinión pública esté conforme con aquellas consecuencias que existen por el uso de reactores nucleares.

En el aspecto metodológico se pueden hacer dos conclusiones básicas: primero, la aceptabilidad por la sociedad de que el riesgo radiacional puede ser estimado cuantitativamente, según la frecuencia de respuestas en encuestas realizadas sobre un grupo representativo de la población (la metodología de las encuestas se basa en la teoría científica argumentada sobre la práctica de aceptación de las decisiones administrativas tomadas por ley). Segundo, la característica de la aceptabilidad social del riesgo radiacional puede ser expresada solo en base a la respuesta a varias preguntas. Una respuesta a una única pregunta en el curso de la encuesta realizada una sola vez, no puede expresar la opinión pública y tampoco puede servir de base para determinar objetivamente la aceptabilidad social del riesgo radiacional.

Es difícil esperar que alguna vez el peligro de irradiación por diagnóstico con rayos X y el peligro de la irradiación por avería en una central nuclear sean valorados por la población como iguales. Las ventajas del diagnóstico por rayos X son evidentes porque ofrece información sobre la salud, y las ventajas sociales de la avería en una central nuclear no siempre están claramente difundidas por la autoridad. Hasta la existencia de seguros, en caso de la avería en la central nuclear, en el aspecto social para toda la sociedad estos pagos son "el dinero que no proviene del trabajo propio", es decir no es el resultado de la simple redistribución financiera del dinero no ganado, sino de los recursos disponibles y de antemano acumulados por la autoridad. El sentido común de la población lo toma en consideración en un nivel subjetivo.

Las evaluaciones objetivas y subjetivas del riesgo radiacional deben ser tomadas en consideración por igual para la elaboración de los criterios de la apreciación de la tolerancia social del riesgo radiacional. La estrategia de la estimación de la tolerancia social del riesgo radiacional, permite evitar la toma de decisiones erróneas en base a aquellos cálculos

equivocados sobre la bases de índices técnicos. En las condiciones actuales, esta estrategia es la condición sine qua non para la aprobación de decisiones adecuadas y ejecutables que garanticen el desarrollo progresivo de las tecnologías nucleares.

Existe un estado de alerta permanente de la comunidad respecto a la introducción de tecnologías nucleares para la generación eléctrica. La energía nuclear es siempre un tema “noticia” para la comunidad.

Por consiguiente, es necesario considerar una compensación socio-económica a la población en relación al riesgo esperado. Para ello en los planes de “difusión” se deberá detallar con argumentos sencillos, las ventajas que esta tecnología traerá a la población, incluyendo la ventaja ecológica para el medioambiente, comparándola con otros medios tradicionales de producción de energía.

Para la valoración de las consecuencias sociales de, por ejemplo el comienzo de la operación de una nueva central nuclear, es necesario determinar las probabilidades de su ocurrencia durante un determinado período de su operación y la dependencia de tales probabilidades de una u otra condición. Todo esto debe ser conocido por la sociedad que puede, voluntariamente, escoger ese riesgo y apoyar o no la construcción de la central nuclear.

Muchas veces hay contradicciones entre el significado social de la energía nuclear en la perspectiva a mediano y largo plazo y el bienestar social que esta trae a la comunidad. Por eso es necesaria además de la labor de difusión que se realiza en centros especiales, efectuar una labor complementaria que involucra los siguientes aspectos:

- Informar por los medios de comunicación de manera objetiva sobre todos los aspectos relacionados con el funcionamiento de la energía nuclear.
- Crear una comisión de peritos independientes, no solo para validar las decisiones tomadas, sino también para monitorear las centrales nucleares en funcionamiento.
- Publicar estudios de científicos y especialistas respecto a este tema.
- Asegurar el acceso de los representantes de la población a las instalaciones del ciclo de combustible nuclear.
- Reaccionar con argumentos sencillos pero eficaces a las acciones de los “activistas verdes”.

- Representantes de la administración de la central nuclear deben participar activamente en los medios sociales de la comunidad y desarrollar planes de cooperación social.
- Crear instancias de dialogo entre la administración de las centrales nucleares y representantes de la comunidad.

En resumen, una adecuada información, un dialogo fluido, son aspectos imprescindibles para una convivencia armoniosa entre la población y la industria nuclear.

10.5. La influencia de la energía nuclear en la salud de las personas

Determinar el verdadero efecto de la industria nuclear sobre la salud de la población es una tarea sobre la cual continuamente se está trabajando. Los datos disponibles en diferentes países confirman que, al medir la influencia negativa de la industria nuclear sobre la persona, esta aparece en el número 20 del ranking. Para el caso particular de Rusia, de acuerdo con las estadísticas existentes en el período 2003-2004, en el primer lugar de peligrosidad para la salud de las personas, está la industria del carbón (véase las Tablas 10.1 y 10.2).

Tabla 10.1 - Lugar, de acuerdo a los índices de la mortalidad en Rusia, de la industria nuclear entre 21 ramas (para 10. 000 trabajadores).

Ranking	Rama industrial	2003	2004	2005
1	Industria carbonífera	55,6	81,09	21,64
12	Industria de extracción del petróleo	1,53	1,85	2,62
18	Industria de derivados del petróleo	0,61	0,74	0,96
19	Industria eléctrica	0,55	0,79	0,86
20	Industria nuclear	0,64	0,45	0,60
Promedio en Rusia		1,78	1,56	1,52

Para la población el nivel del riesgo de muerte por diferentes causas varía entre 10^9 hasta 10^2 personas/año. El riesgo 10^9 corresponde a los eventos no significativos, en su cantidad, que ocurren en los domicilios de las personas. El nivel del riesgo de muerte más alto es el de 10^2 y se presenta en actividades laborales consideradas peligrosas. Sin embargo, tomando en consideración que el tiempo general de la actividad en ese grupo de riesgo se compone, como regla, de no más de algunos centenares de horas al año, solamente en casos especiales el riesgo en este grupo superará el riesgo máximo de muerte por enfermedades igual a 10^2 por año (Tabla 10.3).

Tabla 10.3 - Riesgos de muerte individuales anuales para la población de Rusia

Factores del riesgo	Expuestos al riesgo (millones de personas)	Riesgo
Todas las causas	69 (hombres)	$2,0 \times 10^{-2}$
Accidentes	69 (hombres)	$3,3 \times 10^{-3}$
Contaminación fuerte del medioambiente	15,2	1×10^{-3}
Residencia cerca de las centrales termoeléctricas a carbón	15-20	5×10^{-4}
Zona restrictiva de la central nuclear de Chernobyl	0,1	8×10^{-5}
Residencia cerca de las refinerías de petróleo	2,5	1×10^{-5}
Residencia dentro de 30 Km. de la zona de combinados de minería química	0,16	3×10^{-6}
Residencia cerca de una central nuclear	0,3	7×10^{-7}

Tabla 10.4 - Riesgo para la salud de contaminantes atmosféricos clásicos para la población de Europa (480 millones de personas)*

Resultado de la influencia	Carbón piedra, hulla	Carbón lignito	Gas natural	Energía nuclear	Energía solar	Energía eólica
Años perdidos de vida	136	164	44	7	14	3
Costo hospital por enfermedad de respiratorias	0,64	0,81	0,22	0,037	0,071	0,015
Costo hospital a causa de enfermedad cerebrales	1,7	1,9	0,54	0,089	0,17	0,036
Costo hospital a causa de enfermedades del corazón	0,80	0,95	0,25	0,044	0,083	0,017
Días sin trabajar en general	4686	5624	1513	257	589	101
Días sin trabajar enfermedades bronquiales	1.286	1.543	415	71	134	28
Días sin trabajar por asma asmáticos, días	1.472	1.766	475	81	154	32
Días por enfermedades crónicas con lesión de las vías respiratorias	9	13	3	0,5	0,94	0,19
Días por enfermedades infantiles crónicas.	128	153	41	7	14	2,7

Los resultados de este cuadro muestran sin lugar a dudas el bajo nivel de peligrosidad que representa la industria nuclear sobre la población humana. A modo de ejemplo, las investigaciones muestran que la dosis anual de irradiación adicional para quienes viven

cerca de las centrales nucleares representa de 1 a 5 mRem/año (roentgen-equivalent-man, Rem) y es comparable con la dosis que se recibe cada vez que se realiza una radiografía de dientes y casi 9 veces menor a la dosis de irradiación del televidente, que alcanza a 48 mRem/año y 20 veces menor al fondo medio natural de las superficie de la Tierra que es de 100 mRem/año. La central nuclear trabajando en régimen normal, emite a la atmósfera una cantidad muy pequeña de gases radiactivos, en los cuales solamente el yodo participa en el ciclo de vida, y además con un período de vida media muy corto, de modo, que en 8 días el yodo pierde su radiactividad (ver Tabla 10.5.).

Tabla 10.5 - Emisiones a la atmósfera de radionúclidos para las diferentes etapas del ciclo del combustible nuclear [TBq/TWh].

Radionúclido	Extracción del uranio	Producción del concentrado			Conversión	Enriquecimiento	Producción del elemento combustible	Explotación en la central nuclear	Reprocesamiento del combustible
		En la explotación	De los desechos*	De los desechos**					
^3H							$7,9 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-2}$	
^{14}H						$1,8 \times 10^{-9}$	$7,3 \times 10^{-3}$	$3,8 \times 10^{-2}$	
Aerosoles						$1,3 \times 10^{-10}$	$3,5 \times 10^{-7}$		
Gases radiactivos nobles						$4,4 \times 10^{-10}$	1,5	$3,8 \times 10^{-2}$	
^{129}I								$2,7 \times 10^{-5}$	

Radionúclido	Extracción del uranio	Producción del concentrado			Conversión	Enriquecimiento	Producción del elemento combustible	Explotación en la central nuclear	Reprocesamiento del combustible
		En la explotación	De los desechos*	De los desechos**					
^{131}I								$9,5 \times 10^{-7}$	$3,8 \times 10^{-7}$
^{133}I									$1,7 \times 10^{-7}$
^{222}Rn	18,8	0,11	1,1	$1,1 \times 10^3$					
^{234}U					$3,4 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-7}$			
^{235}U					$1,5 \times 10^{-8}$	$8,9 \times 10^{-9}$			
^{238}U					$3,2 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-10}$			
^{238}Pu									$5,4 \times 10^{-12}$
^{239}Pu									$1,2 \times 10^{-11}$

* En el proceso de operación

** Después de la conclusión de la operación, durante 10 años

Las emisiones de las centrales termoeléctricas contienen, principalmente, elementos que participan activamente en el ciclo de vida. Muchas sustancias específicas contenidas en estas emisiones representan un alto peligro biológico pero su contenido simplemente no se controla por ninguna norma. En la quema del carbón además de la ceniza y el hollín se forman el bióxido del carbono que genera el efecto de invernadero; los gases tóxicos como los óxidos del carbono, del azufre, del nitrógeno y del vanadio que provocan las lluvias ácidas y los envenenamientos ácidos; también en estas emisiones están presentes los hidrocarburos (compuestos policíclicos aromáticos) de influencia cancerígena entre ellos benzopyrena y formaldehido; los vapores de los ácidos clorhídrico y fluorhídrico; metales

tóxicos como el arsénico, el cadmio, el mercurio, el plomo, el talio, el cromo, el sodio, el níquel, el vanadio, el boro, el cobre, el hierro, el manganeso, el molibdeno, el selenio, el zinc, el antimonio, el cobalto, el berilio; los radionúclidos de vida media larga como el uranio, el torio, el polonio, que en su conjunto pueden provocar 1.000 veces más muertes que los desechos radioactivos. La característica de los desechos cancerígenos de las centrales termoeléctricas es presentada en la Tabla 10.6.

Tabla 10.6 - Emisiones globales de las centrales termoeléctricas.

Denominación	Cantidad [t/año]
Anhídrido sulfúrico	5765,7
Bióxido del nitrógeno	4576
Oxido del nitrógeno	743,5
Sustancias suspendidas (polvo, aerosol)	148,3
Ceniza	2205,7
Oxido del carbón	50,3
Hidrocarburos	1,8
Formaldehido	6
Metales pesados	5

Los cálculos del riesgo de muerte para la población como consecuencia de la contaminación del aire por las sustancias suspendidas, en ciudades con centrales termoeléctricas grandes de carbón, han mostrado que los riesgos individuales anuales se encuentran a nivel de 10^{-3} a 10^{-4} (Tabla 10.7). El riesgo total de muerte para la población que vive en el área de influencia de las centrales termoeléctricas de carbón, se estima entre 8-10 mil muertes adicionales al año.

Tabla 10.7 - Riesgo anual individual y poblacional de muerte para los habitantes de algunas ciudades rusas con centrales termoeléctricas de carbón

Ciudad	Concentración media anual de las sustancias en suspensión, parte de la concentración límite admisible	Riesgo de muerte individual anual	Población, miles de personas	Riesgo de muerte poblacional anual, personas
Asbest	2,0	10×10^{-3}	117,9	117
Nazarovo	0,5	$1,08 \times 10^{-4}$	64,2	70
Cheremjovo	3,6	$1,9 \times 10^{-3}$	50,0	96
Chita	1,8	$8,8 \times 10^{-4}$	316,7	278
Novocherkask	0,8	$3,2 \times 10^{-4}$	188,7	60

Es necesario notar que los datos actuales del riesgo calculado de las centrales termoeléctricas son todavía aproximados, puesto que en ellos no se ha tenido en cuenta la influencia negativa a largo plazo, de los microelementos tóxicos; los óxidos del azufre, el carbono, el nitrógeno y otras emisiones.

El análisis del impacto en la salud los distintos factores nocivos de las centrales termoeléctricas, es complicado por la incertidumbre de la descripción de la dependencia entre la dosis y el efecto, puesto que no siempre se logra establecer la correlación de cada uno de ellos con la reacción de respuesta del organismo y la extrapolación al organismo humano de los datos obtenidos en los experimentos con animales.

En la combustión del combustible fósil, se emiten a la atmósfera elementos radiactivos como el ^{40}K , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th y los productos de su desintegración. Una central termoeléctrica de una potencia de 1.000 MW, con un coeficiente de limpieza de los residuos de 0,975, emite a la atmósfera durante un año en GBq: ^{40}K - 4,0, ^{238}U - 1,5, ^{226}Ra - 1,5, ^{210}Pb - 5,0, ^{210}Po - 5,0 y ^{232}Th - 1,5.

En realidad, la tasa ceniza del carbón utilizado como combustible varía en un intervalo entre un 10 y un 45 %, dependiendo del yacimiento de extracción, por eso las centrales termoeléctricas presentan un valor muy alto de desechos de radionúclidos naturales al medioambiente (Tabla 10.8). La emisión diaria de ceniza a la atmósfera representa unas 36

toneladas y con una chimenea de 150-200m de altura, la central contamina un territorio de 50 Km de diámetro aproximadamente.

Tabla 10.8 - Emisiones de radionúclidos naturales a la atmósfera y su acumulación en el suelo cerca de una central termoeléctrica de carbón con una potencia de 1.000 MW.

Parámetro	Radionúclido					
	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	²³² Th	²²⁸ Ra	⁴⁰ K
Desechos gaseosos GBq	19,6	81,4	74,0	19,6	11,1	39,8
Acumulación en el suelo, GBq/m ³	388	1147	703	389	92,5	98,3
Densidad de la contaminación del territorio, GBq/m ²	0,39	1,15	0,70	0,51	0,09	0,38
Concentración en el aire, GBq/m ³	6,3	15,0	15,4	6,3	4,1	3,9

La oposición al desarrollo de la energía nuclear contribuye directamente al aumento de las centrales a carbón aumentado con ello las emisiones de gases de invernadero, especialmente las de dióxido de carbono. Al quemar 1 Kg del carbón se consumen 2,67 Kg. de oxígeno y se emite a la atmósfera 3,67 Kg del gas carbónico.

Según los cálculos realizados por ecologistas norteamericanos, en los últimos 30 años (desde 1970) gracias a las centrales nucleares, solamente en los Estados Unidos se evitó la emisión a la atmósfera de más de 2 mil millones de toneladas de dióxido del carbono. Solo en el 2002 se logró evitar la emisión de 2 millones de toneladas de óxido de nitrógeno, 4 millones de toneladas del gas sulfúrico y más de 650 millones de toneladas de gas carbónico.

Las emisiones de una central termoeléctrica de carbón, con un coeficiente de limpieza de los escapes de 0,975, son considerablemente más altos que en una central nuclear de igual potencia. La comparación de las consecuencias medioambientales de la operación de una central termoeléctrica de carbón, con un coeficiente de limpieza de las emisiones de 0,975, y una central nuclear de potencia igual de 1.000 MW se observa en la Tabla 10.9.

Tabla 10.9 - Consecuencias ecológicas de operación de una central termoeléctrica a carbón (con coeficiente de limpieza de emisiones de 0,975) y una central nuclear de igual potencia de 1.000 MW.

Índices	Central Termoeléctrica	Central Nuclear
Consumo de combustible	12 MMt de carbón	286 t UO ₂
Consumo de oxígeno atmosférico	5,5, MMm ³	-
Residuos en el medioambiente:		
Óxidos del carbono	10 MMt	-
Óxidos del nitrógeno	34,2 Mt	-
Óxidos del azufre	124,4 Mt	-
Hidrocarbonatos	23 t	-
Ceniza y hollín no capturado por los filtros	7,3 Mt	-
Benzapiren	12 t	-
Pentóxido del vanadio	37 t	-
Metales pesados (Cu, Co, Pb, Sn, Zn, etc.)	5 t	-
Radionúclidos de vida media larga (⁴⁰ K, ²¹² Pb, ²¹⁰ Po, entre otros)	40 Ci	2 Ci
Residuos sólidos	830 Mt	30 t
Uso de la tierra en la extracción del combustible:		
Área ocupada	130 Ha	15,4 Ha
Potencia de dosis en la cercanía de la central	45-80 mR/h	10-14 mR/h

Al quemar combustible fósil (petróleo, gas, carbón), el ser humano destruye la estructuras naturales, aporta caos a la biósfera, y destruye aquel ordenamiento que se ha formado a lo largo de milenios gracias a la energía solar.

Respecto al riesgo radiacional, al cual se le atribuye a la central nuclear como su principal aspecto peligroso, lo cual no se puede desconocer que es así, sin embargo la ciencia ha

probado que este riesgo se puede minimizar mediante el adecuado uso de esta tecnología. Pero no podemos decir lo mismo en las centrales termoeléctrica a carbón, industria que tiene altos niveles de radioactividad en su entorno y a los cuales no se le pone la debida atención en comparación a la central nuclear, que tiene bajos niveles de radioactividad en su entorno, niveles tales que no afectan a la salud humana. (Tabla 10.10), Entonces, ¿por qué ocurre esto, si la generación núcleo-eléctrica es potencialmente peligrosa? Pues la industria nuclear, es una industria eminentemente tecnológica, en la cual si se actúa responsablemente, se puede administrar científicamente los riesgos inherentes a su uso.

Tabla 10.10 - Estructura de irradiación a la población en algunos territorios de Rusia en el 2005

Región, territorio	Irradiación por fuentes naturales, %	Irradiación médica, %	Irradiación por precipitaciones globales de sustancias radiactivas de radiaciones anteriores, %	Irradiación antropogénica por las empresas que usan fuentes de irradiación ionizante, %
Zona de la influencia de la avería en la Central Nuclear de Chernobyl				
Región de Briansk	51,9	37,3	10,8	0,01
Región de Kaluga	74,9	24,0	0,9	0,18
Zona de la empresa nuclear "Mayak"				
Región de Sverdlovsk	58,7	39,5	1,7	0,14
Región de Chelyabinsk	74,5	24,7	0,6	0,24
Zona de la influencia por pruebas de armas nucleares				
Territorio de Altay	81,9	17,8	0,29	0,01

El riesgo individual de por vida para el personal que opera en la rama nuclear de Rusia, por la dosis de irradiación industrial recibida en 2005, es de $1,1 \cdot 10^{-4}$ que está bajo los límites establecidos por las normas de protección radiológica NRB-99, que es igual a $1 \cdot 10^{-3}$. La disminución de la irradiación del personal continúa a lo largo de varios años (Figura 10.2), y en la actualidad su nivel, para todas las centrales nucleares construidas según los proyectos rusos, excepto las centrales nucleares con los reactores RBMK, son comparables a las de las mejores centrales nucleares del mundo. El aporte de la irradiación profesional a la irradiación de la población no supera 0,03 %.

En año 2007, en Rusia los desechos gaseosos y líquidos proveniente de las centrales nucleares con reactores VVER-1000, han creado una dosis de irradiación de la población comparándola con el fondo radiológico natural no mayor de 0,1 mSv y con los reactores modelo VVER-400 y RBMK-1000 de 0,5 y 2,0 mSv respectivamente. Así, el nivel de influencia radiacional de las centrales nucleares a la población y al medioambiente no ha superado el 0,06% de la dosis creada por las fuentes naturales de radiación ionizante. Los datos presentados, permiten hablar con argumentos sólidos respecto a la seguridad ambiental de las centrales nucleares.

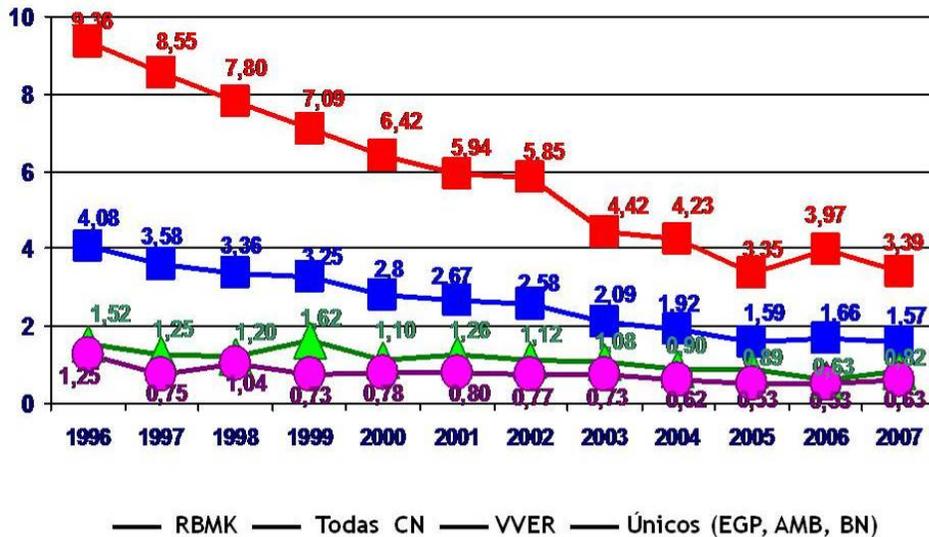


Figura 10.2 - Dosis colectivas de irradiación por persona según modelos de reactores (persona/Sv/año).

En 13 regiones de la Federación de Rusia las dosis medias de irradiación de la población por fuentes naturales es de 5 mSv/año, y en total en el globo terráqueo varían de 1,5 a 15 mSv/año, alcanzando en los algunos lugares 50 mSv/año.

La industria nuclear contribuye a la dosis colectiva de irradiación de la población con un 1%, de las cuales las precipitaciones globales a consecuencia de las pruebas de armas nucleares que es un 0,9%, y las centrales nucleares es el 0,1% restante. En la Tabla 10.11 se muestran los datos sobre la dosis de irradiación de la población que vive en la proximidad de una central nuclear.

Tabla 10.11 - Dosis de irradiación de la población cerca de la industria nuclear de Rusia en 2002-2005.

Empresas	Población irradiada, miles de persona	Dosis eficaz anual [mSv/año]		
		Exterior	Interior	Total
Consortio Mayak	320	0,01	0,10	0,11
Combinado minero químico	200	0,03	0,02	0,05
Combinado químico de Siberia	400	0,0004	0,005	0,054

Los riesgos de cáncer para la población ubicada en la zona de influencia a irradiaciones de empresas nucleares representan de 10^{-6} a 10^{-7} . Es un nivel insignificante. Estos niveles resultan hasta tres veces menores a los riesgos vinculados con la contaminación química del aire atmosférico en las grandes ciudades industriales.

Como se señaló, la emisión de residuos de las centrales termoeléctricas a carbón no está adecuadamente normada y por consiguiente no son controlados en su totalidad por la autoridad competente, especialmente en la porción radioactiva de sus emisiones. Los desechos radiactivos de las centrales nucleares en cambio están regulados en todo el mundo por normas extremadamente eficaces. El marco jurídico de la industria nuclear en el campo de la seguridad radiacional, se distingue por su rigidez y eficiencia en su aplicación sobre el factor radiacional a diferencia de lo que ocurre en el uso de otras fuentes de energía.

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) ha señalado que la Federación Rusa dispone de uno de los Marcos Legales más severos para la protección de las personas y el medioambiente, tales como, La ley Federal “Sobre la protección radiológica de la población”, “Normas de protección radiológica (NRB-99)”, “Reglamentos básicos sanitarios del aseguramiento de la protección radiológica (OSPORB-99)», las que garantizan una

adecuada protección radiológica del país y limitan los niveles a los que se puede llegar en los distintos tipos de actividad de radiación ionizante.

La ciencia moderna dispone de datos completos sobre el impacto de la radiación en diferentes niveles de la escala biológica, desde el nivel molecular hasta el organismo en su totalidad. Se ha demostrado que los efectos eventuales de la irradiación a excepción de situaciones extraordinarias vinculadas a los accidentes por fuga de radiación, estos no se distinguen en nada de otros efectos análogos provocados en la naturaleza. También se ha determinado que no hay casos de enfermedades hereditarias en descendientes de personas que han sufrido exposición a la radiación, tampoco hay antecedentes en los descendientes de aquellos pobladores japoneses, que fueron afectados por la radiación emanada de las dos bombas nucleares lanzadas por Estados Unidos sobre Japón. Esta ausencia de defectos hereditarios se da también en el personal que opera en las empresas de la industria nuclear y en la población que vive cerca de una central nuclear (Tabla 10.12).

Tabla 10.12 - Riesgo para la salud de personas que trabajan en empresas del ciclo del combustible nuclear (Número de casos mortales/GWt*año).

Fuente de influencia	Carácter del riesgo	Para el personal	Para la población
Extracción de uranio	Subterránea	Directo	0,0012-0,125
		Alejado radiacional	
	Abierta	Directo	0,125
		Alejado radiacional	
Producción del combustible	Directo	0,045-0,36	0,00005-0,5
	Alejado radiacional	0,07-0,37	
Transporte	Directo	0,05-0,11	0,002-0,01
		Alejado radiacional	
	Alejado radiacional	0,06	0,001-0,0048
Generación de energía eléctrica	Directo	0,013-0,023	0,0007-0,1025
	Alejado radiacional	0,32-0,385	

Fuente de influencia	Carácter del riesgo	Para personal el	Para la población
Conclusión de la explotación	Directo	0,0008	
	Alejado radiacional	0,0008	
Manejo de los desechos radiactivos	Alejado radiacional	0,0015	0,00002-0,02

El principal obstáculo que enfrenta el desarrollo de la industria nuclear es la apreciación subjetiva que tiene una parte importante de la población respecto a los niveles de seguridad que ofrece esta tecnología para la salud de la población. A la sociedad moderna le es necesario un sistema de percepción real respecto a los peligros existentes que ella enfrenta en relación a la producción de energía en todos los sistemas que actualmente operan y asumir que el riesgo cero no existe en ninguno de ellos, pero existe el riesgo justificado, escrupulosamente analizado en base a datos científicos y actualizados.

Conclusiones

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 que permitan a las personas formarse una opinión propia, libre de prejuicios fundados en el desconocimiento o la publicidad adversa proveniente de otros sectores antagónicos.

El fortalecimiento de la aceptación de la energía nuclear por parte de la mayoría de la población es una tarea importante en la cual está vinculada la posibilidad misma del desarrollo exitoso de esta rama industrial, ya que la hostilidad social hacia un proyecto como este, puede convertirse en factor decisivo para la necesidad de algunos países de contar con un plan energético seguro y sustentable. 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. La clave está en hacer comprender a la población que el factor riesgo, aunque es bajo, existe y es inherente al desarrollo de la actual sociedad, hay que saber manejarlo y compensarlo con los beneficios, para lo cual la selección de la tecnología más adecuada y las empresas responsables es un elemento en el que no se puede actuar con una mirada parcial o de corto plazo.

Cambiar la percepción ya fijada en la mente de las personas sobre cualquier materia no es algo sencillo, especialmente si aquello dice relación con sus más íntimos temores. Sin embargo, la historia ha demostrado que las masas son capaces de incorporar nuevos elementos cognitivos cuando los argumentos y las evidencias son contundentes y, además, la planificación del mensaje, tanto en forma como fondo, se ajusten a la psicología y la sociológica. En lo relacionado a la energía nuclear esto no se ha hecho aun en países como Chile, pero de todas formas es posible apreciar una evolución positiva respecto a las ideas

existentes, sin duda a causa del acceso a información de otras partes del mundo a través de los medios de comunicación globalizados.

Bibliografía

- 10.1.- E. P. Velikhov, La energética nuclear y termonuclear en el siglo XXI / la Energía: la economía, la técnica, la ecología. - №10,2001. P.11-12
- 10.2.- Osmachkin B. S., Acerca de las valoraciones de los factores biológicos de la influencia radiacional//Energía, economía, técnica, la ecología. - № 12,2001. P.2-13
- 10.3.- Polacov V. I., Energética nuclear sin desechos radioactivos//Energía: economía, técnica, ecología. № 7, 2001. P. 8-15.
- 10.4.- Plankina N. A., La aceptabilidad social de la energética atómica: el análisis sociológico y la estrategia de la formación. - Resumen de la tesis predoctoral. Las ciencias. - Saratov, 2003.
- 10.5.- Ponukalin A. A., Estrategia de la dirección social del desarrollo de la energía atómica. Tesis para optar al grado de Candidato a Doctor en Ciencias Sociales. Las ciencias, de los fondos RGB, 2005
- 10.6.- Gamo E., Energía sin peligro. Energía: economía, técnica, ecología. № 82001. p.6-12.
- 10.7.- Subbotin S. A., Riesgo: condición indispensable del desarrollo//Energía: economía, técnica, ecología. - № 8,2001. p.13-16.
- 10.8.- Afanasiev A. A., Costo del riesgo del daño a la salud//Energía: economía, técnica, ecología / № 10, 2000. p.46-51.
- 10.9.- Ponukalin A. A., Energética atómica: Peligro objetivo y subjetivo//Problemas científicos de la seguridad nacional de Rusia. - Saratov: 2003. - pag. 178-184.
- 10.10.- González A. J. Webb J. A. M., Evolución del enfoque del problema de la seguridad / Boletín de información del Centro de Información Social (CIS), 1990-1991.
- 10.11.- Recomendaciones sobre la aplicación de la escala de los acontecimientos, CIS, 1990.

- 10.12.- Blumer G., El pensamiento sociológico norteamericano. La conducta colectiva. 1994.
- 10.13.- Nechaev A. F., Fedorkin R. S., Sobre los aspectos socio-económicos del desmantelamiento de las instalaciones nucleares. En los materiales del Foro Internacional Nuclear, 2006, San-Petersburgo, Rusia, 25-26 de Sept. 2006, pag. 105-110.
- 10.14.- Voronov D. B., Fomichev A. I., Proyecto de la organización de la protección compleja de seguridad de la central nuclear con el reactor BN-800 sobre el ejemplo de la CN Beloyarsky. Informe a la Conferencia “Seguridad de las tecnologías nucleares: el mantenimiento de la seguridad durante el transporte de los materiales radioactivos y el manejo de los residuos radioactivas (ATOMTRANS-2006)”, San-Petersburgo, Rusia, 26-29 de Sept. 2006
- 10.15.- Sorokin V. T., Kalinkin V. I., Demin A. V., Conceptos básicos de la creación de los Centros Regionales para la Gestión de los desechos radiactivos en la Región Noroeste de la Federación Rusa. Informe a la Conferencia “La Seguridad de las tecnologías nucleares: el mantenimiento de la seguridad durante el transporte de los materiales radioactivos y la gestión de los desechos radioactivas (ATOMTRANS-2006)”, San-Petersburgo, Rusia, 26-29 de Sept. 2006
- 10.16.- Levin N. B., Yarosh V. I., Elementos de la cultura de la protección física, registro y control de los materiales nucleares en las empresas del transporte marítimo.
- 10.17.- Informe a la Conferencia “La Seguridad de las tecnologías nucleares: el mantenimiento de la seguridad durante el transporte de los materiales radioactivos y la gestión de los desechos radioactivas (ATOMTRANS-2006)”, San-Petersburgo, Rusia, 26-29 de Sept. 2006
- 10.18.- Rusanov V. A., Los riesgos de las enfermedades oncológicas por la irradiación crónica: registro médico dosimétrico en el Combinado de minería química. En los materiales del Foro Internacional Nuclear, 2006, San-Petersburgo, Rusia, 25-29 de Sept. 2006, pag. 126-129. 6. Rimsky-Korsakov A. A. No es tan terrible el átomo, como lo pintan. La entrevista a la revista de divulgación científica «Máquinas y mecanismos»/5 (8) 2006, pag. 16-19.
- 10.19.- M. N. Tikhonov, O. E. Muratov, San Petersburgo, Las influencias cancerígenas de las energéticas térmica y atómica. Según los materiales de la conferencia “La Seguridad de las tecnologías nucleares: la economía de la seguridad y el manejo

de las fuentes de irradiación ionizante”.

- 10.20.- Normas de la seguridad radiacional (NRB-99) del Ministerio de la Salud de Rusia, la edición oficial. - 115 pag. 8. Agapov A. M., Makuhin D. V., Nóvikov G. A, Radaev N.N. Cuestiones actuales de la seguridad ecológica del MINATOM de Rusia. El material de conferencias / Editorial de la Biblioteca del Departamento de la seguridad, ecología y situaciones extraordinarias del MINATOM de Rusia / Moscú, 2003, 309 pag.
- 10.21.- Malakhovsky V. N., S. A. Kutsenko, A. N. Galitskii, I. A. Zykova., Ecological and Professional Risks Perception by Students and its Possible Determinants. In Proc. 9-th Annual Conference Risk Analysis: Facing the New Millenium. Rotterdam, The Netherlands, 10-13 October 1999, p. 494-497.
- 10.22.- Malakhovsky V. N., S. A. Kutsenko, A. N., Galitskii I. A. Zykova, Risk perception and foresight by medical students. In Proc. ESREL 2000, SARS and SRA-Europe Annual Conference Edinburg/Scotland/United Kingdom/15-17 May 2000, p. 1163-1164.
- 10.23.- El monitoreo de los efectos sociales-psicológicos cerca de la población de los territorios radioactivos contaminados. El subsidio para los médicos. G. V. Arhangelskaja, I. A. Zykova. УТВ. Ministerio de Salud, Febrero 1999
- 10.24.- Slovic P. Perception of Risk. Science, 1987 - Vol. 236 - P. 280-285.
- 10.25.- Kuchumov V. V., Liapkalo A. A., Investigación de la valoración subjetiva de la influencia de la irradiación antropogénica sobre la salud de la población. - San Petersburgo.: Higiene radiacional, 2004, pag. 166-173.
- 10.26.- Stoberg L. Discussion of the Limitations of the Psychometric and Cultural Theory Approaches. Rad. Prot. Dosim., 1996 - Vol. 68 - N. 3-4 - P. 219-226.

Capítulo 11

Riesgos asociados a las diferentes fuentes de energía

11.1. Consideraciones generales^{173, 174}

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.

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

¹⁷³ Risks and Benefits of Nuclear Energy, NEA No. 6242, OECD, 2007.

¹⁷⁴ L. A. Sachenko, Las bases metodológicas de la administración del riesgo en la energía nuclear, Autoreferat de la tesis a Candidato a Doctor en Ciencias Económicas, 2006.

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.

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 11.1).

Tabla № 11.1- 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 11.2¹⁷⁵ 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.*

Tabla Nº 11.2 - 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

¹⁷⁵ Journal of the American Medical Association 244, II: 1126-112 y Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina

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 reducir las 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 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.

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

11.2.1. Riesgos relacionados con las fuentes de energías renovables¹⁷⁶

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, riego, 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.

11.2.2. Riesgos relacionados con las fuentes de energía fósiles¹⁷⁷

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

¹⁷⁶ Cuestiones sobre la energía, Foro de la Industria Nuclear Española, Enero 2007.

¹⁷⁷ Cuestiones sobre la energía, Foro de la Industria Nuclear Española, Enero 2007.

- 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.

11.2.3. Riesgos relacionados con la energía nuclear¹⁷⁸

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 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

¹⁷⁸ Energía Nucleoeléctrica y Desarrollo Sostenible, Viena, OIEA, Febrero 2008.

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 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.

11.2.3.1. Riesgo de un accidente nuclear severo

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.

En el capítulo 3 de este estudio, sobre la seguridad nuclear, se analizaron los diferentes aspectos vinculados los accidentes, su probabilidad de ocurrencia y las medidas para mitigar sus consecuencias. En particular, se señaló que los accidentes severos son 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.

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:

- En funcionamiento normal, las dosis recibidas por los trabajadores y el público en general, deben ser tan bajas como sea posible y siempre inferiores a los límites fijados por las normas las que a su vez, se basa en los índices de radiación normales a los cuales el ser humano se somete a diario por la naturaleza.
- En caso de un accidente hipotético, los sistemas de seguridad existentes deben evitar que la fuga radioactiva afecte a la población.

De acuerdo con el criterio de un diseño seguro, la central debe mantener una seguridad intrínseca y una seguridad incorporada¹⁷⁹. La primera se refiere a la imposibilidad de que se desencadene una reacción nuclear de fisión incontrolada y la segunda a los elementos añadidos que permiten la regulación, control y detención inmediata de esa reacción nuclear. La seguridad intrínseca surge de las características físicas del comportamiento del combustible nuclear, mientras que la seguridad funcional nace de la ingeniería desarrollada y de su diseño con medidas tales como la presencia en el núcleo de elementos de control accionados por el operador o por mecanismos automáticos, así como las barreras de protección interpuestas.

A pesar de todas estas medidas, nunca se podrá eliminar completamente la posibilidad de fallo, como en cualquier actividad humana pero, su probabilidad será muy pequeña como ya se indicó. Adicionalmente, se introducen en el proyecto soluciones técnicas que impiden que fenómenos externos naturales (sismos, tsunamis, inundaciones) esperables en la zona de emplazamiento provoquen un accidente, ya sea severo o no, en este tipo de instalación.

Las exigencias sobre el proyecto son debidamente controladas por la Autoridad Reguladora Nacional, encargada por el Estado para esta función. Este control se realiza a través del

¹⁷⁹ Ver capítulo 3 de este estudio: Seguridad Nuclear.

proceso de licenciamiento de las diferentes etapas del proyecto de una central nuclear: selección del emplazamiento, construcción y montaje, ajuste y puesta en marcha, operación y desmantelamiento. Esta Autoridad tiene todas las atribuciones para detener los trabajos en cualquier de estas etapas hasta tanto no se restablezcan las condiciones de seguridad exigidas y acordadas en las condiciones de vigencia de cada una de las licencias otorgadas por esta Autoridad.

El estudio más completo realizado hasta el presente para evaluar las externalidades de la generación eléctrica, proyecto ExternE¹⁸⁰, indica que, en operación normal, **la generación nuclear es más benigna que cualquiera de las otras fósiles.**

El detrimento en la salud (medido en pérdida de años de vida) de la generación nuclear es aproximadamente 100 veces menor que para carbón o petróleo y cinco veces menor que para el gas¹⁸¹.

Desde el punto de vista de la Protección Civil, el estudio científico de los riesgos es de interés porque constituye la base para determinar las fuentes u orígenes de los riesgos (peligros), sus causas, los elementos vulnerables o expuestos y las consecuencias que pueden tener sobre las personas y los bienes. Los resultados de los estudios sirven después para tomar decisiones acerca de las medidas de prevención para eliminar o reducir los riesgos, en situación de normalidad o sobre las medidas de protección, para evitar o reducir las consecuencias (daños), en caso de que ocurra un accidente o catástrofe.

A partir de los análisis anteriores se elaboran los diferentes planes de emergencia tanto dentro de la central como para la población, de manera que en la ocurrencia de un accidente de esta magnitud el riesgo a la población y el medioambiente sea el mínimo.

Además, se debe indicar que únicamente el juicio detallado del diseño y de la experiencia operativa de estas instalaciones permite, hasta donde es posible, una cuantificación, compleja, del riesgo que encierre información significativa desde el punto de vista técnico, social y legal. El resto de las apreciaciones son eso, percepciones del riesgo, que, aunque merecen respeto, no responden ya a consideraciones técnicas, sino a valoraciones personales, juicios subjetivos, y a veces a miedos y al desconocimiento.

¹⁸⁰ External Costs. Research Results on Socio-Environmental Damages due the Electricity and Transport, Directorate General for Research, European Commission, EUR-20198, 2003.

¹⁸¹ Severe Accidents in the Energy Sector First Edition, Paul Scherrer Institute, PSI Bericht Nr. 98-16, Nov. 1998.

11.2.3.2. Desechos radioactivos;Error! Marcador no definido.

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.

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 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 incumplan 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 sección 4.6 del capítulo 4.

11.2.3.3. No proliferación y seguridad física;Error! Marcador no definido.

El proceso de enriquecimiento y la producción de plutonio en los reactores nucleares son los que provocan preocupación internacional, ya que pueden tener aplicaciones militares¹⁸².

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

¹⁸² Ver capítulo 5: Autoridad Reguladora Nuclear.

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.

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.

11.2.3.4. Riesgos de la actividad sísmica

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 ocurrir 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.¹⁸³

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.

¹⁸³ Nuclear Power Plants and Earthquakes, World Nuclear Association, January 2009.

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; **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 es el caso de Chile**.

11.2.3.5. 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 reevaluación 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.¹⁸⁴



Imagen 11.1 - 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.¹⁸⁵ Debido a su diseño, el edificio de contención y otros edificios de las centrales son obstáculos más firmes que podrían resistir mejor los ataques.

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

¹⁸⁴ Seguridad física nuclear, Informe anual para 2004, OIEA, Viena.

¹⁸⁵ The Future of Nuclear Power, MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts), Cambridge, Massachusetts (EE.UU), 2003.

de esa naturaleza.¹⁸⁶ 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.¹⁸⁷



Imagen 11.2 - *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

¹⁸⁶ Reactor Security: Multiple Safety Systems and Physical Construction, NEI (Instituto de Energía Nuclear), 2006, Washington, DC.

¹⁸⁷ Safety of Nuclear Power Reactors, Nuclear Issues Briefing Paper 14, UIC (Uranium Information Centre), 2006, Melbourne (Australia).

nucleoeléctricas son blancos muchísimo menos atractivos para los terroristas debido a las estrictas medidas de seguridad a que están sujetas estas instalaciones.^{188, 189}

11.2.3.6. Otros riesgos

11.2.3.6.1. Riesgo económico como consecuencia del retardo en la ejecución del proyecto

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 11.1). Por ello, antes de que la central entre en operación, una cantidad sustancial de tiempo y esfuerzo está involucrado 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 Chicago¹⁹⁰ ha realizado un cálculo donde se muestra que el pago de los intereses durante la construcción puede ser apropiadamente 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.

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 sea 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

¹⁸⁸ Site Security: Armed Guards, Physical Barriers, Detection Systems, NEI (Instituto de Energía Nuclear), 2006, Washington, DC.

¹⁸⁹ Security Effectiveness: Independent Studies and Drills, NEI (Instituto de Energía Nuclear), 2006, Washington, DC.

¹⁹⁰ The Economic Future of Nuclear Power, University of Chicago, 2004, http://www.anl.gov/Special_Reports/.

debidamente preparada para estas actividades, de manera que no sea un riesgo innecesario para los inversionistas.

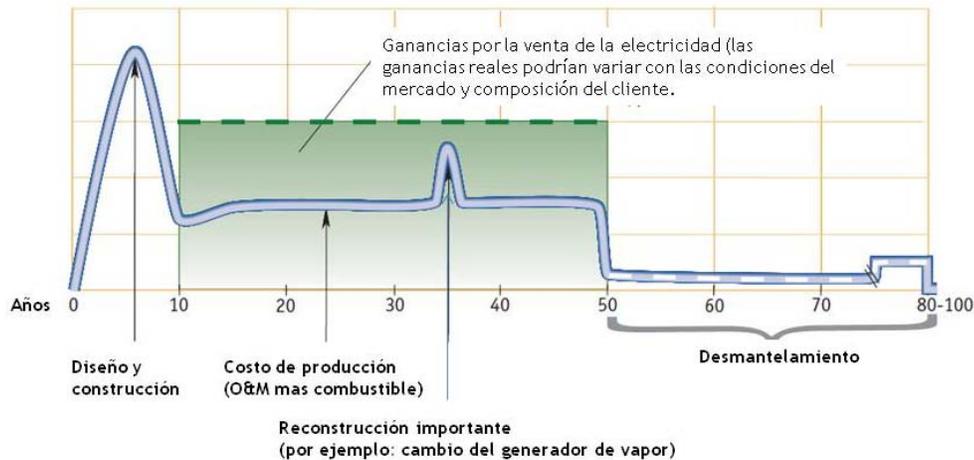


Figura 11.1 - Flujo de caja típico para un proyecto de una central nuclear.

Un ejemplo característico de este de riesgo es el del Programa de Generación Nuclear de Filipinas^{191,192}:

- 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.

¹⁹¹ <http://www.diariodenavarra.es/20080820/culturaysociedad/>

¹⁹² http://latercera.com/contenido/659_77405_9.shtml

- 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.

11.2.3.6.2. 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 participación en la conformación del costo de la generación es menor como se vio 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.

11.2.3.6.3. 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.

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.*

11.2.3.6.4. Riesgo por el agotamiento de las reservas de los diferentes tipos de combustibles; Error! Marcador no definido.

Este riesgo es particularmente importante en el caso de los *combustibles fósiles ya que se estima que sus reservas se agotarán 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 11.3¹⁹³.

Tabla 11.3 - 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
Ciclo puro del combustible de reactores rápidos con reciclado	500 - 600	1600 - 1900

En la Tabla 11.3 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 nucleoelectrónica.

Si se toman en cuenta los recursos de uranio no convencionales, aumentan considerablemente todas las cifras de la tabla 11.3. 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

¹⁹³ Uranium 2005: Resources, Production and Demand, OCDE, París.

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.¹⁹⁴ 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 11.3 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.

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.**

11.2.3.6.5. 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 inversionistas 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

¹⁹⁴ Informe Mundial de Energía: la energía y el reto de la sostenibilidad, PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo), 2000, Nueva York.

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.

11.2.3.6.6. 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.

11.2.3.6.7. 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 su

almacenamiento es factible ya que ocupa un volumen manejable permite que este sea almacenado en las centrales de nucleares de manera eficiente y en almacenes relativamente pequeños.

Dado lo anterior, se hace posible que las centrales nucleares puedan contar con existencia de este combustible para periodos largos, 3 - 5 años, en dependencia del tamaño de la piscina de almacenamiento, la estrategia para la campaña¹⁹⁵ del combustible seleccionada y el propio contrato de suministro del combustible.

11.2.3.6.8. 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.

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.

¹⁹⁵ 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.

Conclusiones

De forma similar al análisis del impacto ambiental, las diferentes fuentes de energía también poseen un riesgo asociado con su utilización en la generación eléctrica. Aunque en la actualidad los movimientos ambientalistas atacan fuerte a la generación eléctrica con combustibles fósiles, la convivencia de la población con este tipo de generación ha sido ampliamente asimilada.

Sin embargo, en el caso de la generación de energía eléctrica de origen nuclear, la aceptación del riesgo por parte de la población aun no es un hecho totalmente consolidado. De ahí, que existan diferentes posiciones a nivel de sociedad en cuanto a este tipo de generación. Por ello, en algunos países como España por ejemplo se debate fuertemente en el cierre de sus instalaciones nucleares a pesar de tener más de 30 años de experiencia en la operación de las mismas y aporte que realizan al total de la generación de este país. Sin embargo, en otro como Italia, se comienza hablar de incluir en la matriz energética este tipo de generación.

Se puede establecer que estas posiciones encontradas dentro de la sociedad no es más que un reflejo de la falta de conocimiento de esta tecnología a pesar de existir desde hace más de medio siglo adicionándole además el impacto negativo que tuvo para la población el accidente de central nuclear de Chernobyl.

Por ello, la industria nuclear ha incluido dentro sus actividades la transparencia en las actividades que desarrolla a través de información inmediata y confiable de la misma y el acercamiento a la sociedad para esclarecer cualquier estado de opinión que exista en torno a la industria. Por otro lado, desarrolla también nuevos tipos de reactores donde el riesgo por accidente, los desechos y la proliferación de los materiales nucleares sean mucho menores.

Bibliografía

- 11.1.- Risks and Benefits of Nuclear Energy, NEA No. 6242, OECD, 2007.
- 11.2.- L. A. Sachenko, Las bases metodológicas de la administración del riesgo en la energía nuclear, Autoreferat de la tesis a Candidato a Doctor en Ciencias Económicas, 2006.
- 11.3.- Journal of the American Medical Association 244, II: 1126-112 y Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina.
- 11.4.- Programa Nuclear Filipino:
[http://www.diarionavarra.es/20080820/cultura y sociedad](http://www.diarionavarra.es/20080820/cultura_y_sociedad)
http://latercera.com/contenido/659_77405_9.shtml
- 11.5.- Cuestiones sobre la energía, Foro de la Industria Nuclear Española, Enero 2007.
- 11.6.- Energía Nucleoeléctrica y Desarrollo Sostenible, Viena, OIEA, Febrero 2008.
- 11.7.- External Costs. Research Results on Socio-Environmental Damages due the Electricity and Transport, Directorate General for Research, European Commission, EUR-20198, 2003.
- 11.8.- Ball, Roberts & Simpson, Research Report #20, Centre for Environmental & Risk Management, University of East Anglia, 1994; Hirschberg et al, Paul Scherrer Institut, 1996; in: IAEA, Sustainable Development and Nuclear Power, 1997; Severe Accidents in the Energy Sector, Paul Scherrer Institut, 2001).
- 11.9.- Severe Accidents in the Energy Sector First Edition, Paul Scherrer Institute, PSI Bericht Nr. 98-16, Nov. 1998.
- 11.10.- Nuclear Power Plants and Earthquakes, World Nuclear Association, January 2009.
- 11.11.- The Future of Nuclear Energy in an Era of Environmental Crisis and Terrorist Challenge, World Association, Noviembre 2001.
- 11.12.- Analysis of Nuclear Power Plants Shows Aircraft Crash Would Not Breach Structures Housing Reactor Fuel, Nuclear Energy Institute, For Immediate Release, 23 Decembre 2002.

- 11.13.- Reactor Security: Multiple Safety Systems and Physical Construction, NEI (Instituto de Energía Nuclear), 2006, Washington, DC.
- 11.14.- Safety of Nuclear Power Reactors, Nuclear Issues Briefing Paper 14, UIC (Uranium Information Centre), 2006, Melbourne (Australia).
- 11.15.- Site Security: Armed Guards, Physical Barriers, Detection Systems, NEI (Instituto de Energía Nuclear), 2006, Washington, DC.
- 11.16.- Security Effectiveness: Independent Studies and Drills, NEI (Instituto de Energía Nuclear), 2006, Washington, DC.
- 11.17.- Uranium 2005: Resources, Production and Demand, OCDE, París.
- 11.18.- Informe Mundial de Energía: la energía y el reto de la sostenibilidad, PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo), 2000, Nueva York.
- 11.19.- The Economic Future of Nuclear Power, University of Chicago, 2004, http://www.anl.gov/Special_Reports.

Parte III

Conclusiones y Tabla Resumen

A partir de los elementos brindados en el desarrollo del estudio en esta parte se presentan las principales conclusiones a que llega el mismo, así como una tabla resumen de doble entrada con las distintas fuentes de generación por un lado y el listado de los impactos y riesgos por el otro de manera de concentrar la información que se ha ido presentando a lo largo del estudio, la que se anexa al documento.

“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 ElBaradei¹⁹⁶

¹⁹⁶ 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.

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 de energía 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 Núcleo-Eléctricidad.

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 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 nucleoelectrica en sus 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 y riesgos para el medio ambiente, 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 no pueden satisfacer ni la demanda actual ni la perspectiva ya que en las condiciones actuales de la tecnología, estas ocuparían un área demasiado grande que incluso entraría a competir con la producción agropecuaria para la alimentación humana. La solución no es Nuclear vs. Renovables, sino Nuclear y Renovable.
- 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 nucleoelectrica está, por lo general, mejor situada que los otros tipos de 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 Núcleo-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, y por lo tanto representa un tema que requiere mayor estudio, no de factibilidad, sino de conveniencia ante los potenciales costos de un diseño sísmico exigente. 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.

Relación de participantes en la elaboración del Estudio

- | | | |
|------|-------------------|--|
| 1.- | Victor Filichkin | Presidente - CNE Chile S. A. |
| 2.- | Anatole Gubin | Director General - CNE Chile S. A. |
| 3.- | Sergei Pegov | Ingeniero Nuclear - ROSENERGOATOM |
| 4.- | Manuel Cadavid | Licenciado en Física - CNE Chile S. A. |
| 5.- | Vasily Golovanov | Ingeniero Físico Nuclear - ROSENERGOATOM |
| 6.- | Viktor Yurmanov | Ingeniero Físico Nuclear - ROSENERGOATOM |
| 7.- | Vladimir Konbir | Ingeniero Físico Nuclear - Consultor |
| 8.- | Mikhail Gordeev | Abogado - ROSENERGOATOM |
| 9.- | Vladimir Asmolv | Ingeniero Físico Nuclear - ROSENERGOATOM |
| 10.- | Sergeu Jarlampiev | Ingeniero Físico Nuclear - ROSENERGOATOM |
| 11.- | Alexei Filichkin | Ingeniero Comercial - INTERMASH |
| 12.- | Daniel Trujeillo | Periodista - CNE Chile S. A. |