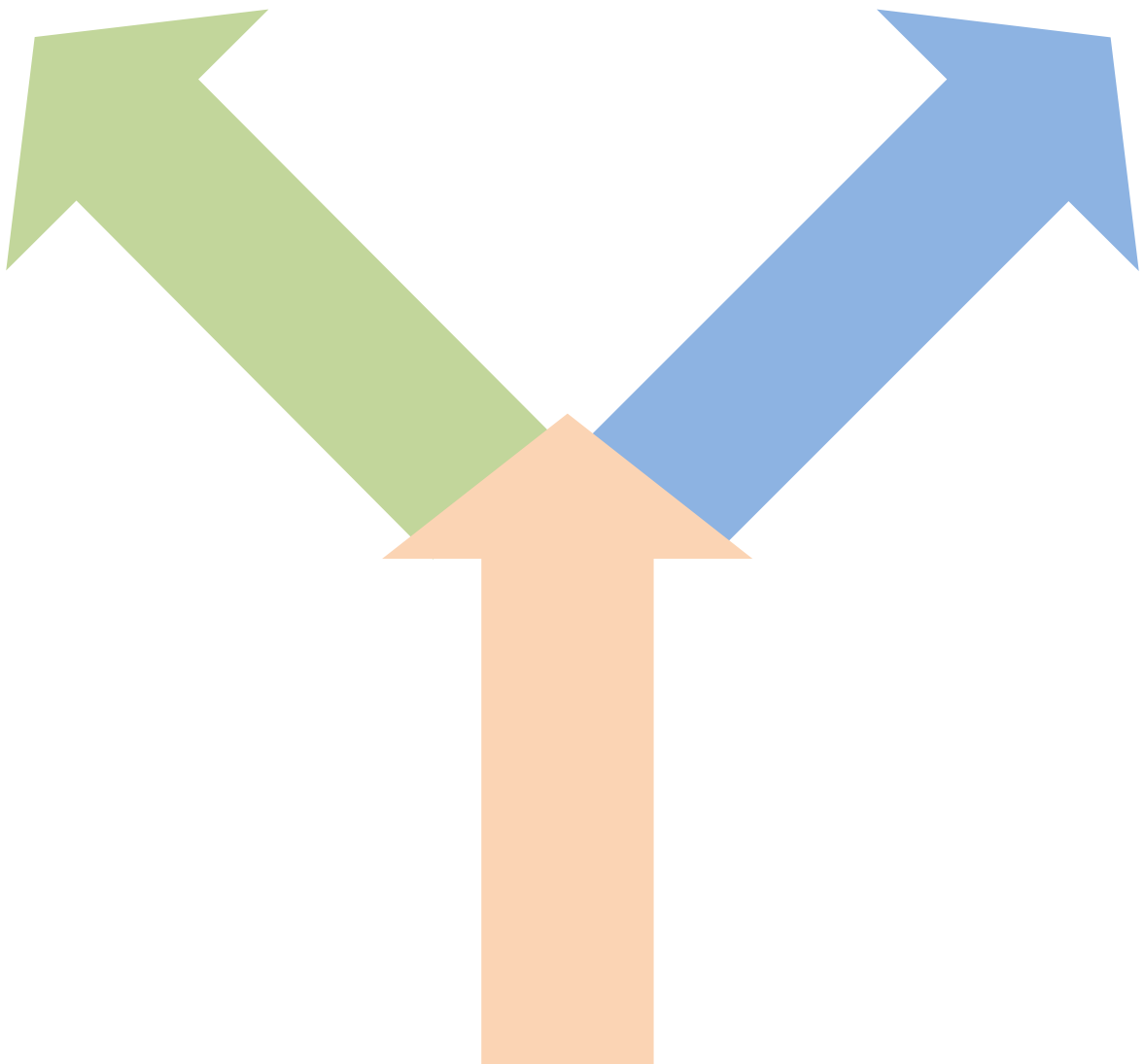


**ANÁLISIS PARA LA EVENTUAL PUESTA EN
MARCHA DE UN PROGRAMA NUCLEAR
PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA EN
URUGUAY**



OCTUBRE 2008

MONTEVIDEO, URUGUAY

PREFACIO

El presente informe tiene por objeto aportar elementos de juicio al Gobierno Nacional sobre la alternativa nucleoelectrica en el país. A partir de la información recabada por la Comisión creada para su redacción y del juicio experto de sus integrantes, el informe describe objetivamente aspectos que necesariamente Uruguay debería considerar y estudiar en profundidad para poder avanzar hacia una decisión técnica, económica, ambiental, política y socialmente sostenible.

Este documento no pretende dar una respuesta, ni positiva ni negativa, a la conveniencia de la opción nucleoelectrica para nuestro país.

El capítulo final de conclusiones y recomendaciones es autocontenido por lo que puede oficiar como resumen de este informe.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
PARTE I: LA ENERGÍA NUCLEOELÉCTRICA	5
CAPÍTULO 1 LA ENERGÍA NUCLEAR EN EL MUNDO.....	6
1.1 ANTECEDENTES	6
1.2 SITUACIÓN ACTUAL.....	6
1.3 PERSPECTIVA.....	9
CAPÍTULO 2 LA TECNOLOGÍA NUCLEAR.....	13
2.1 CONCEPTOS BÁSICOS	13
2.2 REACTORES NUCLEARES PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	15
2.2.1. Componentes básicos de un Reactor Nucleoeléctrico	15
2.2.2. Tecnologías de Reactores Nucleoeléctricos Comerciales.....	17
2.2.3. Clasificación de Reactores Nucleoeléctricos.....	18
2.3 EL CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR.....	23
2.3.1. Generalidades	23
2.3.2. Minería de Uranio.....	27
2.3.3. Refinación.....	28
2.3.4. Enriquecimiento.....	29
2.3.5. Fabricación del Combustible	29
2.3.6. Gestión del Combustible Quemado	30
2.3.7. Transporte	30
2.4 ASPECTOS ECONÓMICOS Y COMERCIALES.....	31
CAPÍTULO 3 LOS EFECTOS DE LA RADIATIVIDAD	37
3.1 LA RADIACIÓN RECIBIDA POR LOS SERES VIVOS	37
3.2 EMISIONES DE RADIATIVIDAD DEBIDO A LA INDUSTRIA NUCLEOELÉCTRICA.....	39
3.3 EFECTOS NOCIVOS DE LA RADIACIÓN SOBRE LOS SERES VIVOS.....	40
CAPÍTULO 4 SEGURIDAD NUCLEAR.....	42
4.1 SEGURIDAD NUCLEAR RADIOLÓGICA Y FÍSICA	42
4.2 SISTEMAS DE CONTROL DE REACTORES NUCLEARES	43
4.3 SISTEMAS DE SEGURIDAD RADIOLÓGICA DE REACTORES NUCLEARES	43
4.4 MECANISMOS DE PREVENCIÓN Y CONTRAMEDIDAS	45

4.5	CLASIFICACIÓN DE INCIDENTES Y ACCIDENTES.....	46
4.6	LOS ACCIDENTES MÁS RELEVANTES DE LA INDUSTRIA NUCLEOLÉCTRICA ...	49
4.6.1.	<i>Three Mile Island</i>	49
4.6.2.	<i>Chernobyl</i>	49
4.7	LAS LECCIONES APRENDIDAS.....	51
CAPÍTULO 5	LA CUESTIÓN DE LOS RESIDUOS	52
5.1	LOS RESIDUOS DE LAS PLANTAS NUCLEARES.....	52
5.2	EL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS.....	53
CAPÍTULO 6	EL CONTRALOR DE LA INDUSTRIA NUCLEAR.....	57
6.1	LA AUTORIDAD REGULADORA NUCLEAR NACIONAL	57
6.2	EL MARCO JURÍDICO NACIONAL	59
6.3	CONVENCIÓNES Y TRATADOS INTERNACIONALES	63
6.4	EL ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA	68
CAPÍTULO 7	EL RÉGIMEN DE SALVAGUARDIAS PARA EL USO PACÍFICO DE LA ENERGÍA NUCLEAR.....	69
PARTE II: LA OPCIÓN NUCLEOELÉCTRICA EN URUGUAY		72
CAPÍTULO 8	EL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL	73
8.1	SITUACIÓN ACTUAL.....	73
8.2	EVOLUCIÓN DE LA DEMANDA	75
8.3	SUMINISTRO DE LA DEMANDA.....	76
8.4	PERSPECTIVAS DE EXPANSIÓN	76
CAPÍTULO 9	IMPACTOS DE LA IMPLANTACIÓN DE UNA CENTRAL NUCLEAR EN EL SISTEMA DE GENERACIÓN DE URUGUAY	78
9.1	LA IMPORTANCIA DEL TAMAÑO DE UNA CENTRAL NUCLEAR RESPECTO AL TAMAÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE URUGUAY	78
9.2	CONEXIÓN DE UNA CENTRAL NUCLEAR A LA RED	79
9.3	LOS EFECTOS INMEDIATOS EN LA CONTINGENCIA DE SALIDA INTEMPESTIVA DE LA CENTRAL.....	79
9.4	LOS EFECTOS DE CORTO Y MEDIO PLAZO DE LA SALIDA DE SERVICIO DE LA CENTRAL NUCLEAR.....	81
9.5	LOS EFECTOS SOBRE LA PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA Y LA ECONOMÍA DEL SISTEMA ELÉCTRICO EN EL LARGO PLAZO.....	81
9.6	LOS ASPECTOS CONTRACTUALES ASOCIADOS A LA INCORPORACIÓN DE UNA CENTRAL NUCLEAR.....	84

9.7	LOS COSTOS DE LA GENERACIÓN NUCLEAR Y DE OTRAS FUENTES DE GENERACIÓN DE BASE	85
9.8	ESTIMACIÓN DE COSTOS MEDIOS DE GENERACIÓN A PARTIR DE DISTINTAS FUENTES	87
CAPÍTULO 10	ELEMENTOS PARA UNA DECISIÓN FUNDAMENTADA	93
10.1	EL MARCO INSTITUCIONAL.....	93
10.2	EL MARCO NORMATIVO.....	94
10.3	EL URANIO Y EL CICLO DEL COMBUSTIBLE	95
10.4	EL SITIO Y SUS REQUERIMIENTOS	97
10.5	LOS ASPECTOS AMBIENTALES.....	99
10.6	EL INVOLUCRAMIENTO DE LAS PARTES INTERESADAS	102
10.7	LA PLANIFICACIÓN DE LA ATENCIÓN DE CONTINGENCIAS	104
10.8	LA FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS.....	105
10.9	LAS RELACIONES INTERNACIONALES	106
10.10	PARTICIPACIÓN NACIONAL EN EL PROYECTO.....	107
10.11	EL EVENTUAL DESARROLLO REGIONAL CONJUNTO.....	108
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	110

INTRODUCCIÓN

Al igual que en otros países, en los últimos años diversos actores nacionales han manifestado un creciente interés por la posibilidad que Uruguay instale un reactor nuclear para generar electricidad. Esta posibilidad, que venía siendo estudiada como alternativa por un equipo técnico coordinado por la Dirección de Energía y Tecnología Nuclear (DNETN) del Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM), cobró relevancia cuando, en abril de 2008, el Sr. Presidente Tabaré Vázquez llamó a discutir el tema “sin tabúes”.

Como consecuencia de esta decisión política, el MIEM resolvió intensificar el estudio del tema, proponiendo a la Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE), Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA) y la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (FI-UdelaR) la creación de una Comisión formada por expertos nacionales que cubran la mayoría de las temáticas asociadas con la instalación de una planta nucleoelectrica: ingeniería nuclear, ingeniería mecánica, ingeniería eléctrica, ingeniería ambiental, física, aspectos económicos y regulatorios. A propuesta de UTE, DINAMA, FI-UDELAR, la DNETN y la Autoridad Reguladora Nacional en Radioprotección (dependiente del MIEM), la Comisión estuvo integrada por:

- María Magdalena Blanco (Ingeniera Nuclear - asesora independiente)
- Agnes Borchardt (Ingeniera Electricista - Gerente de Staff de Gerencia General - UTE)
- Claudia Cabal (Ingeniera Civil Hidráulica y Sanitaria, Master en Ingeniería Ambiental - Subgerente de Gestión Ambiental - UTE)
- Walter Cabral (Dr. en Medicina y Tecnología Veterinaria - Director del Departamento de Regulación y Licenciamiento – Autoridad Reguladora Nacional en Radioprotección)
- Tacuabé Cabrera (Ingeniero Industrial Mecánico, Master en Administración de Empresas - Gerente de Generación Térmica -UTE)
- Raúl Donangelo (Ingeniero Industrial, Dr. en Física, Prof. Titular Inst. Física, FI-UdelaR)
- Virginia Echinope (Ingeniera Electricista - Asesor en Energía Eléctrica - DNETN)
- Mario Ibarburu (Ingeniero Industrial Mecánico, Master en Economía Internacional, Master en Planificación Energética - Subgerente Planificador de Inversiones -UTE)
- Ramón Méndez Galain (Dr. en Física - Director de la DNETN)
- Pablo Mosto (Ingeniero Industrial Eléctrico - Asesor - DNETN)
- Andrés Saizar (Ingeniero Civil, Master en Ingeniería Hidráulica - Asesor - DINAMA)
- Roberto Suárez (Dr. en Ciencias, Posgrado en Ingeniería Nuclear - Asesor Físico-DNETN)
- Raúl Zeballos (Ingeniero Industrial Eléctrico, Licenciado en Economía – Profesor Adjunto Inst. Ing. Eléctrica – FI-UdelaR)

La Comisión siguió los lineamientos y recomendaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) para el abordaje de la temática planteada. Se utilizó la bibliografía internacional más actualizada en los diversos aspectos analizados en este informe. Asimismo, la Comisión se entrevistó con expertos internacionales, tanto en nuestro país como en el exterior.

Particular destaque merece la visita a nuestro país, en julio de 2008 de reconocidos expertos del OIEA: Ing. Ian Facer, Ing. Gustavo Carusso y el Ing. y Abogado Leonardo Sobehart, con especialidad en Infraestructura y Seguridad Nuclear, Autoridad Reguladora Nuclear y Legislación Nuclear respectivamente. En el marco de otras actividades de la Comisión, se mantuvo contacto con los principales proveedores mundiales de la industria nuclear. Asimismo, parte de la Comisión concurrió a la 7ma Conferencia Internacional realizada en Croacia y auspiciada por el OIEA *“Reactores nucleares en países con redes eléctricas pequeñas”*, al Taller organizado en Viena por el OIEA *“Definiendo Actividades Coordinadas para el Desarrollo de Plantas Nucleares en Países en Vías de Desarrollo, Basándose en las Consideraciones Comunes de los Usuarios”* y al curso *“Dirección de Proyectos en el Área Nuclear”*, organizado por la Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina. Finalmente, se visitó la planta nuclear Atucha II, que se encuentra en proceso de construcción en Argentina.

El contexto

Al igual que casi todos los países del mundo, Uruguay se enfrenta al desafío de satisfacer la demanda energética de todas las ramas de actividad (industrias, agro-pesca, servicios, hogares, transporte). La demanda de energía eléctrica en Uruguay ha crecido históricamente a una tasa promedio 3,2% en los últimos 20 años (siendo de 3,6% en los últimos 4). Hasta la fecha, la máxima energía anual demandada fue de 8881 GWh, mientras que la máxima demanda de potencia fue 1654 MW, ambas en 2007¹. Los recursos disponibles actualmente para satisfacer la demanda comprenden varias centrales que totalizan una capacidad de 1538 MW de potencia instalada de generación hidráulica, 790 MW de generación térmica en base a derivados del petróleo y 130 MW de generación en base a recursos renovables no tradicionales. Adicionalmente se dispone de la eventual importación de energía eléctrica de Brasil y fundamentalmente de Argentina.

Dependiendo del ritmo de crecimiento de la demanda, entre 2009 y 2025, el total de potencia firme a incorporar a lo largo de este periodo alcanzaría 1000 MW (con un crecimiento de la demanda anual promedio del 3%) o 1500 MW (con uno de 4.5%) no significando que esta incorporación tenga lugar en una única instancia sino que incluye decisiones intermedias.

De acuerdo a la información recabada por esta Comisión, en un marco de diversificación energética, de reducción significativa de la participación del petróleo en la matriz energética y de incorporación de energías de fuentes autóctonas, el gobierno nacional ha definido metas para el

¹ Datos de “UTE en cifras, 2007”

periodo 2009-2025 escalonado para el corto (2009-2015) y el medio (2015-2025) plazo. Dichas metas consideran la introducción de energías renovables, fundamentalmente eólica y biomasa, la ampliación de las capacidades hidráulicas existentes y la incorporación de otras de menor porte. Por otro lado se está procesando la instalación de capacidades locales de regasificación de gas natural licuado lo que contribuiría al suministro de gas natural, posibilitando el cambio de combustible tanto de las actuales como de futuras plantas térmicas. Asimismo, y como forma de ampliar aún más la diversificación de la base energética, se está estudiando la posibilidad de introducir plantas de carbón y/o plantas funcionando mediante esquistos bituminosos. Para el largo plazo, además de todas las opciones energéticas descritas en el párrafo anterior, surge también la posibilidad de incluir la energía nuclear dentro del menú de opciones para satisfacer la demanda eléctrica.

La opción nuclear está siendo considerada o reconsiderada en diversos países del mundo. Esto ha reactivado las polémicas en relación a las ventajas e inconvenientes de la opción nucleoelectrónica. Mientras que sus defensores insisten en que es hoy una alternativa segura y relativamente económica que permite mitigar las emisiones de CO₂, otros alertan sobre los altos riesgos potenciales, los costos iniciales y las dificultades para la gestión de los residuos. En todo caso, parece claro que la industria nuclear plantea desafíos mayores que los de otros tipos de opciones energéticas. Por dichas razones no es aconsejable emprender el camino nuclear sin haber realizado antes estudios técnicos multidisciplinarios y haber hecho las consideraciones políticas y sociales que posibiliten una decisión fundamentada.

La opción nucleoelectrónica en nuestro país plantea desafíos propios. En primer lugar, el plazo de puesta en funcionamiento de una nueva central, que en países con experiencia nucleoelectrónica puede llevar una década, en países que comienzan su camino nuclear difícilmente se logre en menos de 15 años². Por otro lado, no es recomendable que un sistema eléctrico soporte un módulo de generación unitario que supere el 10% del total de la capacidad instalada, cualquiera sea su fuente primaria de energía. Esto es particularmente relevante para plantas nucleoelectrónicas en sistemas eléctricos pequeños, dado que las centrales nucleares de menor tamaño disponible comercialmente en la actualidad son de varios centenares de MW.

Descripción del contenido

Este documento resume las principales informaciones recabadas por esta Comisión. Los temas analizados comprenden: el funcionamiento de un reactor nuclear, los reactores en proceso de desarrollo, el ciclo del combustible, el impacto en el sistema eléctrico nacional de la eventual introducción de reactores nucleares de diversos tamaños, los aspectos de seguridad asociados, el tratamiento de los residuos, la ubicación de la central, los aspectos ambientales, la regulación

² "Consideraciones para iniciar un programa nucleoelectrónico", OIEA, 2007

y el contralor, el marco legal e institucional, las consideraciones económicas y financieras, entre otros.

El informe se organiza en tres partes. En la PARTE I se analizan los diversos aspectos generales relacionados con la energía nucleoelectrica: su historia, la actualidad y sus perspectivas de desarrollo; la descripción de los principios de funcionamiento de una central nuclear y el ciclo del combustible; la descripción del efecto de la radiactividad sobre los seres vivos; los aspectos de seguridad de la industria, incluyendo la descripción de los principales accidentes; los diversos mecanismos de contralor nacionales e internacionales y los organismos que los garantizan; las salvaguardias para impedir el desvío de materiales nucleares con fines indebidos.

La PARTE II se centra en la eventual introducción de la opción nucleoelectrica en nuestro país. Se presentan los detalles de la red eléctrica y se describe de manera primaria el impacto energético y económico de la introducción de un reactor nuclear, en función de su tamaño. Asimismo, se mencionan una serie de aspectos a tener en cuenta para la toma de decisión: el ciclo del combustible, consideraciones sobre la formación de recursos humanos, el marco institucional y normativo, los aspectos ambientales, las necesidades del sitio donde se instalaría la central, posibles caminos para la resolución del tema de los residuos, la planificación de atención de contingencias, la forma de involucramiento de las partes interesadas, el grado de participación y desarrollo nacional en el emprendimiento, el eventual desarrollo regional conjunto, y las relaciones internacionales.

La tercera parte, que constituye el capítulo final, presenta las conclusiones del trabajo de esta Comisión. Asimismo, en esta última parte se recomienda un camino a seguir para alcanzar una decisión técnica, económica, ambiental, política y socialmente sustentable sobre la conveniencia de introducir la nucleoelectricidad en el país y, en caso que se resuelva su introducción, para que ésta se realice con las mayores garantías, la mayor eficiencia, el menor costo y en los menores tiempos posibles.

PARTE I:

LA ENERGÍA ELECTRONUCLEAR

En la primera parte de este documento se presentan los aspectos que esta Comisión entendió como fundamentales para comprender lo que significa la industria nuclear en el mundo. Se estructura en 7 capítulos: La energía nuclear en el mundo, La tecnología nuclear, Los efectos de la radiactividad, Seguridad nuclear, La cuestión de los residuos, El contralor de la industria nuclear y El régimen de salvaguardias para el uso pacífico de la energía nuclear.

CAPÍTULO 1 LA ENERGÍA NUCLEAR EN EL MUNDO

En este primer capítulo se presenta una breve historia de la industria nucleoelectrica en el mundo, de su situación actual y sus perspectivas, de las características tecnológicas, de seguridad y comerciales, de los principales factores señalados a favor y en contra de este tipo de industria, así como las primeras reflexiones generales en relación al camino internacionalmente recomendado para aquellos países que se encuentran estudiando la opción nuclear.

1.1 ANTECEDENTES

En 1942, apenas una década luego del descubrimiento de la radiactividad artificial, Enrico Fermi construyó en la ciudad de Chicago la primera "pila atómica". Sólo 3 años más tarde estas mismas ideas fueron utilizadas con fines militares en las bombas de Hiroshima y Nagasaki.

El 20 de diciembre de 1951 se produjo por primera vez electricidad a partir de un reactor nuclear, en Idaho, EEUU³.

El 26 de junio de 1954, en la ciudad de Obninsk, cerca de Moscú, la primera planta de energía nuclear fue conectada a la red de distribución de electricidad para proporcionar energía a consumidores⁴.

Entre los años 50 y 60 comenzaron a construirse centrales nucleares en varios países. Surgió entonces una nueva industria asociada tanto a la construcción de las centrales como a la extracción, preparación y tratamiento de los minerales que constituyen el combustible.

En paralelo, en un marco internacional signado por la guerra fría y la proliferación de armas atómicas, en la conferencia de la ONU (Nueva York, octubre 1956), 81 estados aprobaron el estatuto del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA, o IAEA en inglés), estableciendo sus responsabilidades de control y desarrollo de la energía nuclear para propósitos exclusivamente pacíficos. El estatuto del OIEA entró en vigencia el 29 de julio de 1957⁵.

1.2 SITUACIÓN ACTUAL

La cantidad de centrales instaladas en el mundo creció fundamentalmente en las décadas del 70 y el 80, pasando de 225 a fines de los años 70 a más de 400 a fines de los 80⁶. Este crecimiento, cuya velocidad aumentó a partir de la crisis petrolera de los años 70, se hizo menos sostenido luego del accidente de Chernobyl en 1986 (ver Figura 1).

³ http://www.ieee.org/web/aboutus/history_center/ebr1.html

⁴ <http://www.iaea.org/NewsCenter/News/2004/obninsk.html>

⁵ <http://www.iaea.org/About/history.html>

⁶ *Nuclear Reactors in the World*, IAEA Reference Data Series N° 2, Vienna, 2008 Ed., page 21, Table 7: ANNUAL CONSTRUCTION STARTS AND CONNECTION TO THE GRID, 1955 TO 2007.

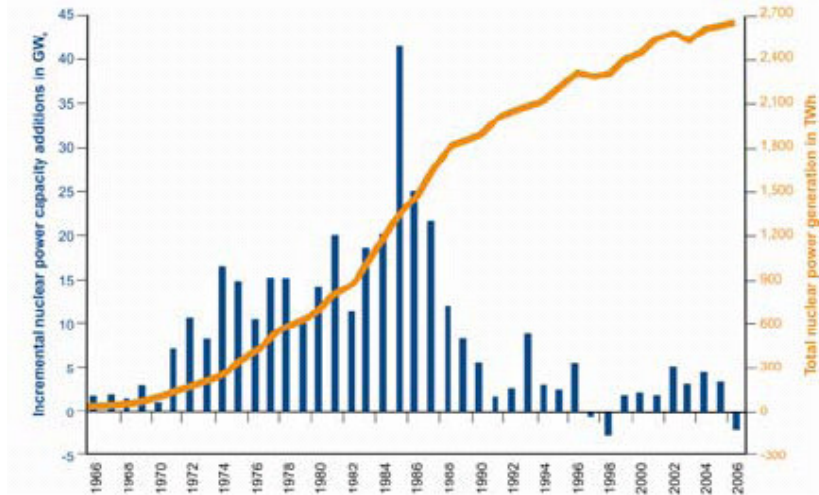


Figura 1: Incremento de capacidad mundial de generación nucleoelectrónica y generación eléctrica ⁷

Actualmente se encuentran en operación 439 reactores localizados en 30 países, con una capacidad instalada de 372100 MW⁸ y generando 2608 TWh en 2007 lo que representó el 15% del total mundial de energía eléctrica generada⁹.

En la Figura 2 se presentan los países que poseen esta opción energética en orden decreciente de porcentaje que representa la nucleoelectricidad en su generación total de energía eléctrica¹⁰.

En Europa, varios países detuvieron la construcción de nuevas centrales nucleares: es el caso de Alemania¹¹, Bélgica¹², España¹³ y Suecia¹⁴. Italia¹⁵ cerró sus plantas nucleares en 1987 luego de una consulta pública sobre este tema. En Inglaterra se detuvo la construcción de nuevas plantas aún cuando no existe ninguna restricción legal al respecto¹⁶. Por otro lado, países como Francia, continuaron apostando a la generación nucleoelectrónica. Francia ha destacado la importancia de la tecnología nuclear en términos de su robustez económica y su relevancia en el suministro de energía eléctrica. En mayo de 2006 se aprobó la construcción de un nuevo reactor el cual se encuentra en construcción (Flamanville 3, 1.620 MW, en operación para el 2013) y en los planes de expansión se encuentra otro propuesto¹⁷.

⁷ 2007 Survey of Energy Resources World Energy Council 2007 *Nuclear*
⁸ (http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/RDS2-28_web.pdf
⁹ <http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html?terms=GENERATION+2008>
¹⁰ <http://www.world-nuclear.org/info/nshare.html>
¹¹ www.world-nuclear.org/info/inf43.html
¹² www.world-nuclear.org/info/inf94.html
¹³ www.world-nuclear.org/info/inf85.html
¹⁴ www.world-nuclear.org/info/inf42.html
¹⁵ www.world-nuclear.org/info/inf101.html
¹⁶ www.world-nuclear.org/info/inf84.html
¹⁷ <http://www.world-nuclear.org/info/inf40.html>

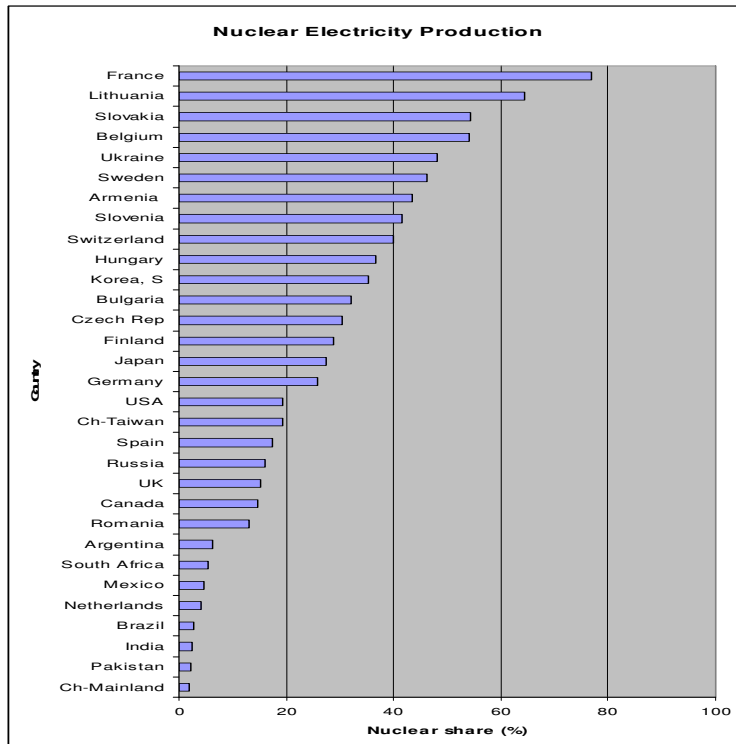


Figura 2: Lista de países que poseen reactores nucleares, con su porcentaje de la nucleoelectricidad en el total de la energía eléctrica del país.

En EEUU operan al presente 104 reactores nucleares, suministrando casi el 20% de la energía eléctrica consumida. Los proyectos nucleares estadounidenses sufrieron un duro revés después del accidente de Three Mile Island¹⁸. Entre 1974 y 1995, 65 proyectos de plantas nucleares fueron desestimados¹⁹.

Por otro lado, en Asia los programas nucleares nunca se detuvieron y la capacidad de generación en base a la energía nuclear está creciendo significativamente como respuesta a su creciente demanda de electricidad. Actualmente en esta región hay 111 reactores en operación, 21 reactores en construcción y se tienen planes firmes para construir otro centenar²⁰.

Sólo tres países de América Latina poseen plantas nucleares: Argentina, Brasil y México. Cada uno de ellos posee 2 centrales en funcionamiento²¹, además de fuertes estructuras de investigación, desarrollo y formación de recursos humanos. Las centrales nucleares en operación en Argentina son: Atucha I, 357MW (desde 1974) y Embalse, 648MW (desde 1983);

¹⁸ <http://www.world-nuclear.org/info/inf41.html>

¹⁹ 2006-2007 Information Digest, United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC), August 2006.

²⁰ [/www.world-nuclear.org/info/inf47.html](http://www.world-nuclear.org/info/inf47.html)

²¹ http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/RDS2-28_web.pdf

en Brasil: Angra I, 657MW (desde 1982) y Angra II, 1350MW (desde 2000); y en México: Laguna Verde I, 682MW (desde 1989) y Laguna Verde II, 682MW (desde 1994).

1.3 PERSPECTIVA

Ante la necesidad de satisfacer una demanda energética creciente en un marco de mayor preocupación por las emisiones de CO₂ y de un incremento sostenido de los precios de los energéticos tradicionales, surge internacionalmente con fuerza la discusión en relación a las diversas fuentes de energía, sus ventajas y desventajas.

En este contexto, la energía nuclear es una alternativa que vuelve a discutirse con interés, presentándose tanto claros defensores como detractores. Las principales razones esgrimidas a favor de esta opción son esencialmente cuatro:

- En un mundo cada vez más preocupado por la excesiva producción humana de gases de efecto invernadero, el hecho que una central no emita dicho tipo de gases, a diferencia de lo que ocurre con las centrales alimentadas a partir de energías fósiles, se ha convertido en un poderoso argumento a favor de los defensores de la energía nucleoelectrica.
- Se entiende que, a pesar de su rápido crecimiento, las energías renovables podrían no alcanzar a resolver por sí solas, al menos con las tecnologías actuales, el problema global de la energía en el mundo.
- Se indica que a partir de los accidentes conocidos, y fundamentalmente luego de Chernobyl, la seguridad de los reactores se encuentra en una fase sustancialmente mejorada respecto de la predominante en la década del 80, reduciendo significativamente las probabilidades de ocurrencia de un accidente de proporciones semejantes.
- Por último, los defensores de la energía nuclear señalan que el costo final de este tipo de energía es relativamente bajo, debido fundamentalmente al bajo costo de los combustibles, cuyo suministro podría ser asegurado en la misma instancia de adquisición del reactor, al menos durante un período significativo de su vida útil.

Por otro lado, los detractores de esta opción energética plantean al menos cuatro objeciones importantes:

- Uno de los cuestionamientos se refiere a los residuos de esta industria, varios de los cuales deben permanecer custodiados durante miles de años debido a su alta carga tóxica, rechazando como válidas las soluciones tecnológicas propuestas hasta la fecha.
- Los críticos de la energía nuclear entienden que una planta de este tipo presenta un peligro potencial tan alto que puede no resultar mitigado por las medidas de seguridad existentes.
- Se cuestiona la viabilidad de largo plazo de este tipo de energía, debido a que su combustible es no renovable y que se agotaría en unas décadas.
- Por último, esta corriente de opinión considera que los costos de inversión inicial de este tipo de plantas resultan excesivamente elevados respecto a otras alternativas.

Más allá de estas consideraciones contrapuestas, la opción nuclear está comenzando a presentar un interés creciente en el mundo. El ritmo de incorporación de centrales nucleares se ha incrementado en los últimos años. En el año 2007 se comenzó la construcción de 7 plantas en el mundo. Este valor es el mayor que se ha registrado en los últimos 20 años igualando al de los años 1986 y 1987²².

Actualmente se registran unos 36 reactores nucleares en proceso de construcción, principalmente en China (7), Rusia (7) e India (6)²³. Asimismo, la construcción de otros 50 nuevos reactores se encuentra en proceso de estudio: China tiene planeados construir 26 nuevos reactores, Japón 11, India 10 y Rusia 12, entre los países más destacados.

En Europa, varios países han manifestado su voluntad de retomar sus planes nucleares, entre ellos Inglaterra y Bélgica. En mayo de 2005 en Finlandia se inició la construcción de una central nuclear prevista para entrar en operación en 2011. Se trata de una planta de 1600 MW de tecnología franco-alemana, tipo EPR (European Pressurised Water Reactor) que constituye un nuevo estándar de diseño²⁴. En Estados Unidos, por su parte, 15 plantas nucleares (24 reactores) se encuentran en proceso de licenciamiento por el USNRC (United States Nuclear Regulatory Commission).²⁵

En nuestra región, Argentina, Brasil y México, los tres países que poseen plantas nucleares para generación eléctrica, han resuelto en los últimos años relanzar sus planes nucleares. En particular, nuestros dos vecinos inmediatos tienen cada uno una planta en construcción, en Brasil la central Angra III y en Argentina se ha retomado la construcción de la central Atucha II. La situación en el mundo en cuanto a la utilización de la energía nucleoelectrónica se aprecia gráficamente en la Figura 3²⁶.

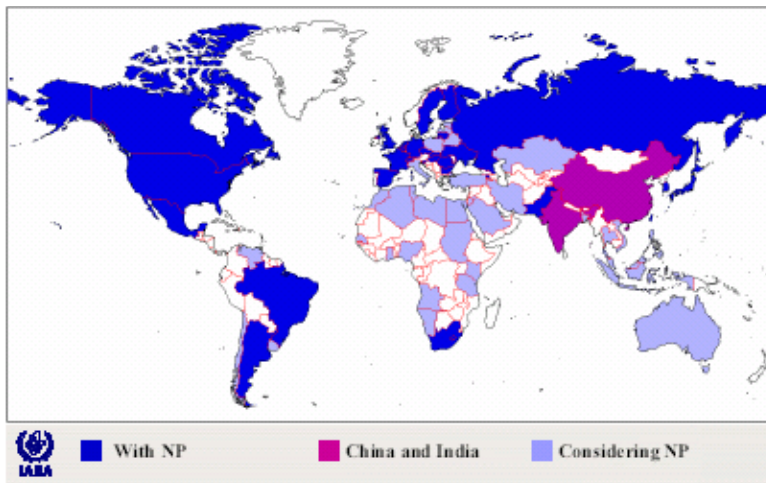


Figura 3: Los países mundiales y su situación en relación a la opción nucleoelectrónica

²² "Nuclear Power Reactors in the world" 2008 <http://www.iaea.org/programmes/a2/>

²³ <http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html?terms=GENERATION+2008>

²⁴ www.world-nuclear.org/info/inf76.html

²⁵ <http://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/col.html>

²⁶ <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/csd15/H2R-070504-csd-15-short.pdf>

De acuerdo a la información proporcionada por los expertos de OIEA en ocasión de su visita a Uruguay a fines de junio de 2008, alrededor de 50 países que no poseen hoy plantas nucleares se encuentran considerando la posibilidad de esta opción. Por otro lado, las proyecciones de incorporación de la energía nucleoelectrica en el mundo tienen un rango de dispersión a futuro que evidencia la incertidumbre actual de los programas de los distintos países (ver Figura 4).

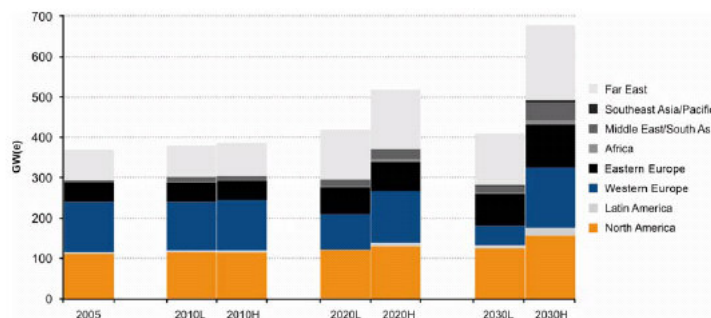


Figura 4: Proyecciones de OIEA de la capacidad nuclear total instalada escenario bajo (L) y alto (H) ²⁷

Todo país que busque iniciar un camino nuclear debe considerar muy cuidadosamente todas las consecuencias asociadas a esta opción energética. La opción nuclear plantea un enorme desafío y genera un gran impacto en el país; por lo tanto, la decisión de adoptar o no esta alternativa debe ser precedida por un estudio exhaustivo de una gran cantidad y diversidad de aspectos que requieren ser analizados con el mayor detalle. Un elemento central en el análisis lo constituye el hecho que la instalación de la industria nucleoelectrica trasciende ampliamente la mera compra de una central nuclear; exige la puesta en funcionamiento de un complejo programa nuclear en el país. Este programa debe incluir la infraestructura necesaria para soportar el funcionamiento de la industria y garantizar que el mismo pueda realizarse siguiendo los criterios de seguridad recomendados internacionalmente. Esto conlleva, entre otras cosas, la creación de nuevas instituciones, las cuales deben ser dotadas de recursos humanos altamente capacitados, todo ello inserto en un nuevo marco legal. En particular, para instalar una central nuclear se requiere que la misma sea licenciada en el país donde se instalará. Este licenciamiento es otorgado por la Autoridad Reguladora Nuclear Nacional (ARNN) y consiste de dos partes, el permiso de construcción y la licencia de operación. Por esta razón, cada país debe tener una ARNN en funcionamiento y con las capacidades técnicas y humanas adecuadas antes de la compra de la primera central.

Para apoyar a los países que se encuentran estudiando la eventualidad de un programa nucleoelectrico propio, el OIEA ha propuesto una estrategia de abordaje. Dicha estrategia²⁸ consiste en 3 fases preparatorias que preceden a una cuarta fase de puesta en funcionamiento de la primera planta. La primera fase, llamada de análisis, consiste en la consideración de casi una veintena de aspectos que se sugiere estudiar exhaustivamente para poder tomar una

²⁷ 2007 Survey of Energy Resources World Energy Council 2007 *Nuclear*

²⁸ "Milestones in the Development of a National Infrastructure of Nuclear Power" OIEA Sept. 2007

decisión fundamentada. Sólo al cabo de esta primer fase de análisis, difícilmente realizable en menos de dos años, el país se encuentra en condiciones de tomar una decisión consciente en relación a un eventual programa nucleoelectrico. La segunda fase, en caso de haberse alcanzado una resolución positiva al cabo de la primera, consiste en la construcción de la infraestructura necesaria para poder poner en marcha un programa nucleoelectrico, La tercera fase es la de la elección de la tecnología más adecuada, la compra de la central y su construcción. Los plazos habituales de construcción de una central nuclear en el mundo han sido históricamente de entre 6 y 8 años,²⁹ aunque existen muchos ejemplos de centrales que, por diversas razones, han visto demorada su construcción por plazos prolongados, hasta de décadas, y en otros casos interrumpida la misma sin haberse vuelto a retomar.

Como consecuencia de todas estas consideraciones, aún con los mayores apoyos gubernamentales (tanto en aspectos económicos como políticos) y de amplios sectores de la ciudadanía, y suponiendo que los plazos de construcción se cumplen de manera adecuada, todas estas etapas que no es posible obviar, asociadas con plazos pocos flexibles, llevan el período total del proyecto de incorporación de una primera central a no menos de 15 años.

²⁹ http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/RDS2-28_web.pdf

CAPÍTULO 2 LA TECNOLOGÍA NUCLEAR

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS

Una reacción nuclear es un proceso que altera al núcleo de un átomo, ya sea en su energía, su estructura o su composición. La llamada fisión nuclear es un proceso físico por el cual ciertos núcleos se “desintegran” (es decir, se fragmentan, transformándose en otros núcleos), emitiendo partículas subatómicas, generalmente neutrones a gran velocidad, así como calor.

Si bien la fisión ocurre de manera espontánea en la naturaleza, es posible generar reacciones de fisión de manera artificial. Esto se logra, con determinados núcleos, enviando sobre ellos neutrones a velocidades determinadas. La llamada reacción en cadena consiste en aprovechar los neutrones emitidos durante la fisión de un núcleo, para generar nuevas reacciones de fisión en otros núcleos. Los núcleos susceptibles de producir este proceso se llaman núcleos fisibles.

En las centrales nucleares, dentro del reactor nuclear, ocurre una reacción de fisión en cadena controlada. Mediante un adecuado control de determinados parámetros físicos, se produce cada segundo un número muy alto de reacciones de fisión, a una tasa que permanece constante. Se genera entonces una determinada cantidad de calor, que no varía con el tiempo. En la casi totalidad de los reactores, el proceso sólo es posible si se modera la velocidad de los neutrones; es decir, el diseño tecnológico del proceso requiere la disminución sustancial de la velocidad de los neutrones emitidos, para que alcancen velocidades a las que pueden ser captados por otros núcleos. En otros reactores, los llamados Reactores de Neutrones Rápidos que aún no se comercializan por encontrarse todavía en etapa de desarrollo y que describiremos más adelante, el proceso ocurre sin la necesidad de moderar a los neutrones.

Al igual que en una central térmica tradicional funcionando mediante una caldera de combustión de gas, carbón o derivados del petróleo, el calor generado en un reactor nuclear calienta un fluido (generalmente agua), la energía térmica transferida se transforma en trabajo mecánico y este último en energía eléctrica en un grupo turbina-generador. Sin embargo, la cantidad de energía liberada en un proceso nuclear, por unidad de masa de materia involucrada, es millones de veces mayor que la que ocurre en cualquier reacción de combustión química.

En la naturaleza existe un único núcleo fisible³⁰: el denominado isótopo 235 del uranio (²³⁵U). Sin embargo, el uranio se encuentra en la naturaleza como una mezcla de esencialmente dos isótopos, el denominado uranio 238 (²³⁸U) y el uranio 235, y la proporción de uranio 235 es muy baja: sólo el 0.7%.

³⁰ En la naturaleza existen también trazas de otros dos núcleos fisibles, el uranio 233 y el plutonio 239, pero en cantidades exiguas como para un uso industrial

Aquellos reactores nucleares cuyo principal objetivo es la producción de energía se llaman generalmente reactores nucleares de potencia; en adelante los llamaremos simplemente reactores nucleares. De acuerdo a la proporción utilizada de uranio 235 en un reactor, se han desarrollado soluciones tecnológicas diferentes para aplicaciones energéticas y por ello se puede clasificar a los reactores de potencia según el tipo de combustible que utilizan:

- uranio natural (proporción de 0,7% en peso de uranio 235)
- uranio enriquecido (proporción de 2-5% en peso de uranio 235): requiere del enriquecimiento del uranio para incrementar la cantidad de átomos de uranio 235. Es el combustible utilizado en la mayoría de los reactores actualmente en operación.

Ambos tipos de reactores requieren el empleo de una sustancia moderadora para aumentar la probabilidad de fisiones y mantener la reacción en cadena, aunque la sustancia es diferente en ambos casos.

Además del único núcleo fisible natural, otros dos núcleos existentes en la naturaleza, el ya mencionado uranio 238 así como el torio 232, tienen la particularidad de poder transformarse, mediante una reacción nuclear apropiada, en núcleos fisibles que no se encuentran naturalmente; el plutonio 239 y el uranio 233, respectivamente. Por esta razón, al uranio 238 y el torio 232 se les llama "núcleos fértiles". Como se ha señalado, el uranio 238 es 140 veces más abundante que el 235, mientras que la cantidad de torio en la naturaleza es aún mayor. Por esta razón, existen en desarrollo un número importante de reactores nucleares que, funcionando mediante tecnologías diferentes, permitirían realizar una mejor utilización de los recursos disponibles en la naturaleza. En particular, merecen destacarse los Reactores de Neutrones Rápidos (también llamados Breeders o reproductores) que funcionan con combustible de uranio-plutonio, reactores que funcionan con neutrones moderados con un combustible de torio-uranio, y reactores sub-críticos que necesitan un acelerador de partículas para funcionar, pero que, como contrapartida pueden utilizar el combustible "ya quemado" por otros reactores.

El funcionamiento de los reactores nucleares produce residuos radioactivos muy tóxicos cuyos volúmenes son menores, comparados con los generados por otras fuentes energéticas, pero para los cuales es necesario hallar soluciones técnicas socialmente aceptables.

En las centrales térmicas nucleares, a diferencia de lo que sucede con las centrales térmicas de combustión, no tiene lugar la liberación de gases ni de partículas directamente involucrados en las reacciones nucleares que liberan el calor: tanto el elemento combustible que se va desgastando como sus subproductos permanecen confinados en el núcleo hasta su recambio, permaneciendo luego dentro del edificio de la central hasta la etapa de tratamiento o disposición intermedia o final de los residuos, como se verá más adelante.

En la Figura 5 se presentan las emisiones de gases de efecto invernadero de distintas alternativas para generación de energía eléctrica. Las mismas incluyen las emisiones a lo largo de todo el proceso, incluyendo las etapas de fabricación de componentes y su transporte y, si corresponde, la extracción minera.

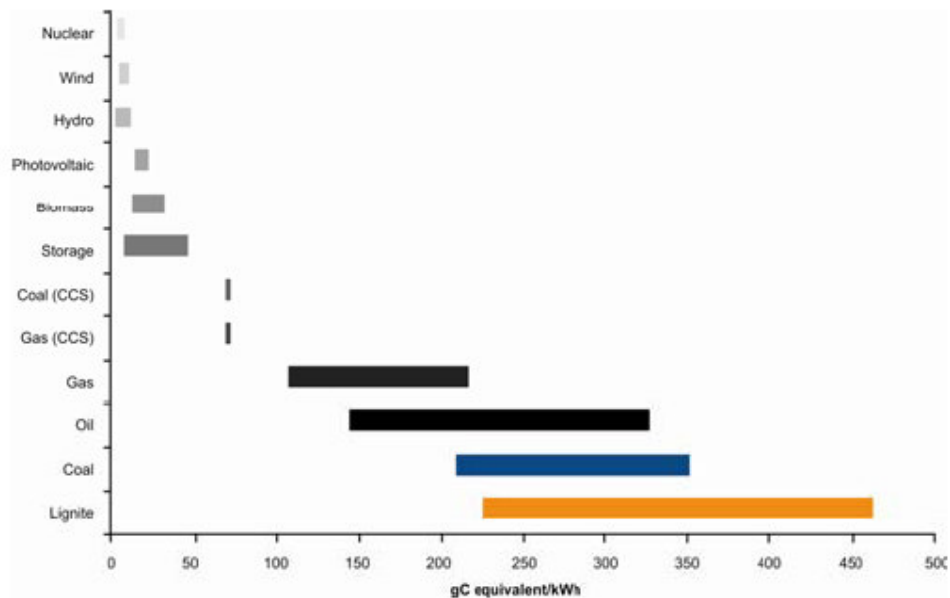


Figura 5: Emisiones de gases de efecto invernadero (gramos de carbono por kwh) para las diferentes fuentes energéticas³¹.

2.2 REACTORES NUCLEARES PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

2.2.1. Componentes básicos de un Reactor Nucleoeléctrico

Como se ha mencionado, un reactor nuclear produce y controla la energía liberada por la fisión del combustible y una planta nuclear es esencialmente un generador termoeléctrico en el cual el calentamiento del fluido que acciona la turbina es producido por energía nuclear. Una planta nuclear puede subdividirse en dos partes, una no-nuclear y la otra denominada isla nuclear. Los componentes básicos de la isla nuclear, presentes en casi todos los tipos de reactores nucleares de fisión, son:

- **Combustible:** Es el material a ser empleado para la reacción de fisión nuclear en cadena. Se suelen utilizar pastillas de dióxido de uranio (UO₂) dispuestas en tubos, constituyendo las denominadas barras combustibles. Estas barras se agrupan en conjuntos constituyendo los elementos combustibles que son los que se insertan dentro del núcleo del reactor.
- **Refrigerante:** Se trata de un fluido, líquido o gaseoso, que circula a través del núcleo a los efectos de extraer el calor generado, el cual será empleado en el circuito de vapor.
- **Moderador:** Este material tiene como cometido enlentecer (también se dice “moderar”) los neutrones rápidos liberados por la fisión. Generalmente se utiliza agua liviana (H₂O) pero

³¹ Survey of Energy Resources World Energy Council 2007 *Nuclear*

también puede utilizarse agua pesada³² o grafito. En los reactores de agua liviana, el refrigerante cumple también la función moderador.

- Barras de control: Están constituidas por material absorbente de neutrones tales como el cadmio, hafnio o boro. Estas barras se introducen o retiran del núcleo tanto para controlar la tasa de reacción como para interrumpirla³³.
- Recipiente de presión/Tubos de presión: Los elementos combustibles y el refrigerante se pueden hallar contenidos en un único recipiente de presión o bien en un conjunto de tubos de presión. En el caso del recipiente de presión, se emplea agua, no solamente como refrigerante, sino también como moderador. En el segundo caso, cada tubo de presión se encuentra rodeado por el material moderador, que puede ser un líquido (por ejemplo, agua pesada) o un sólido (por ejemplo, grafito). Constituye(n) una primera barrera de protección y contención.
- Edificio de Contención: Es la estructura que rodea al núcleo del reactor. Está diseñada para proteger al núcleo de intrusiones desde el exterior y para proteger al exterior de los efectos de la radiación en caso de cualquier falla de funcionamiento en el interior. Típicamente se trata de una estructura de hormigón y acero de aproximadamente 1 metro de espesor.
- Reflector: El reflector se coloca alrededor del núcleo para reflejar los neutrones en fuga. Generalmente se utiliza el mismo material que en el moderador.
- Blindaje: Se ubica fuera del reflector de modo que la radiación no escape del reactor, blindando el exterior contra los neutrones más energéticos y la radiación electromagnética.

En la Figura 6 se presenta el esquema de una planta nuclear típica (PWR) a los efectos de individualizar sus principales componentes.

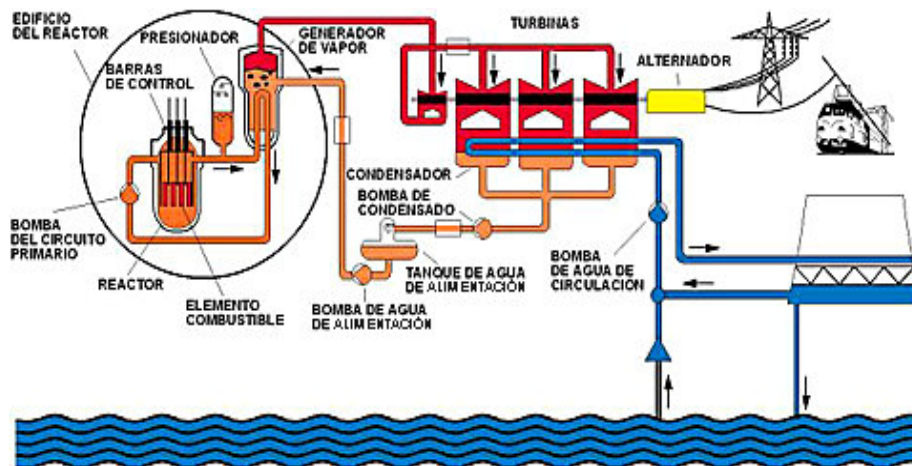


Figura 6: Esquema de una planta nuclear típica

³² D₂O, donde el símbolo D representa al deuterio, que es el isótopo del Hidrógeno que contiene un neutrón en su núcleo

³³ Existen también sistemas secundarios de control que involucran la introducción al sistema de otros absorbentes de neutrones, generalmente fluidos.

2.2.2. Tecnologías de Reactores Nucleoeléctricos Comerciales

Es posible distinguir diferentes tecnologías de reactores disponibles comercialmente. Se diferencian esencialmente por el grado de enriquecimiento del uranio y, por ende, del tipo de moderador. 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) también conocido por su sigla en ruso **VVER**³⁴: Tanto el refrigerante como el moderador son agua liviana (H_2O) presurizada. El refrigerante transfiere su calor a un fluido de un circuito secundario que acciona a la(s) turbinas. El combustible utilizado es óxido de uranio (UO_2) enriquecido. Para recargar el combustible requieren parar la planta cada 18 a 24 meses.
- **BWR** (Boiling Water Reactor: Reactor con Agua en Ebullición): Tanto el refrigerante como el moderador son agua liviana (H_2O). No posee circuito secundario, el refrigerante acciona directamente a la(s) turbina(s). El combustible utilizado es óxido de uranio (UO_2) enriquecido.

El segundo tipo más usual de reactor es:

- **PHWR** (Pressurised Heavy Water Reactor: Reactor con Agua Pesada Presurizada; más conocido con el nombre de CANDU³⁵ Tanto el refrigerante como el moderador son agua pesada (D_2O) presurizada. El refrigerante transfiere su calor a un fluido de un circuito secundario que acciona a la(s) turbinas. El combustible utilizado es óxido de uranio (UO_2) natural. Para recargar el combustible no requieren parar la planta sino que puede realizarse durante la operación.

Asimismo, existe un reducido número de otro tipo de reactores de potencia funcionando mediante otras tecnologías. Algunos de ellos se encuentran aún en proceso de desarrollo:

- **GCR** (Gas Cooled Reactor: Reactor Refrigerado a Gas) El refrigerante es anhídrido carbónico (CO_2) y moderado con grafito. Los exponentes más destacados de esta tecnología lo constituyen el **Magnox**³⁶ y el **AGR**³⁷ El combustible es uranio natural metálico y dióxido de uranio (UO_2) enriquecido.
- **LWGR** (Light Water Graphite Reactor: Reactor refrigerado con Agua Liviana y moderado con Grafito; también conocido por su sigla en ruso, **RBMK**.³⁸ El combustible utilizado es óxido de

³⁴ Vodo Vodianoi Energueticheskii Reactor, traducible por Reactor de Energía Agua-Agua

³⁵ **CAN**ada **D**euterium **U**ranium

³⁶ El nombre Magnox proviene de la aleación constituida principalmente por magnesio, con pequeñas cantidades de aluminio y otros metales, usada para revestir las vainas de combustible.

³⁷ Advanced Gas-cooled Reactor: Reactor refrigerado a gas Avanzado

³⁸ Реактор Болшой Мощности Канальный, Reactor de potencia de tipo canal

uranio (UO₂) enriquecido. Podría considerarse como un subgrupo de éste al **GBWR**.³⁹ 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). Reactor refrigerado con sodio líquido. Sus componentes son básicamente los mismos que para un reactor usual salvo por la ausencia de moderador y por 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 enriquecimiento o de reprocesamiento. El propósito es que el uranio 238 absorba los neutrones rápidos que fugan del núcleo, obteniendo así plutonio 239 (²³⁹Pu), fisible. El combustible utilizado es óxido de plutonio (PuO₂) y dióxido de uranio (UO₂).

La Tabla 1 muestra la distribución de los diversos tipos de reactores, así como los principales países que los poseen.⁴⁰

Tabla 1: Distribución de los tipos de reactores y principales países que los poseen

Tipo de Reactor	Principales países que los poseen	Cantidad total mundial instalada	Potencia (MW)
PWR/VVR	EEUU, Francia, Japón, Rusia, Ucrania	265	243.421
BWR	EEUU, Japón	94	85.956
PHWR (CANDU)	Canadá, India	44	22.384
GCR	Reino Unido	18	9.034
LWGR/RBMK GBWR	Rusia	16	11.404
FBR	Francia, Rusia	2	690
	TOTAL	439	372.208

De los 36 reactores nucleares en construcción, 27 son del tipo PWR, 2 del tipo BWR, 4 del tipo PHWR, 2 del tipo FBR y 1 del tipo LWR.⁴¹

2.2.3. Clasificación de Reactores Nucleoeléctricos

Más allá de la descripción de los diferentes tipos de reactores realizada en el apartado anterior, se ha convenido 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 generación comenzaron a operar desde 1954.

³⁹ Graphite-moderated Boiling Water Reactor: Reactor BWR moderado con grafito

⁴⁰ Nuclear Power Reactors in The World, IAEA, Vienna, 2008

⁴¹ <http://www.iaea.org/programmes/a2/>

A partir de la experiencia adquirida operando los reactores de la Generación I, 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. Como fecha de inicio de esta segunda etapa, la de los reactores de Generación II, puede establecerse el año 1970.

El proceso de investigación y desarrollo sobre centrales nucleares se enlenteció hacia fines de la década de los 80 cuando se redujo el crecimiento de la energía nucleoelectrónica mundial, demorando así la aparición de la Generación III. Esta generación comprende reactores cuyas características de operación, seguridad y gestión del combustible en el núcleo han mejorado sustancialmente respecto de la Generación II, incorporando avances tecnológicos y economías de escala con respecto a los diseños de Generación II. Como fecha de inicio de la operación de los reactores de Generación III podría establecerse el año 1995. La Generación III+ presenta algunas mejoras respecto a la Generación III, sobre todo en lo atinente a 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 a construir tendrán seguramente reactores de diseños evolutivos a partir de los sistemas ya probados, es decir de Generación III y III+.

A más largo plazo la atención estaría centrada en los diseños innovadores, es decir, en 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, 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 20-30 años.

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. Entre los reactores de Generación III se encuentran:

- **ABWR** (Advanced Boiling Water Reactor: BWR Avanzado) que ha sido el primer reactor de Generación III. Desarrollado por General Electric (GE), Hitachi Ltd. y Toshiba Corp. y tiene potencias del orden de los 1300 MW.
- **AP600** (Advanced Passive 600: reactor Pasivo Avanzado), reactor tipo PWR diseñado por Westinghouse con una potencia de 600MW.
- **System 80+**, reactor tipo PWR desarrollado por ABB y constituye la base de los reactores **APR1400** (Advanced Power Reactor) desarrollados por la República de Corea en cooperación con Estados Unidos.

Por otro lado, algunos ejemplos de reactores de Generación III+ son los siguientes:

- **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 1600MW. 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 1000 MW.

- **ESBWR** (Economic Simplified BWR o European Simplified BWR) desarrollado por General Electric e Hitachi Nuclear Energy con una potencia de unos 1500 MW. Aún no se encuentra ninguno instalado.
- **ACR Series** (Advanced Candu Reactor) con potencias de 700 MW y 1200 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 de diseño es 100 años. Se desconoce el estado de avance del diseño.

Por otra parte, existe otra clasificación de reactores no ya en cuanto a su tecnología sino 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 decena⁴².

Como se analizará en el capítulo 9, el tamaño adecuado para un reactor a instalarse eventualmente en nuestro país sería de no más de 300 a 400 MW. Si bien es técnicamente posible construir reactores de estas potencias, por razones económicas suelen diseñarse reactores de potencia mayor. No existe en la actualidad centrales que se estén ofertando comercialmente fuera de su país de origen y con diseño reciente, con potencias menores a 700 MW. Sin embargo, existe un conjunto importante de reactores pequeños en proceso de desarrollo, de Generaciones III, III+ y IV. Del análisis de la documentación internacional⁴³ y del contacto directo con los desarrolladores, surge que ninguno de ellos debería estar comercialmente disponible antes de 2018 a 2019. Aquellos cuyo estado de avance parece más promisorio resultan 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 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 EEUU y se espera que esta culmine hacia 2015. Asimismo, se estima que el primer reactor comercial estaría disponible hacia 2018 o 2019.

⁴² IAEA- SMR (<http://www.iaea.org/NuclearPower/SMR/#ref02>)

⁴³ Status of innovative small and medium sized reactor designs, 2005. IAEA-TECDOC-1485

- **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 U₂O levemente enriquecido. Un primer prototipo estaría funcionando en 2009, pero no existe fecha estimativa de puesta en funcionamiento de un primer reactor comercial para generar electricidad.
- **CAREM** (Central Argentina de Elementos Modulares). Se trata de un modelo PWR, de 27 o de 300 MW, de diseño argentino cuyo proceso de desarrollo estuvo detenido durante muchos años. Funcionaría con U₂O levemente 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 primer 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 gas helio como sustancia refrigerante. Se trata de un proyecto Sudafricano, aunque con subcontratos con empresas de varios 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, a partir de la década del 2020. Hasta ahora, no se ha podido terminar de comprobar experimentalmente el funcionamiento del diseño. No existe por ahora una fecha de puesta en marcha de un reactor comercial.

A continuación se presenta un listado completo de los proyectos en desarrollo de reactores pequeños y medianos (SMRs) con diseño innovador⁴⁴:

Tabla 2: Reactores innovadores en desarrollo, pequeños y medianos

NOMBRE	PAÍS	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	EEUU	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	LWR	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.

⁴⁴ Ref.: *Status of innovative small and medium sized reactor designs*, 2005. IAEA-TECDOC-1485

NOMBRE	PAÍS	TIPO	POTENCIA (MW)	Opción básica combustible
VK-300 Water cooled and moderated natural circulation BWR	Rusia	BWR	250	U ₂ O enriquecido al 4,4%.
CCR Compact Containment boiling water Reactor	Japón	BWR	300	Ciclo abierto, U ₂ O levemente 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 generaría electricidad, sólo calor.	Ciclo abierto, U ₂ O levemente enriquecido en forma de micropartículas 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	EEUU – 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 FAPIG- High Temperature Gas cooled Reactor	Japón	HTGR	100	Ciclo abierto, U ₂ O, recarga en operación.
ACACIA Advanced atomic cogeneration for industrial applications	Holanda	HTGR	18,1-23,2	Ciclo abierto, U ₂ O, 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 a 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.
Medium Scale Lead-bismuth Cooled Reactor Modular	Japón	Reactor Rápido refrigerado con plomo-bismuto.	710	-
AHTR Advanced High Temperature Reactor	EEUU	No convencional.	300 a 1.200	Ciclo abierto.

2.3 EL CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR

2.3.1. Generalidades

Al igual que el carbón, el petróleo y el gas natural, el uranio es un recurso energético que debe ser sometido a diversos procesos para obtener un combustible eficiente en la generación de energía nucleoelectrónica. El llamado Ciclo de Combustible del Uranio comprende una secuencia de procesos que van desde la minería a la disposición final del combustible quemado (ver Figura 7).

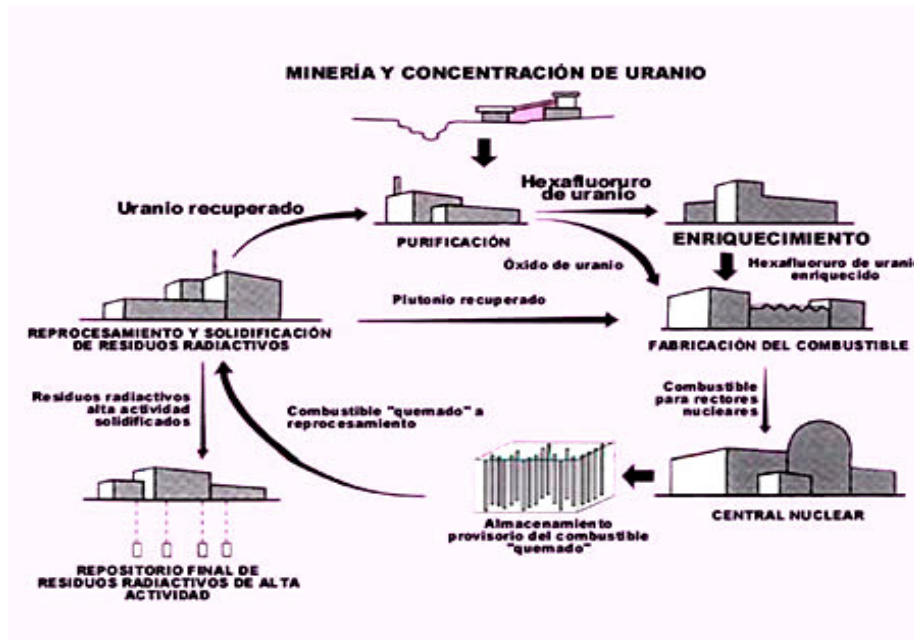


Figura 7: El ciclo del combustible nuclear ⁴⁵

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. Otra característica que hace que el ciclo del combustible nucleoelectrónico sea particularmente delicado es el hecho de que se asemeja al proceso utilizado para la fabricación de armas nucleares.

Al conjunto de procesos del ciclo de combustible previos a su utilización en el reactor se lo denomina *front-end*. Este incluye minería y molienda, tratamientos químicos, refinación, conversión, enriquecimiento y fabricación de pastillas (*pellets*) de dióxido de uranio (UO_2) y de elementos combustibles. Al conjunto de procesos del ciclo de combustible posteriores a su

⁴⁵http://caebis.cnea.gov.ar/IdEN/CONOC_LA_ENERGIA_NUC/CAPITULO_6_Difusion/CICLO_COMB_NUCL/Ciclo_combustible.htm

utilización y extracción del reactor se lo denomina *back-end*. Este incluye almacenamiento transitorio en piletas refrigeradas bajo agua o en instalaciones de almacenamiento seco, reprocesamiento o reciclado del combustible quemado y almacenamiento definitivo.

Se puede hablar de dos tipos de ciclo de combustible:

- El ciclo de combustible abierto, sin reprocesamiento del combustible quemado pero con almacenamiento pendiente de la disposición definitiva.
- El ciclo de combustible cerrado, con reprocesamiento y extracción del uranio y el plutonio presentes. Estos elementos pueden ser reciclados y formar parte de nuevos elementos combustibles.

El uranio es un metal ubicuo en la naturaleza. En el mundo, 43 países declaran tener minas de uranio explotables y la mayoría de las reservas de uranio mundiales se encuentran en países políticamente estables. La Tabla 3 muestra los principales países que poseen reservas probadas de uranio. Las mayores reservas se encuentran en Australia donde se halla casi un cuarto de los yacimientos conocidos y casi el 90% del total de los mismos se ubica en 10 países. Países como Francia, Inglaterra y Japón, fuertes productores de electricidad de origen nuclear, así como los crecientes China y Corea, poseen escasos yacimientos de uranio. Francia, por ejemplo, posee menos del 1% del uranio mundial y sin embargo es la mayor potencia en este rubro. Otros dos actores nucleares relevantes, Rusia y Estados Unidos, poseen respectivamente 10% y 6% de las reservas naturales conocidas. En la región, Brasil ocupa el séptimo lugar mundial de acuerdo al tamaño de sus yacimientos.

Tabla 3: Reservas probadas de uranio en 2007

	Toneladas de uranio	Porcentaje
Australia	1,243,000	23%
Kazakhstan	817,000	15%
Rusia	546,000	10%
Sudáfrica	435,000	8%
Canadá	423,000	8%
USA	342,000	6%
Brasil	278,000	5%
Namibia	275,000	5%
Nigeria	274,000	5%
Ucrania	200,000	4%
Jordania	112,000	2%
Uzbekistán	111,000	2%
India	73,000	1%
China	68,000	1%
Mongolia	62,000	1%
Otros	210,000	4%
Total mundial	5,469,000	100%

El consumo mundial actual de uranio para la generación de energía eléctrica es de unos 67000 toneladas de uranio por año. Por lo tanto, como se desprende de la tabla 2, las reservas probadas de uranio a nivel mundial, con la tecnología actual basada en uranio 235, podrían ser suficientes para abastecer el consumo anual actual durante unos 80 años. Por su parte, las reservas probables ascienden a 7.3 millones de toneladas, con lo que podría abastecerse el consumo anual actual durante otros 100 años⁴⁶.

En la actualidad, la producción efectiva anual de uranio proveniente de las minas es inferior al requerimiento de combustible para los reactores. Como se desprende de la Figura 8, en los últimos años sólo el 60% de la demanda ha sido satisfecha por la producción minera. El resto ha sido obtenido de fuentes secundarias, por ejemplo, combustible obtenido a partir de armas nucleares desmanteladas, inventarios militares y comerciales, reprocesamiento de uranio quemado, etc.⁴⁷

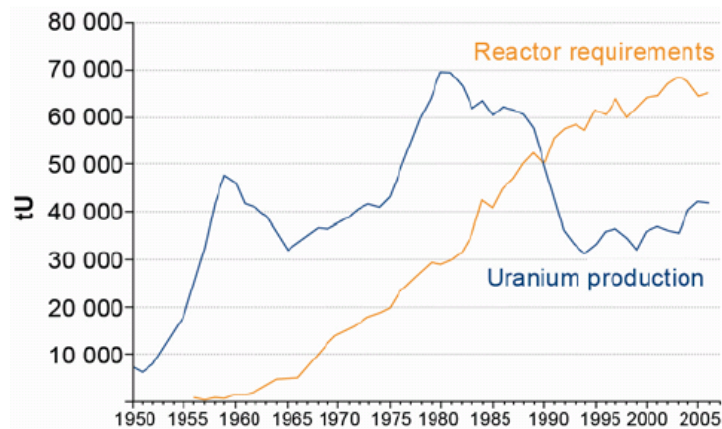


Figura 8: Producción y requerimiento Anual Mundial uranio⁴⁸

Como se observa en la Tabla 4, casi el 60 % de la producción mundial anual de uranio proviene de minas en Canada (23%), Australia (21%) y Kazajstan (16%).⁴⁹


























⁴⁶ "Nuclear technology Review", IAEA 2008.

⁴⁷ http://www.worldenergy.org/documents/ser2007_final_online_version_1.pdf

⁴⁸ 2007 Survey of Energy Resources World Energy Council 2007 *Uranium*

⁴⁹ <http://www.world-nuclear.org/info/inf23.html>

Tabla 4: Producción Mundial de uranio - (Toneladas de U₃O₈)⁵⁰ (actualizado: 11/27/07)

Región	País	2006
Australia	 Australia	8934
	Total	8934
Canada	 Canada	11633
	Total	11633
África Central	 Gabon	0
	 Nigeria	3675
	Total	3675
Ex Unión Soviética	 Kazakhstan	6230
	 Rusia	4011
	 Ucrania	953
	 Uzbekistan	2668
	Total	13857
Europa del Este	 Bulgaria	0
	 Rep. Checa	426
	 Hungría	0
	 Rumania	95
	Total	522
Francia	 Francia	0
Total	0	
Namibia	 Namibia	3616
	Total	3616
Otros	 Argentina	0
	 Bélgica	0
	 Brasil	399
	 China	826
	 Alemania	68
	 India	236
	 Pakistan	27
	 Portugal	0
	 España	0
	Total	1556
Sudafrica	 Sudafrica	631
	Total	631
Estados Unidos	 Estados Unidos	2001
	Total	2001
Gran Total		46425

⁵⁰ Elaborado a partir de datos publicados en <http://www.uxc.com/fuelcycle/uranium/production-uranium.html>

El torio es 3 veces más abundante que el uranio en las rocas terrestres. Una estimación primaria de las reservas conocidas de torio, de precio de extracción de hasta 80 USD/kg, se muestra en la Tabla 5⁵¹.

Tabla 5: Reservas conocidas y estimadas de torio con un precio de extracción de hasta 80 USD/kg

País	Toneladas	Porcentaje (%)
Australia	452 000	18
USA	400 000	16
Turquía	344 000	13
India	319 000	12
Venezuela	300 000	12
Brasil	302 000	12
Noruega	132 000	5
Egipto	100 000	4
Rusia	75 000	3
Groenlandia	54 000	2
Canadá	44 000	2
Sudáfrica	18 000	1
Otros países	33 000	1
Total mundial	2 573 000	

2.3.2. Minería de Uranio

El uranio es extraído del yacimiento por tres procesos básicos: la explotación minera subterránea, la explotación minera a cielo abierto y la lixiviación⁵² *in situ*. Tanto en la modalidad de explotación minera subterránea como a cielo abierto, el mineral extraído se transporta a una usina en la cual se separa el uranio. El proceso de lixiviación *in situ* no requiere del retiro del mineral del predio del yacimiento.

El uranio es luego procesado en una usina en la que se separa del resto de los minerales y se obtiene como producto resultante un concentrado de óxido de uranio (así se conoce en la jerga de la industria al U_3O_8) denominado *torta amarilla*. Este concentrado a su vez se calienta a los efectos de eliminar impurezas y aumentar la concentración de óxido de uranio presente. El óxido de uranio constituye un *commodity* en los mercados internacionales.

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

⁵¹ <http://www.world-nuclear.org/info/inf62.html>

⁵² Lixiviación: Tratamiento de un mineral con un disolvente adecuado para separar sus partes solubles de las insolubles.

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 la rentabilidad. Estas pilas de estériles, que permanecen incluso luego de cerrada la mina, pueden emitir radiación en niveles superiores al natural, liberar gas radón y lixiviar sustancias radiactivas, que terminen 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 es molido y filtrado en molinos de uranio, lo que puede producir las 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, debe tenerse en cuenta que su cierre o el de un molino de uranio requiere cuidados especiales y genera grandes cantidades 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 imputados al uranio, podrían terminar 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 resulta indispensable para la extracción del uranio.

2.3.3. Refinación

El término “refinación” comprende el proceso de purificación del concentrado de óxido de uranio (*torta amarilla*) y su conversión a la forma química requerida para la siguiente etapa del ciclo de combustible. Las formas en las que se presenta el producto refinado pueden ser: uranio metálico, dióxido de uranio (UO₂) o hexafluoruro de uranio (UF₆). El hexafluoruro de uranio es el producto predominante en esta etapa del ciclo y es apropiado para la etapa del enriquecimiento.

Los reactores tipo CANDU usan habitualmente uranio natural o levemente enriquecido como combustible. Para el caso de la utilización de uranio natural no es necesaria la conversión a UF₆. El uranio es purificado y convertido en dióxido o trióxido de uranio. Los reactores Magnox utilizan uranio natural metálico como combustible. Sólo el Reino Unido tiene este tipo de reactores en operación. Existen también usinas que obtienen hexafluoruro de uranio a partir del reprocesamiento de uranio.

2.3.4. Enriquecimiento

En el ámbito de la industria nuclear, el término enriquecimiento refiere al proceso de aumentar la cantidad de uranio 235 contenido en una cantidad unitaria de uranio natural, en la cual el isótopo predominante naturalmente es uranio 238.

Existen actualmente dos tecnologías principales para el enriquecimiento del uranio: la difusión gaseosa y la centrifugación gaseosa. La difusión gaseosa es la tecnología más antigua, la cual parte del uranio bajo la forma de hexafluoruro de uranio gaseoso. Este proceso es intensivo en consumo de energía y requiere de plantas muy grandes para su operación económica. La segunda tecnología más usual para el enriquecimiento es la centrifugación gaseosa. Aquí también el uranio está inicialmente bajo la forma de UF₆ gaseoso. Esta tecnología se puede desarrollar de una manera modular, permitiendo la expansión de la instalación de acuerdo a la demanda. Esencialmente dos compañías utilizan la difusión gaseosa como tecnología de enriquecimiento⁵³.

2.3.5. Fabricación del Combustible

Los elementos combustibles para los reactores nucleares están formados por arreglos geométricos de barras combustibles. Estas barras están compuestas por pastillas (*pellets*) cargados en vainas o tubos.

La materia prima para la fabricación del combustible nuclear para los reactores que utilizan uranio enriquecido, es hexafluoruro de uranio enriquecido en uranio 235 al 2-5%. El hexafluoruro de uranio es convertido en polvo de dióxido de uranio, dándole la forma de pastillas (*pellets*), sinterizadas⁵⁴ para lograr la densidad y dimensiones requeridas, y cargados en vainas o tubos de Zircaloy o de acero inoxidable, los que se sellan en ambos extremos.

En los reactores que utilizan uranio enriquecido y que pueden quemar combustible reciclado también se puede utilizar combustible tipo MOX (Mixed Oxide). Este combustible consiste de

⁵³ Country Nuclear Fuel Profiles, Tech. Rep. N° 425, IAEA, Vienna 2005. (http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS425_web.pdf)

⁵⁴ Sinterizar: producir piezas de gran resistencia y dureza calentando, sin llegar a la temperatura de fusión, conglomerados de polvo, generalmente metálicos, a los que se ha modelado por presión

una mezcla de óxido de uranio y plutonio. Hasta un 96% del MOX se obtiene de reciclar combustible quemado en plantas de reprocesamiento. Como en el combustible quemado la cantidad de uranio 235 ha disminuido significativamente, el MOX está empobrecido en uranio 235 (el MOX posee un 93% en peso de óxido de uranio empobrecido). El rol del uranio 235 lo tiene ahora el plutonio 239, que es el elemento fisible de este combustible (un 7% en peso de óxido de plutonio). Su fabricación requiere el uso de instalaciones específicas ya que se debe controlar la radiotoxicidad del plutonio así como también satisfacer los requerimientos de seguridad radiológica.

En el caso de la fabricación de combustible para los reactores que utilizan uranio natural, la materia prima es óxido de uranio (U_3O_8) y las vainas o tubos en las cuales se cargan los pellets son siempre de Zircaloy y no de acero inoxidable, dado que cuando se utiliza uranio natural, es más importante aún minimizar las capturas parásitas de neutrones en los materiales estructurales.

2.3.6. Gestión del Combustible Quemado

El 96% del combustible que ha sido quemado en un reactor nuclear está constituido por uranio 238 y plutonio, ambos materiales fértiles que pueden transformarse a su vez en el combustible de futuras centrales nucleares.

En los inicios de la industria nuclear de generación eléctrica se asumía que el combustible quemado sería reprocesado y que el uranio y el plutonio recuperados serían reciclados. Los motivos de tal presunción eran el vertiginoso crecimiento esperado para la energía nuclear y la escasez de recursos probados de uranio.

Sin embargo, con el enlentecimiento del ritmo de incorporación de centrales, el descubrimiento de nuevas minas de uranio y el uso de materiales fisiles provenientes del desmantelamiento de armamento nuclear, ha habido poca presión para reciclar.

La tecnología de reprocesamiento está disponible y probada. Varios países han decidido implementarla en el marco de sus planes nucleares. Por este motivo muchos países están dilatando la decisión acerca de la deposición final de los residuos.

La gestión de los residuos se describe con mayor detalle en el capítulo 5 del informe.

2.3.7. Transporte

El ciclo de combustible nuclear involucra también el transporte, 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, siguiendo protocolos de seguridad muy estrictos y bajo el control 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 importantes incendios. Para mayor seguridad, en la actualidad, cada contenedor posee un emisor satelital que permite que sea rastreado en todo momento.

2.4 ASPECTOS ECONÓMICOS Y COMERCIALES

Los diversos aspectos de la industria nuclear descritos anteriormente tienen asociados mercados vinculados a países y proveedores diferentes. Interesa destacar que gran cantidad de las empresas en estos mercados se relacionan comercialmente entre sí.⁵⁵

Gran parte de las principales empresas vinculadas a la industria nuclear en la década 1980-1990 se han mantenido hasta la fecha en este mercado. Algunas de ellas han experimentado modificaciones comerciales. Entre ellas se encuentran Siemens y Framatome (Framatome NP – Areva NP), Mitsubishi, Westinghouse, Toshiba, General Electric, Hitachi, AEP, AECL.

Proveedores de reactores⁵⁶

El mercado de proveedores de reactores se encuentra concentrado en algunos pocos proveedores. Los tres principales son Areva, GE-Hitachi y Westinghouse-Toshiba. Otros proveedores importantes son Atomstroyexport (Rusia), AECL (Canadá) y KOPEC (Corea).

Mercado de Combustible

Como se ha mencionado anteriormente el combustible utilizado en los reactores nucleares requiere de la materia prima, el uranio, su refinación o conversión, su enriquecimiento (para los reactores que así lo requieren) y la fabricación del elemento combustible. Cada una de estas etapas presenta mercados complejos, variedad de proveedores y de países donde se realizan las mismas. Nuestros países vecinos, tanto Argentina como Brasil, poseen reservas de uranio y fabrican el combustible para su consumo.

La mitad de las reservas mundiales conocidas de uranio se concentra en tres países. Igualmente, más de la mitad de la producción mundial de uranio actual se concentra en tres países. Como se observa en la Tabla 6, casi el 85% de la producción de uranio proveniente de minas se concentra en siete proveedores.⁵⁷

⁵⁵ Examen de la tecnología nuclear 2008. Informe del Director General, IAEA, Quincuagésima segunda reunión ordinaria, 15 de junio de 2008. http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC52/GC52InfDocuments/Spanish/gc52inf-3_sp.pdf

⁵⁶ WNA Nuclear Energy Index- (http://wna.snetglobalindexes.com/industry_information/11/Reactors.html)








⁵⁷ Elaborado a partir de datos publicados en <http://www.world-nuclear.org/info/inf23.html>

Tabla 6:

Compañía (país, localización mina)	Producción mundial (%)
Cameco (Canadá)	19
Río Tinto (Australia, Namibia)	17
Areva (Nigeria, Canadá)	15
KazAtomProm (Kazajstán)	12
ARMZ (Rusia)	8
BHP Billiton (Australia)	8
Navoi (Uzbekistán)	6
Uranium One (Kazajstán)	2
GA/ Heathgate (Australia)	2
Otros	12
TOTAL	100%

En el mercado de uranio enriquecido como combustible, la conversión a hexafluoruro de uranio se concentra en plantas localizadas en 5 países. En la Tabla 7 se presenta la capacidad nominal de conversión de estas plantas.⁵⁸

Tabla 7: Capacidad nominal de conversión (datos de setiembre de 2005)









<i>Empresa (País)</i>	<i>Capacidad nominal anual Millones de kgU</i>
BNFL (UK) 	6.0
Cameco (Canadá) 	12.5*
CNNC (China) 	1.0
Comurhex (Francia) 	14.0
ConverDyn (USA) 	14.0
IPEN (Brasil) 	0.1
Minatom (Rusia) 	22.0
Total	69.6
<i>* Cameco también produce 2800 toneladas de UO₂ y 2000 como metal.</i>	

Las principales plantas comerciales de enriquecimiento se encuentran en Rusia, Francia, Estados Unidos, Alemania, Reino Unido, Holanda, Japón y China. La capacidad de enriquecimiento y la tecnología utilizada para el proceso se presenta en la Tabla 8⁵⁹.

⁵⁸ Fuente: <http://www.uxc.com/fuelcycle/conversion/capacity-conversion.html>

⁵⁹ Elaborado a partir de datos en <http://www.uxc.com/fuelcycle/enrichment/capacity-enrichment.html>

Tabla 8: Capacidades mundiales de enriquecimiento de uranio (datos de setiembre de 2005)

<i>Empresa (País)</i>	<i>Porcentaje de la capacidad mundial</i>	<i>Tecnología</i>
CNNC (China) 	2%	Difusión gaseosa & Centrifugación
Eurodif (Francia) 	23%	Difusión gaseosa
JNC (Japón) 	2%	Centrifugación
Minatom (Rusia) 	42%	Centrifugación
Urenco (Alemania) 	15%	Centrifugación
Urenco (Holanda) 		
Urenco (UK) 		
USEC (USA) 	16%	Difusión gaseosa

Existen también usinas que obtienen hexafluoruro de uranio a partir del reprocesamiento en Francia y en el Reino Unido.

El 90% de la capacidad de fabricación de combustible para la mayoría de los reactores operativos, se concentra en seis proveedores y los países con las mayores capacidades son EEUU, Rusia, Kazajistán, Japón, Francia y Alemania.

Cabe destacar que la capacidad de fabricación de este combustible supera los requerimientos, siendo del orden del doble de los mismos.

En la Tabla 9 se observan las principales plantas de fabricación de combustible para los LWR y los principales proveedores que son JSC TVEL (Rusia), Framatome ANP (Francia, EEUU, Alemania y Bélgica), Ulba Metallurgical Company (Kazajistán), Westinghouse (EEUU) y GNF (EEUU y Japón).

Tabla 9: Fabricación comercial de combustible para reactores LWR⁶⁰

<i>Empresa (país)</i>	<i>Porcentaje de la capacidad mundial</i>
Framatome ANP (Bélgica) Framatome ANP (Francia) Framatome ANP (Alemania) Framatome ANP (EEUU)	25,5%
INB (Brasil)	2%
CNNC (China)	1%
JSC TVEL (Russia)	18%
GNF(EEUU) GNF (Japón)	13%
ENUSA (España)	3%
Ulba Metallurgical Company (Kazajistán)	14%
Westinghouse (EEUU) Westinghouse (Suecia)	13%
NFC (India)	0,5%
KNFC (Korea)	3%
NFI (Japan)	4%
MNF (Japón)	3%

En el mercado de uranio natural como combustible, la conversión a dióxido o trióxido de uranio (UO₂ o UO₃) se realiza en Canadá, Argentina, China, India y Rumania. En estos cuatro últimos países también se fabrica el agua pesada.⁶¹ En la Tabla 10 se observan las principales plantas de fabricación de combustible para los PHWR y los principales proveedores del mismo.

⁶⁰ Elaborado a partir de datos de IAEA-Country Nuclear Fuel Profiles (http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS425_web.pdf)

⁶¹ IAEA-Country Nuclear Fuel Profiles (http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS425_web.pdf)

Tabla 10: Fabricación comercial de combustible para reactores PHWR:62

<i>Empresa (país)</i>	<i>Porcentaje de la capacidad mundial</i>
GE Canada Inc (Canada)	46%
Zircastec Precision Industries Inc. (Canada)	27,5%
CNEA (Argentina)	3%
CNNC (China)	4%
NFC (India)	10%
KNFC (Corea)	7%
PAEC (Paquistán)	0,5%
NNPC (Rumania)	2%

Una planta nuclear típica PWR, que utiliza como combustible uranio enriquecido y que corresponde a la mayoría de los reactores operativos en el mundo, con una potencia de 1000 MW requiere anualmente unas 200 toneladas de óxido uranio (U_3O_8), lo que corresponde a unas 170 toneladas de uranio y a 25 toneladas de elemento combustible para su operación.⁶³

El costo total del combustible utilizado en una planta nuclear se compone de los diferentes costos de cada etapa del ciclo de combustible. El peso relativo de cada una de las etapas en el costo total del combustible a utilizar en la planta varía según se consideren precios del uranio correspondientes al mercado spot o al de contratos y de las condiciones comerciales que se hayan adoptado para las distintas etapas de procesamiento. No obstante, para ejemplificar, puede mencionarse que en una planta PWR, aproximadamente la mitad del costo total del combustible a utilizar corresponde al costo de enriquecimiento y fabricación del combustible y la otra mitad al óxido de uranio y su conversión a hexafluoruro de uranio.^{64 65}

En la Figura 9 se presenta la evolución del precio spot del óxido de uranio⁶⁶ durante la última década.

⁶² Elaborado a partir de datos de IAEA-Country Nuclear Fuel Profiles (http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS425_web.pdf)

⁶³ WNA- (<http://www.world-nuclear.org/education/nfc.htm>)

⁶⁴ WNA- (<http://www.world-nuclear.org/education/nfc.htm>)

⁶⁵The Economics of nuclear power (<http://www.world-nuclear.org/info/inf02.html>)

⁶⁶ <http://www.world-nuclear.org/info/inf22.html>

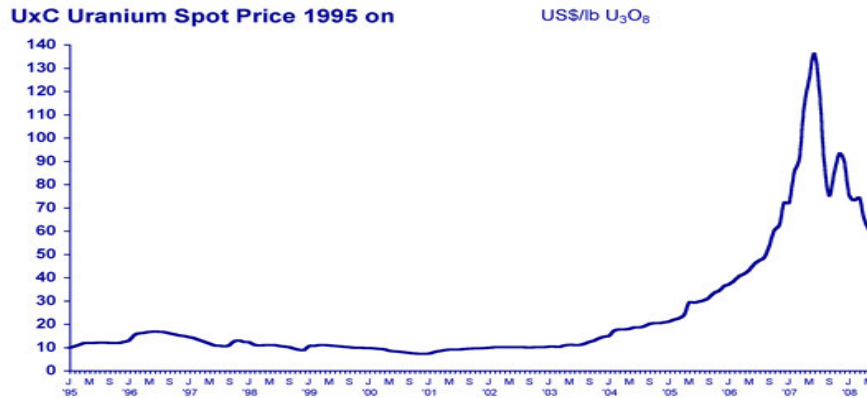


Figura 9: Evolución del precio spot del óxido de uranio 1995-2008

El precio del óxido de uranio ha aumentado con un factor no menor a siete en los últimos ocho años⁶⁷ en el mercado spot mientras que en el mercado de contratos de medio y largo plazo, donde se comercializa la mayor parte de éste, se incrementaron en menos de un 50%.⁶⁸

Los países que poseen centrales nucleares y que no poseen uranio en su territorio suelen firmar contratos de largo plazo para el abastecimiento del mismo. En varios casos (por ejemplo España o Japón), la reglamentación nacional exige que las compañías que operen las centrales tengan comprado el uranio necesario para fabricar el combustible para toda la vida útil de la planta. Asimismo, varios países hacen acopio físico del combustible para varios años de funcionamiento de sus plantas.

⁶⁷ <http://www.uxc.com>

⁶⁸ http://www.worldenergy.org/documents/ser2007_final_online_version_1.pdf

CAPÍTULO 3 LOS EFECTOS DE LA RADIATIVIDAD

La mayor parte de la radiación recibida por el hombre es debida a fuentes de origen natural y es por lo tanto una realidad inseparable de nuestras vidas. Sumado a ello el hombre ha logrado obtener en laboratorios fuentes de radiactividad, aprendiendo a utilizarla en diferentes campos como la medicina, la industria, la agricultura, etc., así como en reactores para generar electricidad.

En dosis elevadas, la radiactividad tiene un efecto negativo sobre los seres vivos.

3.1 LA RADIACIÓN RECIBIDA POR LOS SERES VIVOS

Los seres vivos recibimos radiación ionizante de diversas fuentes, tanto naturales, como creadas por el hombre. La cantidad y tipo de radiación recibida y el impacto sobre los tejidos se mide en unidades llamadas Sievert (Sv); suele utilizarse frecuentemente su submúltiplo el mSv (mili Sv).

Comenzando por la radiación natural, los principales contribuyentes a la radiación de fondo son la radiación gamma de la corteza terrestre y la radiación cósmica, como forma de irradiación externa. Parte de esta radiación proviene de la cadena de desintegración del uranio 238 existente en la corteza. Por otro lado, la radiación contenida en los alimentos que ingerimos y el gas radón que inhalamos, producto del decaimiento de radionucleidos naturales, representan una forma de irradiación interna. La dosis media anual recibida por la población mundial debida a todas las fuentes de origen natural es de 2,4 mSv. Este nivel de radiación se conoce como radiación media ambiente. Los valores se muestran en la Figura 10.

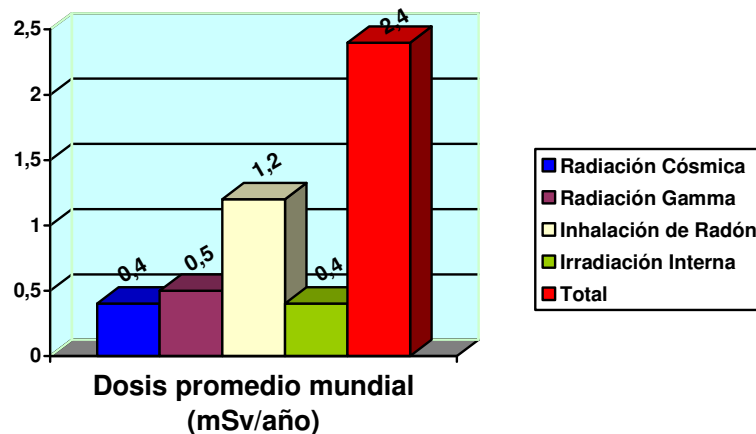


Figura 10: Dosis anual media recibida por la población mundial debido a fuentes naturales⁶⁹

⁶⁹ UNSCEAR, Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica, VOL.1, Informe del año 2000 para las Naciones Unidas

En cuanto a la utilización de fuentes de radiación creadas por el hombre, éstas comprenden, entre otras, el diagnóstico médico mediante el uso de los rayos X y gamma, el uso de los rayos X y gamma (gammagrafía) en la industria, el uso de fuentes radiactivas abiertas en medicina nuclear y de trazadores en hidrología. El ser humano también está sometido actualmente a la llamada precipitación radiactiva debida a los ensayos de armas nucleares en la atmósfera que ocurrieran en décadas pasadas (principalmente en los 50 y 60)^{70,71}.

El UNSCEAR (Comité científico de las Naciones Unidas para el estudio de los efectos de las radiaciones atómicas) ha determinado una dosis media anual total, incluyendo fuentes naturales y artificiales, de aproximadamente 2,8 mSv por año y por persona⁷².

Como se desprende de la Figura 11, las radiaciones emitidas por las centrales nucleares representan menos de la diezmilésima parte de la dosis de radiactividad normal que recibe un ser humano promedio. En cuanto a la radiación recibida por un ciudadano medio debido al accidente de Chernobyl, esta representa la milésima parte de la radiactividad ambiente y es menos de la mitad de lo que recibimos debido la precipitación radiactiva originada durante los ensayos de bombas nucleares.

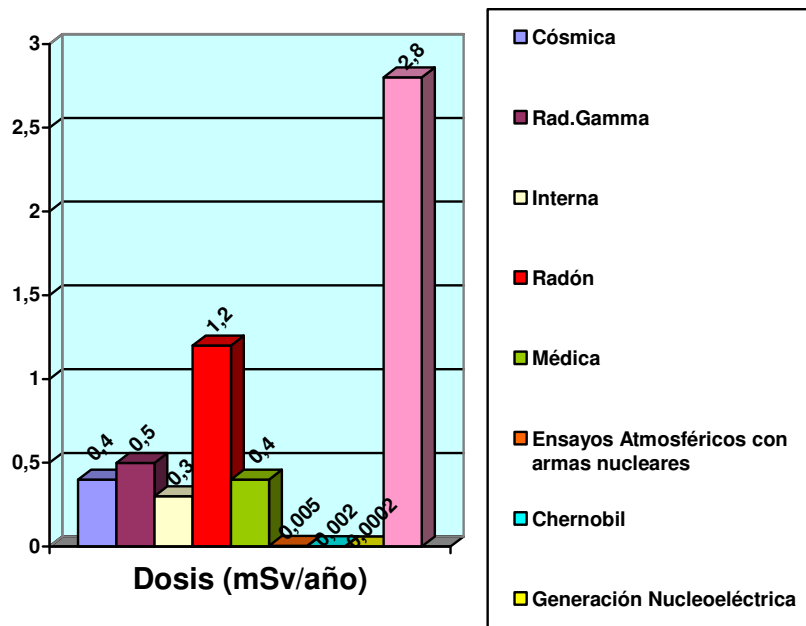


Figura 11: Dosis media recibida por la población mundial de acuerdo al origen

⁷⁰ Beninson, D.; Touzet, R.; Menossi, C.A. Congreso Argentino de Biología, San Miguel de Tucumán, Argentina, 9-13 abril 1973.

⁷¹ UNSCEAR, op. Cit.

⁷² UNSCEAR, Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica, VOL.1, Informe del año 2000 para las Naciones Unidas

Tanto la Comisión Internacional de RadioProtección (ICRP) en su documento No.60, como la Norma Básica de Seguridad, Colección de Seguridad No 115 del OIEA (NBS) establecen determinados valores límites aceptables para el trabajo con radiaciones ionizantes; así por ejemplo para el trabajador ocupacionalmente expuesto se establece un límite de 20 mSv por año o un promedio de 100 mSv al cabo de 5 años. Uruguay ha adoptado como válidos estos límites y son los que rigen las prácticas con equipos y fuentes radiactivos en todo el país.

El UNSCEAR ha establecido valores mundiales promedio de dosis ocupacionales usuales⁷³, es decir de dosis recibidas por trabajadores en diferentes áreas debidas a radiación ionizante. Algunos de estos valores se muestran en la Figura 12.

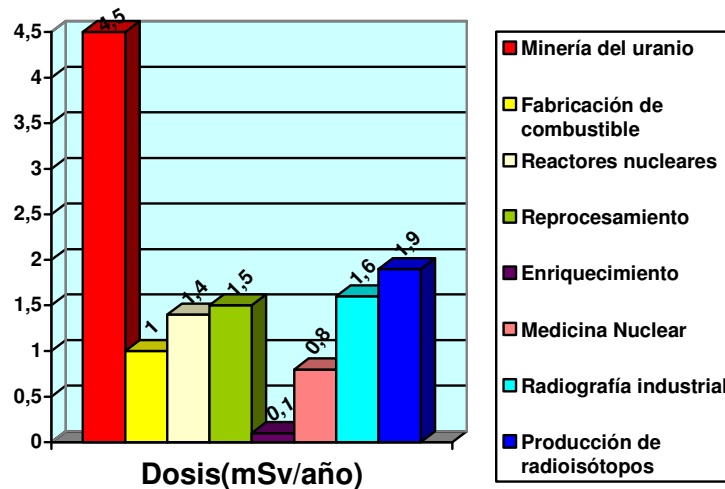


Figura 12: Dosis ocupacionales usuales, de acuerdo a la actividad del trabajador

3.2 EMISIONES DE RADIATIVIDAD DEBIDO A LA INDUSTRIA NUCLEOELÉCTRICA

Como consecuencia de las actividades nucleoelectricas son liberados al ambiente cantidades controladas y autorizadas por el organismo regulador de cada país de una serie de elementos radiactivos artificiales en diferentes formas, sean estos líquidos, gaseoso o material particulado. Como la emisión de estos radioisótopos es muy baja y por tanto la exposición al ser humano también, se deben utilizar modelos de transferencia al ambiente para calcular las dosis recibidas. El UNSCEAR ha determinado⁷⁴ las dosis recibidas por el público más expuesto de cada tipo de emisión, durante las diferentes etapas de la generación nucleoelectrica. En la figura que sigue se muestran las dosis recibidas en mSv por año. Como podemos observar, las emisiones de radiactividad de una central nuclear no superan la milésima parte de la radiación natural usual

⁷³ UNSCEAR, op. cit.

⁷⁴ UNSCEAR, op. cit.

mientras que durante el reprocesamiento del combustible usado, que se describe en el capítulo 5, las emisiones son del orden de la décima parte de la radiación media ambiente.

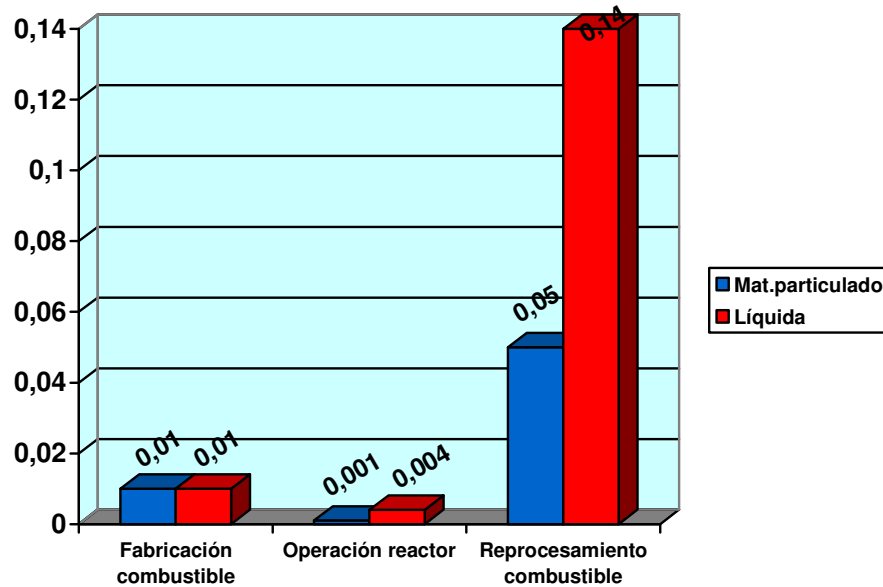


Figura 13: Dosis recibidas por personas más expuestas, en las diferentes etapas de la industria nuclear (mSv/ año)

3.3 EFECTOS NOCIVOS DE LA RADIACIÓN SOBRE LOS SERES VIVOS

La radiación se clasifica en ionizante y no ionizante, según el efecto que produce en la materia. La radiación ionizante incluye los rayos X, gamma y neutrones, partículas alfa y beta con energía suficiente para romper enlaces moleculares y producir efectos biológicos en el ser humano. La radiación no ionizante comprende a la luz ultravioleta, ondas de teléfonos móviles, ondas de radio, televisión, corriente continua, microondas, capaz de producir efectos fotoquímicos, calentamiento, etc.

Se define como dosis absorbida a la cantidad de energía absorbida en un punto por unidad de masa, según el ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements: Comisión Internacional de Unidades y Medidas de la Radiación). Se expresa en grays (Gy): 1 gray es igual a una energía de 1 julio absorbida por 1 kg de materia. La dosis absorbida por un órgano se obtiene promediando las dosis absorbidas en diversos puntos, según la definición de la ICRP (International Commission on Radiological Protection: Comisión Internacional de Protección Radiológica).

Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes son la consecuencia de un número importante de fenómenos físicos, químicos y biológicos, cuya consecuencia principal es la

ruptura de la cadena del ADN celular (Acido Desoxirribonucleico). Sin embargo, dosis débiles de radiación, no resultan nocivas para los tejidos, debido fundamentalmente a que el organismo posee mecanismos auto-reparadores. Altas dosis pueden producir modificaciones genéticas o muerte celular masiva, causando daños biológicos. Sólo dosis muy importantes, superiores a 1000 mSv, producen daños biológicos de manera determinística. Es decir, personas que han recibido dosis superiores al umbral de 1000 mSv y en un corto lapso, seguramente sufrirán algún tipo de trastorno que exija la intervención de un médico. La radiación natural es aproximadamente un milésimo de este valor umbral. En cambio, cuando el organismo recibe dosis importantes pero inferiores a 1000 mSv o cuando la dosis es absorbida en un tiempo largo, la ocurrencia del daño biológico es sólo probabilística. Esto significa que una persona que ha recibido estas dosis solo tiene una cierta probabilidad de enfermarse como consecuencia de la radiación. Para estas dosis no ocurre muerte celular inmediata, sino una probabilidad de que, debido a lesiones en las cadenas de ADN, alguna célula desarrolle, en el largo plazo, un proceso canceroso. Analizando un número muy grande de personas irradiadas, ha sido posible determinar cuál es esta probabilidad. Si un ser humano recibe una dosis de 600 mSv, tienen una probabilidad de 3% de contraer cáncer. Este proceso puede ocurrir muchos años después de haber recibido dicha radiación. También ha podido determinarse que esta probabilidad decrece proporcionalmente con la dosis recibida. Por ejemplo, si la dosis recibida fuera la mitad, unos 300 mSv, la probabilidad de contraer cáncer disminuye a 1.5%. Asimismo, se ha podido comprobar que esta disminución lineal ocurre hasta dosis del orden de un centenar de mSv: para esta dosis, la probabilidad de desarrollar un cáncer es del orden de 0.5%. Por debajo, no existe un número suficiente de casos estudiados como para extraer conclusiones científicas válidas.

CAPÍTULO 4 SEGURIDAD NUCLEAR

Como se indicara en el capítulo anterior, la presencia de una fuente radiactiva en la vecindad de un ser vivo podría, potencialmente y en ausencia de medidas de seguridad y protección, dar lugar a la exposición a la radiación y, por ende, tener consecuencias negativas para su salud. Por dicha razón, la tecnología nuclear diseña sus componentes, sistemas, estructuras y procedimientos de forma tal de mantener bajo control permanentemente todos los productos radiactivos.

La seguridad nuclear se refiere a la protección de seres vivos y el ambiente contra riesgos de radiación, así como a la seguridad física de las instalaciones y actividades que dan lugar a esos riesgos de radiación. Comprende tanto riesgos bajo circunstancias normales de operación como riesgos debidos a incidentes u otras posibles consecuencias directas de la pérdida de control de una fuente radiactiva, o del funcionamiento indebido de un reactor u otra instalación nuclear. La seguridad nuclear incluye aspectos de operación de instalaciones, transporte y gestión de materiales radiactivos (fuentes, combustible, residuos, etc.).

En este capítulo se define en primera instancia los dos elementos esenciales de la seguridad nuclear: la radiológica y la física. Luego se describen los principales sistemas de control de las centrales nucleares, sus sistemas de seguridad radiológica, así como las prevenciones y contramedidas en caso de un evento imprevisto. Más adelante se explica la clasificación de los incidentes y accidentes nucleares y se describen los más relevantes. Por último, se enuncian las principales lecciones aprendidas de estos accidentes.

4.1 SEGURIDAD NUCLEAR RADIOLÓGICA Y FÍSICA

La Seguridad Nuclear Radiológica (Safety en inglés) vela por condiciones apropiadas de funcionamiento de instalaciones y prevención de accidentes o mitigación de sus consecuencias, dando como resultado la protección de trabajadores, público y ambiente contra riesgos por radiación. Tiene que ver con actividades que involucran material radiactivo. Incluye la identificación de eventos precursores de accidentes y recomendaciones para evitar los mismos, así como las acciones para mitigar sus consecuencias en caso que ocurrieran. Se utiliza análisis estadístico y sus resultados se presentan en forma de recomendaciones.

La Seguridad Nuclear Física (Security en inglés) se refiere a la prevención, detección y respuesta ante acciones delictivas tales como: robo, sabotaje, acceso no autorizado, transporte ilegal o cualquier otra acción maligna que involucre material nuclear, sustancias radiactivas o sus instalaciones asociadas. Tiene que ver con evitar, detectar o responder a acciones no autorizadas o maliciosas que involucren material radiactivo; se utiliza análisis de riesgo y sus resultados son confidenciales. Las consecuencias radiológicas del delito son consideradas dentro de la Seguridad Radiológica.

La Seguridad Radiológica y la Seguridad Física deben ser diseñadas e implementadas de manera integrada para que las medidas de una no comprometan a la otra y viceversa, dado que ambas consideran aspectos tales como: el diseño y construcción de fuentes radiactivas, su

categorización y gestión, el diseño y construcción de instalaciones nucleares, el control de acceso a las mismas, los planes de emergencia y la gestión de residuos.

4.2 SISTEMAS DE CONTROL DE REACTORES NUCLEARES

Un reactor “seguro” es uno capaz de auto-estabilizarse (controlarse) dentro de ciertos límites. Estos límites deben abarcar las condiciones de operación normal, incluyendo los transitorios asociados con la operación y una buena parte de las contingencias que es razonable esperar.

En los reactores nucleares hay dos tipos de mecanismos de control:

- Mecanismos activos, con alto grado de redundancia, similares a los que poseen otros sistemas de la ingeniería, en las que se controla la salida del sistema (que en este caso es la potencia térmica producida) utilizando sensores para suministrar información al sistema de control actuante (barras de control que absorben neutrones sin producir fisiones) y corregir la perturbación indeseable.
- Mecanismos pasivos, que actúan con independencia de los otros y tienden por sí mismos a corregir las perturbaciones desestabilizadoras. Por ejemplo, en un reactor refrigerado y moderado con agua, un aumento brusco en la potencia térmica induce un aumento en la temperatura. Este aumento en la temperatura induce a su vez una disminución en la densidad del moderador. Si el reactor está bien diseñado, este aumento de temperatura disminuye la reactividad, y la disminución en la reactividad, si es suficiente, tiende a su vez a disminuir la potencia, estabilizándola. No obstante, como muchas veces los mecanismos pasivos de estabilización no son suficientes para regresar la potencia a su valor inicial, o bien se desea variar la potencia por alguna razón, es necesario recurrir a los mecanismos activos de control.

Los nuevos modelos de reactores incorporan un avance significativo en la seguridad por la concepción e implementación de diversos mecanismos pasivos de seguridad: estos operan siempre que sea necesario porque son el resultado de las leyes naturales, a diferencia de los mecanismos activos de defensa, es decir, de los sistemas de sensores, controladores y actuadores, los que requieren de un suministro especial de energía para poder operar. Los mecanismos de seguridad pasivos operan siempre.

4.3 SISTEMAS DE SEGURIDAD RADIOLÓGICA DE REACTORES NUCLEARES

El objetivo de los Sistemas de Seguridad, implementados desde la fase de diseño y continuados durante la construcción, el montaje y la operación de los reactores nucleares, es impedir una liberación de radionucleidos que pudieran afectar la salud de los operadores de la planta, del público en general y el ambiente.

Para ello se utiliza una estrategia de tres niveles:

- Prevención de la ocurrencia de sucesos que pudieran dañar los elementos combustibles o cualquier otro sistema del núcleo del reactor por medio de condiciones de operación

inherentemente estables, márgenes de seguridad mecánicos y térmicos, estructuras y componentes confiables y de propiedades bien conocidas, etc.

- Protección mediante sistemas que interrumpen la reacción en cadena si se produce un evento que puede dañar el combustible y dar lugar a la liberación de productos de fisión en el interior del recipiente del reactor.
- Mitigación mediante sistemas que limitan las consecuencias de posibles accidentes, en caso de que ocurran.

Todo lo anterior se acompaña de un sistema de barreras físicas que separan al material nuclear del los operadores de la planta, del público en general y del ambiente. El objetivo de estas barreras es prevenir cualquier liberación de radiactividad al ambiente, tanto en operación normal como durante incidentes o accidentes. Cada una de ellas incluye a todas las que le preceden y actúa en caso de que todas las barreras previas hubieran fallado.

La primera barrera la constituye el propio combustible nuclear, material cerámico de elevado punto de fusión en forma de *pellets* o esferas, que son capaces de retener los productos de fisión. Sólo atraviesan esta primera barrera las partículas ionizantes, esencialmente neutrones.

La segunda barrera la constituye el tubo metálico sellado, vaina, que alberga a esos *pellets* y cuyo arreglo/conjunto constituye al elemento combustible.

La tercera barrera la constituye el propio recipiente de presión (el cual contiene los elementos combustibles, los canales de circulación del refrigerante, los elementos estructurales de medición y de control), cuya resistencia mecánica le permite soportar presiones y gradientes térmicos considerablemente mayores a los asociados con la operación normal, evitando que se liberen al ambiente productos radiactivos.

La cuarta barrera la constituye el edificio o estructura de contención del reactor, que retiene la radiactividad ante fallas eventuales de las barreras anteriores. Esta cubierta de acero y hormigón, de más de 1 m de espesor, contiene al recipiente de presión, a los dispositivos de control y seguridad, a las bombas de circulación (refrigerante, moderador), a los intercambiadores de calor, y protege al personal contra radiación directa. Como veremos más adelante, el reactor que generó el accidente de Chernobyl carecía de esta cuarta barrera.

La confiabilidad de cada barrera es muy alta y la probabilidad que todas ellas fallen simultáneamente y den lugar a una liberación de material radiactivo es muy baja. En la Figura 14 se esquematizan esas barreras.

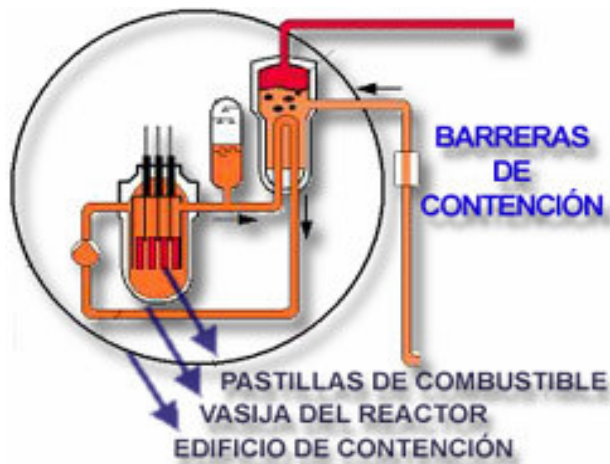


Figura 14: Esquema de las barreras de seguridad física de una central nuclear tipo PWR

4.4 MECANISMOS DE PREVENCIÓN Y CONTRAMEDIDAS

En esta sección se describen los mecanismos de prevención en caso de accidentes, así como las contramedidas a poner en marcha.

En primer lugar se determinan las llamadas “vías críticas de exposición”: una vez determinadas las posibles descargas de la instalación en caso del peor accidente y las características del entorno y de la región donde se emplazará la central, se determina el modelo de exposición al que podrá estar sometida la población del lugar, así como cuáles serían los nucleidos que producirían el mayor aporte de dosis y el camino crítico, es decir la vía de exposición que producirá la mayor dosis.

A modo de ejemplo, si ocurriera una descarga de material radiactivo a la atmósfera, las vías de exposición del ser humano a la radiación se podrían describir de la siguiente forma:

- A medida que la nube o penacho radiactivo se dispersa y es transportada por el viento, las dos vías principales de exposición son la irradiación externa por el material contenido en la nube y la irradiación interna por inhalación de dicho material.
- Los nucleidos se empiezan a depositar sobre el terreno (suelo, vegetales) y cuerpos de agua. Esto trae como resultado otras tres vías de exposición al ser humano: irradiación externa por el material depositado, contaminación interna por inhalación de materiales resuspendidos e irradiación interna por la transferencia de materiales radiactivos a los alimentos y el agua. Finalmente una última vía de exposición puede considerarse a través de la ingestión de productos de consumo como, la carne y la leche de animales que ingirieron vegetales y agua contaminados.

Los principales radioisótopos liberados a la atmósfera como consecuencia de un accidente nuclear son: yodo 131 (^{131}I), cesio 134 (^{134}Cs), cesio 137 (^{137}Cs) y estroncio 90 (^{90}Sr). El yodo 131 puede ser inhalado o consumido por leche contaminada e impacta en la glándula tiroides y

puede producir cáncer de tiroides en la población afectada. Por otro lado el cesio 137 y el Estroncio 90 se comportan metabólicamente como el calcio y el potasio, entrando en el organismo y sustituyendo a los mencionados elementos naturales.

A partir del estudio de las vías críticas de exposición, se determinan las llamadas “contramedidas”, es decir un conjunto de acciones que sería necesario implementar en caso de que ocurra un accidente. Éstas podrían abordarse en conjunto o individualmente.

Algunas de dichas acciones pueden ser de aplicación automática, en caso de riesgo inminente de liberación de material radiactivo al ambiente, mientras que otras serían de aplicación luego de mediciones de campo y con el fin de minimizar las dosis integradas a largo plazo.

Algunos ejemplos de acciones automáticas pueden ser: control de ingreso y egreso de la zona potencialmente afectada, evacuación preventiva, puesta a cubierta en refugios o permanencia en los hogares, distribución de pastillas de yoduro de potasio con el fin de bloquear la glándula tiroides.

Medidas del segundo tipo pueden ser: la evacuación tardía, la reubicación temporaria o definitiva de los pobladores, la restricción al consumo de alimentos y agua potencialmente contaminados, la restricción de comercialización de leche, verduras, etc., la descontaminación de personas, terreno, vehículos, caminos, edificios, etc.

4.5 CLASIFICACIÓN DE INCIDENTES Y ACCIDENTES

Para suministrar información de una manera simple, tanto a los medios de comunicación como al público, respecto de la gravedad de un determinado evento, en 1989 el OIEA y la Agencia para la Energía Nuclear (AEN) de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) diseñaron la “Escala internacional de Eventos nucleares” (INES, por su sigla en inglés).

La escala INES se aplica a la clasificación de los incidentes y accidentes en instalaciones nucleares civiles y se basa en escalas ya utilizadas en Francia y en Japón. 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 gente y el entorno fuera del lugar de la instalación.

El esquema de las dos páginas siguientes describe los distintos niveles de eventos y presenta algunos ejemplos característicos de cada nivel.

NIVEL DESCRIPTOR		DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
ACCIDENTES	7 ACCIDENTE GRAVE	<ul style="list-style-type: none"> • Liberación de una gran parte del material radiactivo de una instalación grande (por ejemplo, el núcleo de un reactor de potencia). Ello comprendería típicamente una mezcla de productos de fisión radiactivos 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 medio ambiente, como resultado de esa liberación. 	Un único ejemplo: Chernobyl, URSS (actualmente Ucrania), 1986
	6 ACCIDENTE IMPORTANTE	<ul style="list-style-type: none"> • Liberación externa relevante de material radiactivo. 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 ACCIDENTE CON RIESGO FUERA DEL EMPLAZAMIENTO	<p>En un accidente de este nivel se produce al menos una de las siguientes situaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Liberación externa de material radiactivo. Probable puesta en práctica parcial de las contramedidas previstas en los planes para casos de emergencia, a fin de reducir la probabilidad de efectos para 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 radiactividad dentro de la instalación. 	Un único ejemplo en la industria nucleoelectrica: Three Mile Island, Estados Unidos de América, 1979
	4 ACCIDENTE SIN RIESGO SIGNIFICATIVO FUERA DEL EMPLAZAMIENTO	<p>En un accidente de este nivel se produce al menos una de las siguientes situaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Liberación externa de radiactividad que tenga como resultado una dosis al individuo más expuesto fuera del emplazamiento del orden de algunos milisieverts (es decir, del orden de la radiactividad 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 reactor de potencia. • Irradiación de uno o más trabajadores que podría traducirse en una sobreexposición con probabilidad alta de muerte temprana. 	<p>Planta de reelaboración de Windscale, Reino Unido, 1973.</p> <p>Saint Laurent, Francia, 1980.</p> <p>Conjunto crítico de Buenos Aires, Argentina, 1983.</p>

NIVEL DESCRIPTOR		DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
INCIDENTES	3 INCIDENTE IMPORTANTE	<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 radiactividad superior a los límites autorizados que dé por resultado una dosis al individuo más expuesto fuera del emplazamiento del orden de décimas de milisievert (menor que la radiactividad natural). Posiblemente no se requieran medidas de protección fuera del emplazamiento. • 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. 	Central nuclear Vandellós I, España 1989.
	2 INCIDENTE	<p>En un incidente de este nivel se produce al menos una de las 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 trabajador que exceda el límite de dosis anual establecido y/o un suceso que cause la presencia de cantidades significativas de radiactividad en la instalación en zonas no previstas según el diseño y que requiera medidas correctivas. 	Los dos incidentes producidos en España en las centrales nucleares de Trillo, 1992 y Vandellós II, 2004
	1 ANOMALÍA	<ul style="list-style-type: none"> • Se sobrepasa el régimen de explotación autorizado, por fallos en el equipo, error humano o procedimientos inadecuados. Estas anomalías deben distinguirse de las situaciones en que no se sobrepasan los límites ni las condiciones operacionales y que son adecuadamente resueltas de conformidad con procedimientos apropiados. 	Por ejemplo, en las instalaciones nucleares españolas se han producido 42 sucesos de nivel 1 desde que comenzó a aplicarse la escala en 1990
DESVÍOS	0 DEBAJO DE LA ESCALA	<ul style="list-style-type: none"> • Sin significación para la seguridad • Desvíos en que 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 una inspección o chequeo periódico, inserción de barras de control planificada evolucionando normalmente, iniciación espuria de los sistemas de protección sin consecuencias significativas, pérdidas dentro de los límites operacionales, contaminación menor dentro de áreas controladas sin mayores implicancias para la cultura de la seguridad. 	

4.6 LOS ACCIDENTES MÁS RELEVANTES DE LA INDUSTRIA NUCLEOLÉCTRICA

En esta sección se describen los únicos dos accidentes mayores de la industria nucleoelectrónica, los de Three Mile Island, en Estados Unidos y el de Chernobyl, en la ex - Unión Soviética.

4.6.1. *Three Mile Island*

La planta nuclear Three Mile Island está ubicada a 16 km al sudeste de Harrisburg (60.000 habitantes), en el estado de Pennsylvania, EEUU. Esta planta poseía 2 reactores: TMI1 y TMI2. En 1979 se produjo allí el único accidente en la historia de la generación nucleoelectrónica comercial norteamericana.

Este accidente está catalogado dentro de la escala INES como 5.

La unidad accidentada, TMI2, 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 fallas humanas 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.

Si bien el reactor fue destruido 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 que hace a la seguridad. Estos aspectos han sido incorporados como aprendizaje y tenidos en cuenta de ahí en adelante.

Por otro lado, Three Mile Island demostró que una ingeniería adecuada puede evitar que un accidente de estas características tenga consecuencias fuera del predio de la central.

4.6.2. *Chernobyl*

La planta 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 capacidad de 1000 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. Como consecuencia, el reactor 4 resultó completamente destruido y actualmente se encuentra confinado dentro de un sarcófago de concreto para evitar el escape de radiación.

Sin embargo, cabe resaltar que a pesar del accidente, los otros reactores de la planta 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 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 que no eran redundantes (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 estudió 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 2000⁷⁵, así como por los 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 200000 personas que se alternaron durante meses para fabricar el sarcófago alrededor de los restos de la porción afectada de la planta, 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 115000 personas, recibió, en promedio, 10 mSv. Esta dosis es sólo unas 5 veces mayor que la radiactividad natural. Las 270000 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 presenta un informe^{76 77}, realizado por un grupo de trabajo interdisciplinario, 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 50 personas que fallecieron en el momento del accidente, de las 600.000 personas más expuestas, unas 4000 habrían fallecido o podrían fallecer por cáncer originado como consecuencia del accidente. Adicionalmente, dentro de las 6.800.000 personas que recibieron dosis radiactivas superiores al ambiente, otras 5000 podrían fallecer. 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.

⁷⁵ UNSCEAR, Op. Cit.

⁷⁶ <http://chernobyl.undp.org/english/docs/chernobyl.pdf>, “Chernobyl's legacy: health, environmental and socio-economic impacts”, 2005,

⁷⁷ Comunicado de prensa OIEA – Chernóbil: La verdadera escala del accidente – setiembre de 2005

4.7 LAS LECCIONES APRENDIDAS

Los incidentes y accidentes ocurridos a lo largo del tiempo han permitido extraer importantes lecciones y, por ende, generaron profundas modificaciones en las medidas de seguridad. Además de incrementarse la exigencia de barreras físicas adecuadas, las nuevas medidas de “defensa en profundidad”, que intervienen tanto durante el diseño, la construcción, el montaje y la operación de las plantas nucleares, incluyen:

- Mecanismos de “seguridad pasiva”: sistemas que detienen automáticamente el reactor si se produce un evento que pueda generar un accidente y que operan siempre porque son el resultado de las leyes naturales.
- Sistemas de medición con mayor redundancia: varios sensores similares miden las mismas cantidades físicas, como forma de mitigar las eventuales fallas.
- Condiciones de operación del reactor inherentemente estables, mayores márgenes de seguridad mecánicos y térmicos, estructuras y componentes más confiables y de propiedades bien conocidas.
- Cultura de Seguridad Nuclear: sustancial incremento de la formación de los recursos humanos que intervienen en la industria, con mayor énfasis en los aspectos de seguridad.
- Mayores sistemas de contralor cruzados entre países y desde el OIEA.
- Mejores medidas de mitigación mediante sistemas que limitan las consecuencias de posibles accidentes, en caso de que ocurran.

CAPÍTULO 5 LA CUESTIÓN DE LOS RESIDUOS⁷⁸

Todas las etapas del ciclo de combustible producen residuos radiactivos que requieren ser gestionados y dispuestos adecuadamente. En este capítulo se describen las características y las cantidades de residuos producidos a lo largo del proceso nucleoelectrico, así como las posibles estrategias para su tratamiento y disposición final. Una peculiaridad de la industria nucleoelectrica a ser destacada es que ella se hace responsable de la totalidad de los residuos que genera, y por ende internaliza los costos de su gestión, mientras que otras ramas industriales consideran, al menos parte de los costos de la gestión de sus residuos, como externalidades.

5.1 LOS RESIDUOS DE LAS PLANTAS NUCLEARES

Los residuos nucleares se dividen en tres categorías: baja, media y alta actividad⁷⁹. Para el tratamiento de los residuos, también resulta relevante conocer la vida media⁸⁰ de los isótopos radiactivos que los componen. Estas dos características están vinculadas ya que un alto nivel de radiactividad implica la desintegración de un gran número de átomos por unidad de tiempo y por lo tanto una vida media más corta, mientras que una vida media larga requiere que se desintegren pocos átomos por unidad de tiempo y por ende el nivel de radiactividad será bajo.

Los residuos de baja actividad se producen en todas las etapas del ciclo de combustible de la industria nucleoelectrica. Contienen pequeñas cantidades de elementos débil o muy débilmente radiactivos y de corta vida media (no más de unas pocas décadas). Representan el 90% del total del volumen de residuos generados a lo largo de toda la vida útil de una planta nuclear, pero contienen sólo alrededor del 1% del total de la radiactividad. Estos residuos se producen especialmente durante el mantenimiento de la central (herramientas y ropa protectora o filtros irradiados), y durante su desmantelamiento (la mayoría de las partes de una central, luego del fin de su vida útil, caen en esta categoría). La World Nuclear Association⁸¹ estima que una planta de 1.000 MW genera anualmente 100 m³ de residuos de baja actividad. Residuos radiactivos de características similares son también producidos en hospitales, laboratorios y otras ramas de la industria.

Los residuos de media actividad son sustancias de baja o media radiactividad y de mayor vida media (miles de años). Se producen durante la operación del reactor y en el desmantelamiento de las plantas nucleares (aunque sólo un porcentaje menor de una central desmantelada cae en esta categoría de residuos). También se generan en el reprocesamiento del combustible. La

⁷⁸ Este informe ha optado por el término residuos para referirse genéricamente a los resultados no deseados de una actividad, pero cabe aclarar que en la jerga de la industria nuclear se les da el nombre de desechos.

⁷⁹ La actividad es el número de desintegraciones de núcleos radiactivos por unidad de tiempo

⁸⁰ El proceso de desintegración de los núcleos radiactivos es aleatorio. La vida media es el tiempo luego del cual sobreviven la mitad de los núcleos radiactivos que existían inicialmente

⁸¹ <http://www.world-nuclear.org/info/inf60.html>

World Nuclear Association, estima que el mantenimiento de una planta de 1.000 MW genera, cada año, 0,5 m³ de residuos de este tipo.

Los residuos de alta intensidad son indudablemente los que presentan el mayor desafío. Contienen los residuos más altamente radiactivos y de vida media más larga (desde decenas de miles hasta millones de años). Están constituidos esencialmente por el combustible luego de su uso (llamado también “combustible quemado”). La OIEA⁸² reporta valores que muestran que, en promedio, una instalación de 1.000 MW genera anualmente entre 30 y 50 toneladas de metales pesados (TMP) como residuos del combustible, lo que representa, para reactores de agua liviana, un volumen entre 12 y 20 m³ al año.

Si consideramos una central nuclear que produjera 22 toneladas de residuos de combustible, entre ellos se encuentran, aproximadamente, casi 22 toneladas de uranio, 200 kilos de plutonio, 13 kilos de actínidos menores, y 50 kilos de productos radiactivos de la fisión del uranio 235. Cabe destacar que, como el plutonio puede ser utilizado para construir armas nucleares, su manejo es muy delicado, e implica satisfacer los controles y las salvaguardas previstas por Naciones Unidas.

Por otra parte, el desmantelamiento de una planta nuclear genera, como ya se indicara, residuos de baja, media y alta actividad. Los residuos de baja actividad y de vida media corta representan, en promedio y de acuerdo a los datos de la OIEA⁶, unas 5.000 a 6.000 toneladas (lo que puede estimarse⁸³ que implica 3.500 a 4.000 m³). Por su parte, los residuos de media y alta actividad representan unas 1.000 toneladas (700 m³). A continuación describimos el tratamiento que se le da a los diferentes tipos de residuos.

5.2 EL TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS

La razón principal para separar los residuos nucleares en diferentes categorías es que su tratamiento y, fundamentalmente, su disposición final, depende de esa categoría.

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 durante 2 o 3 siglos. Existen numerosos estudios y abundante experiencia que indica que este es un procedimiento seguro y que la forma en que se ha diseñado esta doble trampa para las sustancias radiactivas de esta categoría puede resistir sin dificultad durante este lapso. Como se ha señalado más arriba, esto es, esencialmente, lo que se hace en todo el mundo, desde hace varias décadas, por ejemplo, con algunos residuos hospitalarios radiactivos.

⁸² Op.cit IAEA-TECDOC-1591

⁸³ Asumiendo una densidad media aparente de los residuos del desmantelamiento de 1,4 T/m³.

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 mucho 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 manejar el calor que liberan. Esto se debe a que el combustible usado contiene algunas sustancias de corta vida media y de alta radiactividad. Por ello, antes de pasar a la etapa siguiente, es necesario permitir que 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 de 100.000 años o mayores. Los 10.000 primeros años son los críticos, ya que finalizado este plazo sólo subsisten sustancias de vida media muy larga y por lo tanto de baja radiactividad.

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 planta.

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 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 curio, todos ellos altamente tóxicos y con una larga vida media. Tanto el uranio 238 como el plutonio, es decir el 96% 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, Francia a partir del reciclado de los residuos se obtiene la sustancia denominada MOX, que es a su vez utilizada como combustible de algunas de sus centrales.

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 los 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 OIEA⁸⁴, 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 planta de 1.000 MW pueda llevar a un volumen de 15m³ de residuos vitrificados de alta actividad.

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 han resuelto disponer el “combustible quemado” sin reciclar. También existen países que no han resuelto aún el camino a seguir.

Como ya se indicara, 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.

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 técnicas y 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 100.000 años o más a sólo 200 o 300, que son lapsos semejantes a los de almacenamiento de los residuos nucleares hospitalarios y de otras ramas industriales.

⁸⁴Según la OIEA, op.cit. IAEA-TECDOC-1591

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. La idea predominante hoy es el almacenamiento definitivo en un recinto a ubicarse en capas geológicas profundas, estables y secas, el que luego se sellaría de tal forma que el hombre no podría 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 irreversible garantice el confinamiento del material radiactivo por 100.000 años o más, 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 remanentes luego 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 previsiones 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.

En resumen, en la actualidad, cada año se almacenan en el mundo decenas de toneladas de residuos de alta actividad, ya sea en piscinas o en depósitos transitorios secos, a la espera de una definición sobre un tratamiento definitivo.

CAPÍTULO 6 EL CONTRALOR DE LA INDUSTRIA NUCLEAR

La industria nuclear es una de las más controladas del mundo. Esto se logra mediante tres mecanismos principales: la exigencia por parte de la comunidad internacional de que cada país que cuente con centrales nucleares posea una Autoridad Reguladora Nuclear Nacional, estatal, fuerte e independiente de la industria local e internacional; un conjunto de tratados y protocolos internacionales; y, las acciones y recomendaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica. En la actualidad, todos los países del mundo reciben fuertes presiones para seguir los lineamientos que se describen en este capítulo.

6.1 LA AUTORIDAD REGULADORA NUCLEAR NACIONAL

Un elemento fundamental de todo marco nacional aceptable para el desarrollo de la energía nuclear es la creación y el mantenimiento de una Autoridad Reguladora Nuclear Nacional. La misma debe estar dotada de la competencia legal y técnica necesaria para velar por que los explotadores de instalaciones nucleares y los usuarios de materiales nucleares lleven a cabo sus actividades con seguridad tecnológica y física.

La Autoridad Reguladora debe estructurarse de forma que pueda desempeñar sus funciones con independencia, manteniendo una estructura y un tamaño adecuados a la extensión y naturaleza de las instalaciones y actividades que debe regular. Asimismo, es importante que se asegure que disponga de recursos suficientes: personal, recursos económicos, instalaciones físicas, acceso a tecnologías de la información y servicios de apoyo, entre otros. Una Autoridad Reguladora puede no ser totalmente autosuficiente, especialmente en materia técnica, para desempeñar algunas funciones de revisión y evaluación, concesión de licencias, e inspección. En ese caso, las normas deben facultarlo para obtener asesoramiento o asistencia de fuentes externas, asegurando que quienes lo proporcionan sean efectivamente independientes del explotador o titular de la licencia. Hay que subrayar que este apoyo de fuentes externas no releva a la Autoridad Reguladora de su responsabilidad al adoptar las decisiones.

La importancia del concepto de independencia de la Autoridad Reguladora está reconocida en documentos como la Convención sobre Seguridad Nuclear⁸⁵ de Naciones Unidas. Esta establece la necesidad de que cada Estado establezca las medidas adecuadas para velar por una separación efectiva entre las funciones reguladoras de la Autoridad Reguladora 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 o de residuos radiactivos. Dos elementos cruciales para asegurar esa independencia de la Autoridad

⁸⁵ <http://www.parlamento.gub.uy/htmlstat/pl/convenciones/conv17588.htm>

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 recomendadas por 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 emprendimientos nucleares, y sancionar las desviaciones del desempeño previsto. En función de ello, la consideración principal al establecer una Autoridad Reguladora es que posea los atributos necesarios para aplicar correctamente las leyes y reglamentos nacionales destinados a cumplir esas funciones, resultando en 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 Conjunta⁸⁶, a saber: reglamentación, concesión de licencias, inspección y evaluación y coerción. Existe una quinta categoría, a la que no se refieren las convenciones referidas pero que la mayoría de los organismos reguladores consideran esencial, que es la información al público en general y a las partes interesadas, sobre actividades reguladas por la Autoridad.

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 establecer 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 aplicación de la Convención sobre Seguridad Nuclear y de la Convención Conjunta ya referidas, las que prohíben explotar instalaciones nucleares o de gestión de residuos radiactivos sin contar con la autorización correspondiente por la Autoridad Reguladora Nuclear Nacional.

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 están debidamente protegidos, y que la seguridad tecnológica esté garantizada. Para ello requiere tener acceso irrestricto a los emplazamientos y las instalaciones donde se utilice tecnología y materiales nucleares, tener la capacidad para exigir de los explotadores toda la información necesaria, así como que realicen las evaluaciones, reevaluaciones y revisiones periódicas de seguridad durante la vida útil de las instalaciones. Además, la Autoridad Reguladora podrá también llevar adelante una serie de

⁸⁶ Convención conjunta sobre seguridad en la gestión del combustible gastado y sobre seguridad en la gestión de desechos radiactivos (<http://www-ns.iaea.org/conventions/waste-jointconvention.htm>)

actividades ciertamente importantes 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 y exámenes médicos, y monitoreos en el área de no proliferación nuclear, entre otros.

El cuarto grupo de funciones apunta a forzar el cumplimiento de las disposiciones aplicables y de lo estipulado en las licencias. La Autoridad Reguladora debe tener la capacidad para imponer multas y otras sanciones -como suspensión, modificación o revocación de las licencias- ante los 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 radiactiva 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 los materiales y las 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 interesados a los que hay que incorporar al proceso de toma de decisiones sobre energía nuclear.

La Autoridad Reguladora Nuclear Nacional debe estar en estrecho contacto y coordinada con las de otros países. La producción de energía nuclear se ha convertido en una actividad mundial. Es importante ser consciente de ello, no sólo por los posibles efectos transfronterizos en materia de salud, seguridad tecnológica y medio ambiente en caso de un accidente, 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.). Asimismo, la Autoridad Reguladora debe mantener contacto con las organizaciones internacionales a fin de promover la cooperación y el intercambio de información en materia de regulación.

6.2 EL MARCO JURÍDICO NACIONAL⁸⁷

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

⁸⁷ Esta sección está basada en el libro "Manual de Derecho Nuclear" del OIEA, Stoiber, Baer, Pelzer y Tonhauser, Viena 2006.

Una característica esencial de las normas jurídicas sobre energía nuclear es prestar atención al concepto de riesgo-beneficio derivado del uso de dicha tecnología. Dependiendo de las actividades nucleares que cada país decida autorizar, la explotación de la tecnología nuclear puede suponer la aplicación de multitud de leyes relacionadas con otras materias, tales como protección ambiental, seguridad e higiene laboral, planificación del aprovechamiento de la tierra, procedimientos administrativos del estado, la minería, el transporte, exportación e importación de materiales nucleares, la ética pública y la regulación de las tarifas eléctricas, etc.

A continuación se indican los principios particulares del Derecho Nuclear:

- Principio de seguridad tecnológica
- Principio de seguridad física
- Principio de responsabilidad
- Principio de autorización
- Principio de control continuo
- Principio de compensación
- Principio de desarrollo sostenible
- Principio de cumplimiento
- Principio de independencia
- Principio de transparencia
- Principio de cooperación internacional

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 lograr un equilibrio razonable en la formulación de las medidas legales o reguladoras.

Principio de seguridad física: Tanto algunos materiales como la misma tecnología nuclear pueden encauzarse hacia fines no pacíficos, por lo que se precisan medidas jurídicas especiales para impedir que estos materiales y tecnologías se desvíen, tanto accidental como intencionadamente, de sus usos legítimos.

Principio de responsabilidad: La entidad responsable por cumplir con los requisitos exigibles en materia de salud, seguridad tecnológica y física y protección del ambiente es el explotador 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: constructoras, financieras, industriales, Autoridad Reguladora, entre otras. Hay que tener claro que el explotador de la instalación nuclear es el único responsable de un eventual daño nuclear. No puede hacerse responsable a ninguna otra persona, ni exigirse responsabilidad al explotador en virtud de otras disposiciones legales (por

ejemplo, las normas sobre responsabilidad civil). La responsabilidad se canaliza legalmente hacia el explotador de la instalación nuclear exclusivamente. Este concepto es un elemento del derecho de responsabilidad nuclear desconocido en otras ramas del derecho.

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

Principio de control continuo: Después de concedida la licencia de operación para realizar ciertas actividades, el organismo regulador de cada país debe poseer la facultad de controlarlo permanentemente 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 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.

Principio de indemnización: Las medidas preventivas no pueden excluir totalmente la posibilidad de que se produzcan daños a las personas, los bienes y el ambiente. Por ello, el derecho nuclear requerirá que el Estado adopte medidas para asegurar compensaciones adecuadas en caso de accidente nuclear. 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 nucleares, por lo que han aprobado leyes especiales de responsabilidad nuclear. Asimismo, la posibilidad de que se produzcan daños nucleares transfronterizos requiere disponer de un régimen internacional de responsabilidad nuclear.

Principio de desarrollo sostenible: El desarrollo económico y social de una población sólo puede ser “sostenible” si el medio ambiente 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.

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

Principio de independencia: El derecho nuclear debe prever la creación de una Autoridad Reguladora cuyas decisiones en materia de seguridad tecnológica estén libres de interferencias de entidades dedicadas al desarrollo o fomento de la energía nuclear.

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 medio ambiente.

Principio de cooperación internacional: La dimensión internacional de la energía nuclear se basa en varios factores. En primer lugar, en la esfera 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 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 nacionales, 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 materia nuclear. En cuarto lugar, el carácter cada vez más multinacional del sector nuclear involucra frecuentes movimientos transfronterizos de materiales y dispositivos nucleares lo que hace que un control efectivo dependa de la actuación paralela y conjunta de entidades públicas y privadas de los países involucrados.

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 del uso 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 y comprende ciertos materiales y actividades que suponen riesgos excepcionales para la salud humana, la seguridad tecnológica y el medio ambiente, además de riesgos para la seguridad física tanto nacional como internacional.

Para una eventual revisión del marco legal nuclear, un Estado debe 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 largo debate 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 pueden ser tan importantes como la realidad. 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, ONGs 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.

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.

6.3 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 se dieron los pasos necesarios conforme a su ordenamiento jurídico para ratificarlos. A partir de entonces los Estados quedan sujetos a las obligaciones que se establecen en los instrumentos. Luego, eventualmente será necesaria la aprobación por los Estados de las medidas reglamentarias para asegurar la efectividad de las disposiciones, en concordancia con la *Convención sobre Seguridad Nuclear*⁸⁸. Ésta, en el 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 planta y del público
- Seguridad constructiva, licenciamiento y operación de la planta nuclear y facilidades asociadas como planta de fabricación de combustible, disposición de desechos⁸⁹ radiactivos, etc.
- Manejo seguro, transporte y almacenamiento de material nuclear
- Protección del ambiente y mitigación del impacto por el establecimiento de una planta nuclear e instalaciones asociadas

⁸⁸ <http://www.parlamento.gub.uy/htmlstat/pl/convenciones/conv17588.htm>

⁸⁹ En esta sección se usará el término desechos en lugar de residuos, tal como se usa en el resto del presente informe, por ser el que se usa habitualmente en los instrumentos internacionales.

- Responsabilidad por la importación y exportación de material nuclear
- Responsabilidad por la comunicación efectiva en caso de emergencia nuclear con accidente y potencial impacto en el ambiente y en el público
- Responsabilidad civil por daños
- Salvaguardias

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. La “*Convención sobre Seguridad Nuclear*” y la “*Convención conjunta*”⁹⁰ 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 una afectación involuntaria a otro, están obligados a ofrecer su cooperación al Estado afectado para tomar medidas conjuntas de respuesta ante emergencias.

Además, la “*Convención sobre asistencia*”⁹¹ y la “*Convención sobre pronta notificación*”⁹² son instrumentos internacionales cuyo propósito es establecer bases para una respuesta internacional ante emergencias que tenga en cuenta la experiencia del accidente de Chernobyl. Las partes contratantes de la Convención sobre pronta notificación se comprometen a proporcionar información precisa que facilite la organización de contramedidas. La Convención sobre pronta notificación, 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 radiológica. Toda parte contratante puede pedir ayuda a otra, al OIEA o a otras organizaciones internacionales intergubernamentales.

El “*Reglamento de Transporte Seguro de Materiales Radiactivos*”⁹³ del OIEA comprende todas las categorías de materiales radiactivos, desde los de muy baja actividad, como los minerales y

⁹⁰ “Convención conjunta sobre seguridad en la gestión del combustible gastado y sobre seguridad en la gestión de desechos radiactivos”, que entró en vigor en junio de 2001

⁹¹ Convención sobre asistencia en caso de accidente nuclear o emergencia radiológica (http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/Others/Spanish/infcirc336_sp.pdf)

⁹² Convención sobre Pronta Notificación de Accidentes Nucleares (http://www.iaea.org/Publications/Documents/Infcircs/Others/Spanish/infcirc449_sp.pdf)

⁹³ http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1225_web.pdf

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.

La “*Convención Conjunta*” 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 residuos radiactivos se deben eliminar en el Estado que los haya producido. La mayoría de estos Estados consideran además que el que haya producido estos residuos debe encargarse de su disposición final.

Con relación al tema de la responsabilidad civil, se han celebrado los siguientes Convenios Internacionales de Responsabilidad Nuclear Universal (abiertos a todos los Estados):

- *Convención sobre Responsabilidad Civil por Daños Nucleares*, de Viena de 1963. Ésta fue revisada en 1997 y el Protocolo respectivo aún no ha entrado en vigor.
- *Convención sobre Indemnización Suplementaria por Daños Nucleares de 1997*, la que aún no ha entrado en vigor.
- *Protocolo Común relativo a la aplicación de la Convención de Viena y del Convenio de París*, de 1988.

Además, se han celebrado los siguientes Convenios Internacionales de Responsabilidad Nuclear Regionales (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 suplementarias 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.

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 el 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. El “*Código de Conducta sobre Seguridad Tecnológica y Física de las Fuentes Radiactivas*”⁹⁴ resume algunas de las medidas que pueden tomar los Estados respecto de esta cuestión. Desde el punto de vista de la no proliferación, los materiales nucleares que pueden utilizarse para producir dispositivos explosivos nucleares requieren mayores medidas de protección física. Dado que se trata de un tema relevante en la inserción internacional el capítulo 7 tratará este tema con detalle.

Los controles de exportación e importación son también necesarios para que el Estado pueda cumplir la obligación que le impone el Artículo 4 de la “*Convención sobre la Protección Física de los Materiales Nucleares*” (CPFMN) de permitir 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

⁹⁴ http://www.bcn.cl/carpeta_temas/temas_portada.2006-09-07.5139377319/documentos_pdf.2006-09-07.4324473670/archivos_pdf.2006-09-07.4495504021/archivo1

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 que los Estados parte:

- 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;
- 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 al público);
- 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 Salvaguardias
- 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 vinculantes⁹⁵:

- La Infraestructura Legal y Estatal para la seguridad nuclear, radiológica, de los desechos y del transporte (OIEA No. GS-R-1)
- 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.)

6.4 EL ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA

El OIEA es el centro mundial de cooperación en el campo nuclear. Fue creado como la organización “Átomos para la Paz” en 1957 dentro de la familia de Naciones Unidas. El Organismo trabaja en todo el mundo con los 144 Estados miembro y múltiples socios para promover tecnologías nucleares seguras y pacíficas. Es una organización internacional independiente relacionada al sistema de Naciones Unidas, según un Acuerdo Especial. De acuerdo a su Estatuto, el OIEA reporta anualmente a la Asamblea General de las Naciones Unidas y al Consejo de Seguridad ante incumplimientos de las salvaguardias por Estados o en materias relativas a la paz y seguridad internacional.

La Secretaría del OIEA tiene sus oficinas centrales en el Centro Internacional de Viena (Austria). También tiene oficinas de enlace y regionales en Ginebra (Suiza), Nueva York (Estados Unidos de América), Toronto (Canadá) y Tokio (Japón). Asimismo, opera o apoya centros de investigación y laboratorios científicos en Viena y Seibersdorf (Austria), Mónaco y Trieste (Italia). El OIEA está dirigido por un Director General y seis Subdirectores que encabezan los principales departamentos. En la Secretaría del OIEA trabajan 2200 personas entre profesionales de diversas disciplinas y personal de apoyo. El Organismo maneja un presupuesto de más de 280 millones de euros.

La misión del OIEA está guiada por los intereses y las necesidades de los Estados miembro, los planes estratégicos y la visión contenida en los Estatutos del Organismo. Tres áreas de trabajo sostienen la misión del Organismo: Seguridad Física y Tecnológica, Ciencia y Tecnología, y Salvaguardas y Verificación. El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) es el garante final de que todas las buenas prácticas en materia nuclear se cumplan de manera adecuada.

Uruguay es miembro del OIEA desde el año 1963.

⁹⁵ Los códigos corresponden a la documentación del OIEA

CAPÍTULO 7 EL RÉGIMEN DE 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 los físicos: controlada, se tendría una "caldera nuclear" para sustituir a las calderas a llama en las centrales generadoras de potencia eléctrica; descontrolada, se tendría un explosivo mucho más poderoso que los conocidos hasta ese momento, al que después se denominó bomba atómica de fisión o bomba A. Una bomba de fisión efectiva requiere un material enriquecido en uranio 235 o en plutonio 239 en un grado muy elevado (más del 90%), aunque se pueden obtener explosivos menos efectivos pero con un grado menor de enriquecimiento.

Un reactor nuclear de fisión, si no se toman ciertas precauciones durante su diseño, construcción y operación, es potencialmente utilizable como productor de plutonio para uso no pacífico. Su efectividad como tal puede variar mucho, pero es perfectamente posible combinar la tarea de generación de energía eléctrica con la de producir plutonio para bombas A. Por otra parte, una instalación de enriquecimiento que utilice una secuencia de procesos capaces de superar el 20% de enriquecimiento del combustible, e incluso llegar al 90% como puede ser adecuado si se quiere un reactor de núcleo muy compacto (para propulsión de submarinos, por ejemplo), podría usarse también con fines militares. Esto explica la preocupación internacional con los reactores nucleares y con los procesos de enriquecimiento de combustible nuclear.

Esta preocupación ha conducido a la comunidad internacional a prevenir la proliferación de las armas nucleares por medio de las salvaguardias. Las salvaguardias internacionales implementadas por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) son un medio de vital importancia que garantiza que un Estado dé 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 de los usos pacíficos y la disuasión de estos desvíos por el procedimiento de detección temprana de los mismos. A grandes rasgos, las salvaguardias comprenden tres funciones: contabilidad, contención y vigilancia, e inspección.

El principal instrumento internacional es el "Tratado sobre la no proliferación de las armas nucleares" (TNP) de 1968, ratificado por 187 Estados, que se complementa con varios tratados de no proliferación regionales. Éstos 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 Caribe (Tratado de Tlatelolco)⁹⁶, 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 Sudoriental (Tratado de Bangkok), que entró en vigor en 1997;
- Tratado sobre una zona libre de armas nucleares en África (Tratado de Pelindaba).

Algunos documentos básicos del OIEA de los cuales se deriva el tipo de acuerdo de salvaguardias son: INFCIRC/66/Rev.2, INFCIRC/153 e INFCIRC/540 (Corr.).

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). 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 un elemento esencial 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. 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 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.

⁹⁶ <http://www.opanal.org/opanal/Tlatelolco/Tlatelolco-e.htm>

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 mandatorio 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 (Tlatelolco).

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.

Finalmente 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). 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.

PARTE II:

LA OPCIÓN NUCLEOELÉCTRICA EN URUGUAY

A la luz de la información general sobre la industria nucleoelectrica en el mundo presentada en la Parte I, esta segunda parte presenta un primer análisis de distintos aspectos a considerar ante una eventual incorporación de una central nucleoelectrica al parque de generación nacional.

La Parte II está dividida en 3 capítulos. El primero describe el sector eléctrico nacional, su estado actual, la evolución esperada de la demanda y las estrategias de expansión del sistema. El segundo capítulo describe los impactos de la implantación de una central nuclear en el sistema de generación eléctrica del país, con especial énfasis en el análisis del impacto en función del tamaño de la central, incluyendo los efectos inmediatos en caso de salida intempestiva de la central, así como los efectos energéticos y económicos; finalmente, se realiza una primer evaluación comparando los costos de la energía nucleoelectrica en el país en relación a otras dos alternativas fósiles. En el tercer capítulo se presenta una discusión primaria en relación a los principales aspectos que también deben tenerse en cuenta para alcanzar una decisión fundamentada en relación a la opción nucleoelectrica en nuestro país.

CAPÍTULO 8 EL SISTEMA ELÉCTRICO NACIONAL

8.1 SITUACIÓN ACTUAL

El sistema eléctrico uruguayo cuenta con un importante porcentaje de su potencia total instalada basada en centrales hidroeléctricas, del orden de 66%. El 34% restante esencialmente corresponde a generación de origen térmico. En particular, actualmente existen tres centrales de generación hidroeléctricas instaladas sobre el Río Negro: Dr. Gabriel Terra, con una potencia instalada de 152 MW, Baygorria, con una potencia instalada de 108 MW y Palmar, con una potencia instalada de 333 MW. Además, cuenta con la central hidroeléctrica binacional argentino – uruguayo de Salto Grande, instalada sobre el Río Uruguay, con una potencia total instalada de 1890 MW, de los cuales 945 MW corresponden a Uruguay, totalizando 1538 MW de potencia instalada de origen hidráulico en el país⁹⁷.

La generación de origen térmico, que alcanza 790 MW, se realiza a partir de la central Battle, con una potencia instalada de 255 MW (50 MW de la 3ª y 4ª Unidades, 80 MW de la 5ª Unidad y 125 MW de la 6ª Unidad), la central La Tablada, con una potencia instalada de 212 MW, la central Punta del Tigre, con una potencia instalada de 300 MW y la turbina de Maldonado, con una potencia instalada de 20 MW. También existen grupos diesel autónomos que totalizan una potencia de 3 MW.

En los últimos años, el país ha comenzado a introducir generación distribuida en base a energías renovables no tradicionales: biomasa y energía eólica. En 2007 comenzó a funcionar la empresa Botnia, generando 120 MW mediante residuos del proceso de fabricación de la pulpa de celulosa y entregando hasta 30 MW a la red de UTE. Asimismo, el país tuvo su primera incorporación de energía eólica para la producción de energía eléctrica con la puesta en funcionamiento del parque de Nuevo Manantial, con una potencia nominal instalada de 10 MW.

El sistema de transmisión, según se observa en la Figura 15, está conformado por una columna central de 500 kV que se encuentra interconectada con el sistema de 150 kV que posee un tendido más vasto en el país, no existiendo sistemas aislados.

El sistema de 500 kV básicamente conecta las dos centrales hidráulicas de mayor capacidad instalada, Salto Grande y Palmar, con Montevideo y este del país, donde se concentra del orden del 70% de la demanda de energía eléctrica nacional.

La red de transmisión de Uruguay se encuentra interconectada con las redes eléctricas de los países limítrofes.

Las redes de Uruguay y Argentina se encuentran fuertemente interconectadas a través del cuadrilátero de Salto Grande, conformado por cuatro estaciones de 500 kV (dos del lado uruguayo y dos del lado argentino). Esta interconexión posee una capacidad de intercambio teórica de 2000 MW.

⁹⁷ UTE en cifras 2007

La interconexión entre las redes de Uruguay y de Brasil se realiza a través de una convertidora de frecuencia (50/60 Hz) de 70 MW de capacidad conectada a la red nacional en la estación Rivera de 150 kV.

A excepción de las centrales de Salto Grande y Palmar que se conectan al sistema de transmisión en 500 kV, el resto de las centrales generadoras de gran porte instaladas en Uruguay se encuentran conectadas a la red de 150 kV.

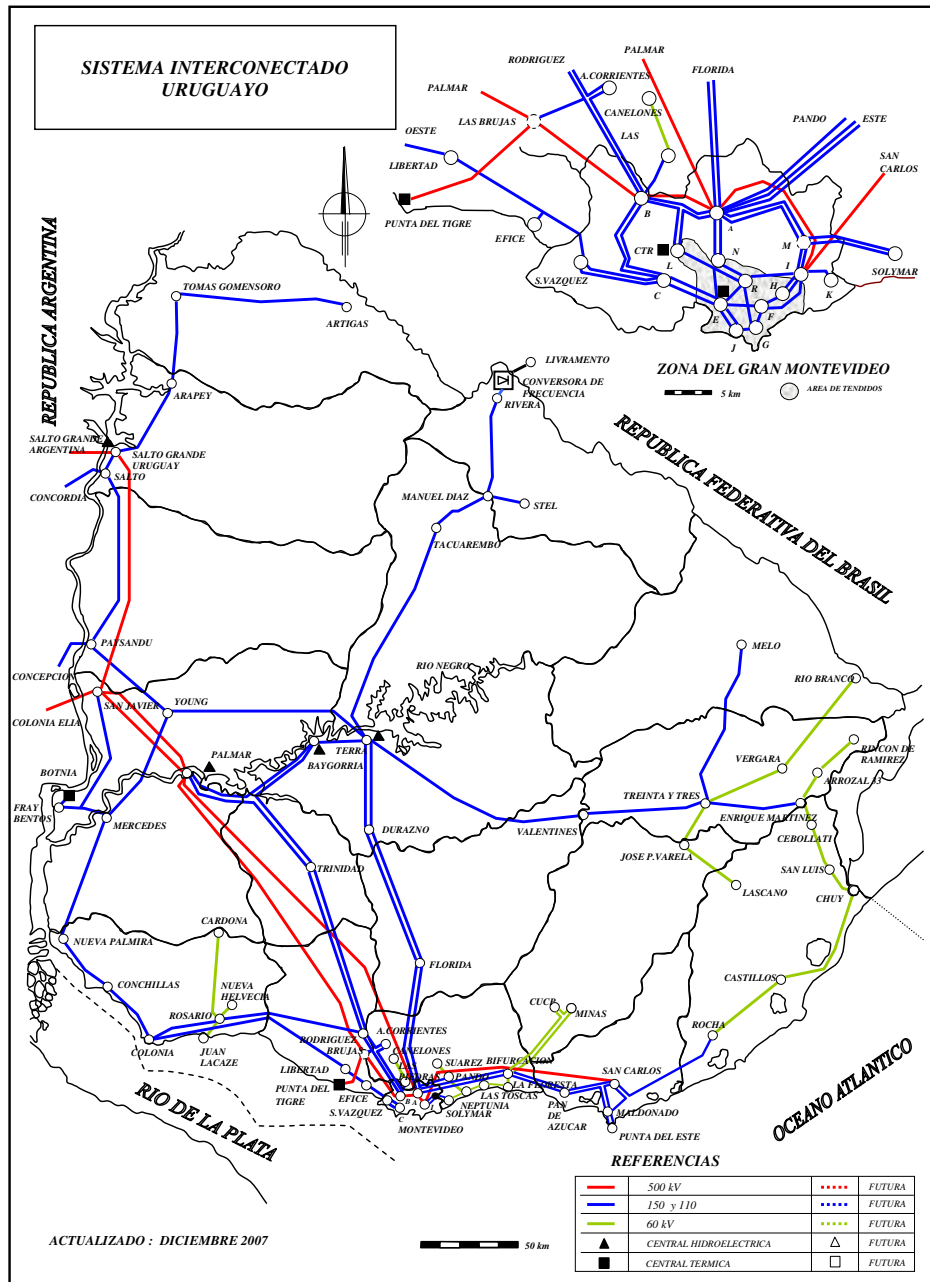


Figura 15: Sistema de transmisión

8.2 EVOLUCIÓN DE LA DEMANDA

La energía total demandada al sistema de generación durante el año 2007 fue de 8881 GWh. Al analizar años anteriores se puede constatar que el monto total de la energía consumida ha registrado caídas asociadas a los fenómenos de crisis por los que ha atravesado el país (como por ejemplo el período 2002-2003) seguidos de períodos de recuperación.

En los últimos 20 años, la tasa promedio de crecimiento anual de la energía fue de aproximadamente 3,2 % y en los últimos cuatro años (2003 – 2007) del 3,6%. A la luz de estos datos en los puntos siguientes de este informe se toman tasas de crecimiento futuro del 3 y 4,5% entre las cuales se estima que se encontrará, con gran probabilidad, la tasa real.

En la Figura 16 se presenta la evolución de la potencia media anual y la potencia máxima anual, demandadas al sistema de generación, desde el año 2000 hasta el año 2007, así como la evolución de estos valores si se consideran tasas de crecimiento del 3 y 4,5% para ambas variables. Se ha supuesto que la relación potencia máxima sobre potencia media se mantiene constante en el futuro, si bien en el pasado ha tenido una tendencia descendente. La potencia media anual es la energía anual dividida la cantidad de horas en el año.

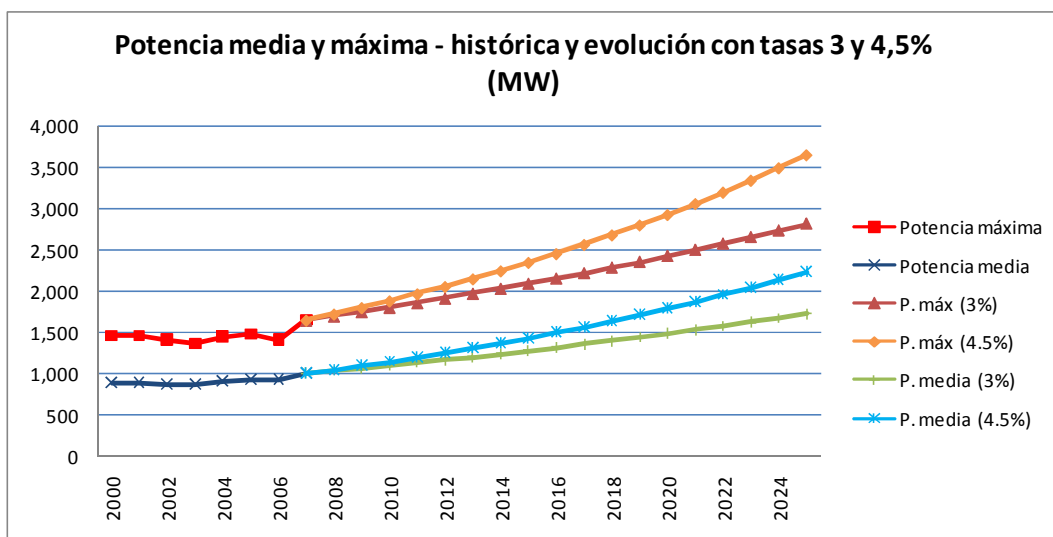


Figura 16: Evolución de la potencia máxima y media anual

A partir de la figura puede concluirse que:

- En el año 2007 el máximo de potencia registrado fue de 1654 MW y la potencia media de 1014 MW.
- Si la tasa de crecimiento fuese del 3%, la potencia máxima demandada en el año 2025 sería de 2816 MW, la potencia media de 1716 MW y la energía 15119 GWh.
- Si la tasa de crecimiento fuese del 4,5%, la potencia máxima demandada en el año 2025 sería de 3653 MW, la potencia media de 2239 MW y la energía 19613 GWh.

8.3 SUMINISTRO DE LA DEMANDA

La Figura 17 muestra la composición de la oferta de energía eléctrica. Se observa la variabilidad de la generación hidráulica que puede tomar valores muy bajos como ocurrió en 2006 debido a la sequía o valores muy altos como en 1998 donde la oferta hidráulica permitió cubrir prácticamente la totalidad de la demanda.

Como consecuencia, no se dispone en todo momento de la potencia instalada de las centrales hidráulicas.

En los últimos 10 años se ha recurrido a las importaciones de los países vecinos, particularmente durante las situaciones de sequía.

Dado que el potencial de grandes proyectos hidroeléctricos ya ha sido aprovechado en nuestro país y que no es prudente depender de manera sistemática de los excedentes de los países vecinos, el crecimiento de la demanda requerirá la construcción de centrales térmicas funcionando en base a combustibles fósiles o que aprovechen recursos renovables no tradicionales.

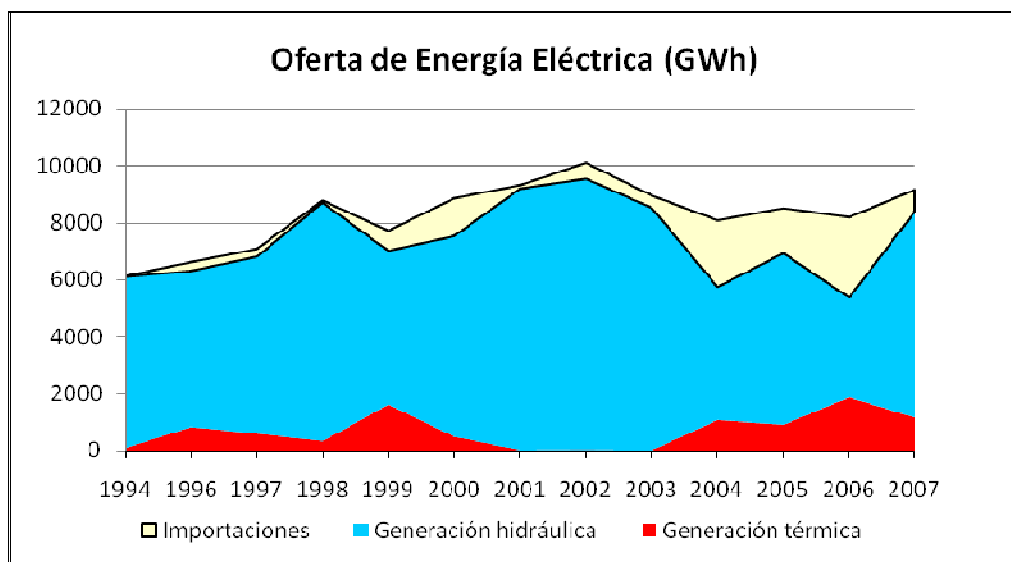


Figura 17: Evolución de la oferta de energía eléctrica

8.4 PERSPECTIVAS DE EXPANSIÓN

Para el corto y mediano plazo existen una serie de proyectos de expansión que se han comenzado a ejecutar o que han sido anunciados. Estos proyectos abarcan tanto el sistema de generación nacional como la infraestructura de sus interconexiones internacionales.

Por un lado, se ha iniciado en el país la incorporación de proyectos de generación en base a recursos renovables como biomasa y energía eólica. En ese marco UTE ha realizado llamados

de compra de energía a generadores privados en los que se prevé que para el 2009 entren en funcionamiento 36 MW y 26.2 MW para el 2011. UTE está en el proceso de construcción de un parque eólico de 10 MW en la Sierra de Caracoles que estaría operativo antes de fin del 2008.

En el mediano plazo (2010 – 2015) se prevé⁹⁸ que se fomente la incorporación de potencia a la matriz eléctrica a partir de fuentes renovables que alcancen los 250 MW a partir de energía eólica y los 200 MW a partir de biomasa.

UTE prevé instalar hasta el 2010 aproximadamente 250 MW en motores reciprocantes capaces de emplear fuel-oil y gas natural, y ya ha lanzado un procedimiento para comprar entre 40 y 80 50 y 80 MW de esa potencia que se espera que estén en funcionamiento en el 2009.

UTE está desarrollando un nuevo proyecto de interconexión con Brasil a partir de una línea de 500 kV que, partiendo de la estación San Carlos en Uruguay, pasando por Melo y mediante una convertidora de frecuencia, permitiría la conexión con la red brasileña en Presidente Médici. Esta obra ampliaría la capacidad de conexión con Brasil en 500 MW. Se estima que este proyecto se encontraría operativo para el año 2011.

En forma conjunta con Argentina, se está desarrollando un proyecto para la construcción de una planta de regasificación con una capacidad de 10 Mm³/día de los cuales hasta 5 Mm³/día se podrían dedicar al consumo local. La fecha de entrada prevista para esta planta se estima para el 2015, aunque se prevé la puesta en funcionamiento de capacidades flotantes para el 2010. La entrada en servicio de este proyecto permitiría disponer de gas natural para la central de Punta del Tigre, los motores que se adquirirán y nuevas centrales que puedan construirse.

⁹⁸ De acuerdo al documento “Líneas estratégicas de desarrollo energético al 2030” - DNETN

CAPÍTULO 9 IMPACTOS DE LA IMPLANTACIÓN DE UNA CENTRAL NUCLEAR EN EL SISTEMA DE GENERACIÓN DE URUGUAY

El objeto de este capítulo es describir cualitativamente los efectos más importantes de la incorporación de una central nuclear al sistema de generación de Uruguay desde el punto de vista eléctrico, energético y económico y señalar algunos de los aspectos que deberían estudiarse con mayor profundidad en caso de continuar el estudio de las perspectivas de la generación nuclear en nuestro país. Este capítulo por lo tanto no pretende constituirse en un estudio de prefactibilidad de un proyecto de ese tipo.

En lo que sigue se analiza: la importancia del tamaño de una central nuclear respecto al tamaño del sistema eléctrico de Uruguay, la conexión de una central nuclear a la red nacional, los efectos inmediatos en la contingencia de salida intempestiva de la central, los efectos de corto y medio plazo de la salida de servicio de la central nuclear, los efectos sobre la planificación energética y la economía del sistema eléctrico en el largo plazo, los aspectos contractuales asociados a la incorporación de una central y los costos de la generación nuclear y de otras fuentes de generación de base.

9.1 LA IMPORTANCIA DEL TAMAÑO DE UNA CENTRAL NUCLEAR RESPECTO AL TAMAÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE URUGUAY

Como ya se mencionó en capítulos anteriores la entrada en servicio de la primera central nuclear en un país de escaso desarrollo industrial y tecnológico requiere un proceso prolongado cuya extensión, de acuerdo a la opinión del OIEA es no menor a quince años⁹⁹. Con este criterio y en caso que se tomase una decisión favorable al respecto en los próximos años, el comienzo de la producción de energía eléctrica a partir de una central nuclear podría tener lugar en Uruguay alrededor del año 2025.

El tamaño de las centrales nucleares efectivamente disponibles en el mercado (es decir su potencia), es un aspecto esencial al analizar su posible empleo en nuestro país. Como se describe más adelante, al aumentar el tamaño de una central por encima de ciertos valores, su incorporación al parque generador uruguayo presentaría dificultades desde el punto de vista económico y energético. Hasta el momento ningún país con un sistema eléctrico del tamaño del de Uruguay ha incorporado una central nuclear.

Asimismo el mayor plazo de maduración del proyecto y plazo de construcción en este tipo de proyectos, puede acentuar estas dificultades.

⁹⁹ "Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power", AIEA (2007), pág.2

Por modelos efectivamente disponibles en el mercado se entiende aquellos producidos por proveedores reconocidos y con amplia experiencia en la construcción de centrales nucleares y de los que existan internacionalmente en el momento de la adquisición, un número suficiente de plantas en operación de manera exitosa.

Si bien es técnicamente posible construir reactores de potencias reducidas, la tendencia hasta el presente ha sido hacia el aumento de la potencia de los reactores comerciales que efectivamente podrían adquirirse a proveedores reconocidos. La mayor parte de los reactores con entrada en operación comercial en los últimos años o que se encuentran en construcción, tienen potencias del orden de 1000 MW o más. No existen en la actualidad centrales que se estén ofertando comercialmente fuera de su país de origen y con diseño reciente, con potencias menores a 700 MW.

No obstante, como se indica en el capítulo 2 de este informe, existen distintos proyectos para desarrollar modelos de centrales de menor potencia, del orden de 300 MW e inferior. No puede afirmarse con certeza en este momento si darán lugar a productos comerciales, ni la fecha en que eso ocurriría, y lo que es igualmente significativo, la fecha en la que acumularán suficiente experiencia de operación como para poder descartar problemas graves en su diseño y construcción.

Los impactos sobre el sistema de una central nuclear serán significativamente distintos según su tamaño:

- Si tiene una potencia de 700 MW o superior, existirían impactos negativos originados en sobrecostos para el sistema de generación y en la concentración de riesgos operativos y económicos, los que se describen más adelante en este capítulo.
- Si tiene una potencia de 300 MW o inferior, esos impactos no serían determinantes.

9.2 CONEXIÓN DE UNA CENTRAL NUCLEAR A LA RED

La entrada en servicio de una central de generación de gran porte como la nuclear requiere de estudios en relación a las posibles localizaciones y eventualmente obras en la red eléctrica asociadas. Las particularidades de su conexión a la red dependerían fundamentalmente del tamaño de la central y no de características particulares de la generación nucleoelectrónica. La ampliación del sistema de 500 kV podría permitir esa conexión.

9.3 LOS EFECTOS INMEDIATOS EN LA CONTINGENCIA DE SALIDA INTEMPESTIVA DE LA CENTRAL

Se considera aquí el efecto inmediato, segundos o minutos, de la salida de servicio intempestiva de la central nuclear a partir de una situación en la que estaría funcionando a plena carga conectada al sistema de 500 kV de Uruguay.

La OIEA recomienda¹⁰⁰ que la potencia de una central de generación cualquiera sea su fuente primaria, no exceda el 10% de la potencia total instalada de generación del sistema eléctrico al cual se conecta.

Esta recomendación no siempre puede ser respetada en sistemas eléctricos de pequeña escala. Esto no se debe a criterios técnicos sino a la no disponibilidad de plantas generadoras de tamaños lo suficientemente pequeños y de costos razonables. En particular, el sistema eléctrico uruguayo ha operado durante algunos períodos con equipos de generación cuya potencia nominal superaba el 10% de su capacidad total instalada.

Como se mencionó en la sección anterior, el sistema eléctrico de Uruguay se encuentra interconectado eléctricamente al sistema de Argentina, cuyo tamaño es del orden de diez veces el de nuestro país en potencia instalada de generación, por dos líneas de 500 kV con una capacidad de transporte total de unos 2000 MW y ambos utilizan la misma frecuencia.

El sistema eléctrico interconectado uruguayo-argentino posee actualmente un gran número de generadores, siendo el módulo de mayor tamaño, el de la central nuclear de Embalse en Argentina de 648 MW. Este módulo corresponde a menos del 2,5% de la potencia total conjunta instalada y del orden de 27% de la correspondiente a la del sistema uruguayo.

La salida de servicio intempestiva de una central que se encuentre generando en un sistema eléctrico, provoca un desbalance entre la oferta y la demanda el cual es necesario recomponer instantáneamente para mantener la estabilidad del sistema.

En la medida en que se lograsen acuerdos con los países vecinos, que permitiesen compartir las reservas operativas de corto plazo, el problema de los efectos inmediatos de la salida de servicio de una central nuclear podría ser resuelto, ya que el sistema eléctrico de Uruguay reaccionaría frente a la salida de servicio de la central en conjunto con el de los países interconectados, de tamaño mucho mayor. En la actualidad esto está ocurriendo.

En particular, considerando que en el sistema integrado ya se encuentra instalado un módulo de 648 MW en Argentina, tamaño similar a los reactores comercialmente disponibles en la actualidad, se estima que los posibles problemas asociados a la estabilidad de la red podrían resolverse.

No obstante, cuanto mayor sea el tamaño de la central nuclear, mayor sería la dependencia respecto a los sistemas interconectados para la conservación de la estabilidad del sistema.

En base a las consideraciones detalladas, las consecuencias de una desconexión intempestiva de la red de una central nuclear, si bien requiere adoptar medidas, no presenta desafíos

¹⁰⁰ OIEA (2007), "Consideraciones para iniciar un programa nucleoelectrico", pagina 2

desconocidos en lo que refiere a mantener el soporte físico o red eléctrica que permite el transporte de la generación hasta el consumo.

9.4 LOS EFECTOS DE CORTO Y MEDIO PLAZO DE LA SALIDA DE SERVICIO DE LA CENTRAL NUCLEAR

Aún cuando se preservase la estabilidad del sistema eléctrico luego de la salida de servicio temporaria de una central nuclear, en caso que la misma no entrase en servicio en el término de pocas horas, podrían aparecer problemas energéticos en los días o semanas siguientes, debido al tamaño de la central. El mismo tipo de problemas podría ocurrir en las paradas programadas para mantenimiento, para reposición de combustible (la mayoría de los reactores actualmente en operación a nivel mundial requieren este tipo de paradas), u originadas en otras causas.

Como se mencionó anteriormente, existe una interconexión fuerte con el sistema argentino y una de mucho menor capacidad con el sistema brasilero. Teniendo en cuenta el avance en el proyecto de la interconexión con Brasil en 500 kV, se prevé que en el horizonte en el que puede entrar en servicio una central nuclear en nuestro país, la misma se encontrará operativa.

Actualmente la energía almacenada en los embalses de las centrales hidroeléctricas y las importaciones desde los países vecinos contribuyen al abastecimiento de la energía eléctrica faltante durante los días o semanas en que se registra alguna indisponibilidad de generación relevante.

Cuanto mayor sea el tamaño de una central nuclear, mayores serían las dificultades y la necesidad de acuerdos de carácter energético con los países vecinos para resolverlas.

9.5 LOS EFECTOS SOBRE LA PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA Y LA ECONOMÍA DEL SISTEMA ELÉCTRICO EN EL LARGO PLAZO

Las decisiones respecto a la incorporación de la energía nuclear en cualquier país deben tomarse considerando un horizonte de análisis de muy largo plazo, de decenas de años, en el que las incertidumbres son muy grandes. En esta sección describimos los impactos derivados del mayor tamaño, plazo de maduración y de construcción de las centrales nucleares, respecto de otras formas de generación.

En el año 2025 probablemente la mayor parte de las centrales térmicas actualmente en servicio o bien habrían salido de operación, o bien en menor grado se mantendrían como reservas de costos variables muy elevados.

Si la tasa de crecimiento de la demanda fuese del 3%, el sistema de generación requeriría la incorporación de aproximadamente 1000 MW de potencia firme, desde el presente hasta el 2025. Si la tasa de crecimiento fuese del 4.5 %, el sistema requeriría aproximadamente 1500 MW de potencia firme.

Las fuentes primarias utilizadas y el momento de incorporación de cada uno de los recursos que compondrían ese parque adicional que debería incorporarse para alcanzar el año 2025, no pueden precisarse hoy con exactitud, ya que dependerán de la evolución de la política energética en respuesta a los determinantes internacionales y locales de precios y disponibilidad de energéticos. Es de esperar que en las adiciones al parque generador se diversifiquen las fuentes primarias, incorporando por ejemplo el carbón, el gas natural licuado, y las energías eólica y de biomasa.

En cualquier caso, los requerimientos de seguridad de abastecimiento y de política energética del país obligarán a adicionar centrales de generación hasta el momento en que podría entrar en servicio una central nuclear, es decir desde el presente hasta el año 2025.

Una central nuclear operaría como central de base, es decir que estaría en funcionamiento siempre que se encontrase disponible, y al máximo de su potencia. Esto se debe tanto a su reducido costo variable como a razones técnicas que hacen inconveniente que tenga variaciones de carga continuas o frecuentes.

Las centrales nucleares operadas en forma adecuada tienen factores de disponibilidad global del orden de 85 % en promedio, es decir no menores a los de otras tecnologías convencionales¹⁰¹.

El impacto del tamaño de una central nuclear, respecto al sistema de generación de Uruguay, puede evidenciarse comparando la cantidad de energía que generaría una central entrando en servicio en 2025 y operando en la base con un factor de utilización del 85%, con el aumento de la demanda de energía en torno a ese año.

Considerando una tasa de crecimiento de la demanda del 3%:

- La energía anual generada por una central nuclear de 300 MW corresponde aproximadamente al aumento de la demanda nacional de 5 años.
- Para una central de 700 MW, al aumento de demanda de 11 años
- Para una central de 1000 MW, al aumento de demanda de 15 años.

Considerando una tasa de crecimiento de la demanda del 4.5%:

- La energía anual generada por una central nuclear de 300 MW corresponde aproximadamente al aumento de la demanda nacional de 3 años.
- Para una central de 700 MW, al aumento de demanda de 6 años
- Para una central de 1000 MW, al aumento de demanda de 9 años.

¹⁰¹ WEC 2007 (World Energy Council)

http://www.worldenergy.org/documents/ser2007_final_online_version_1.pdf

De lo anterior se deduce que la entrada en servicio de una central nuclear de gran tamaño conduciría o bien a subutilizar las centrales que hayan entrado en servicio anteriormente con el fin de proporcionar energía de base, o bien a la aparición de excedentes de energía que deberían colocarse en los mercados de países vecinos. Ambos fenómenos podrían provocar sobrecostos importantes. Los excedentes mencionados se podrían originar si las demás centrales producen energía eléctrica de manera forzada ya sea por las características de la fuente primaria de energía (por ejemplo eólica) o por la existencia de contratos que así lo establezcan.

Como alternativa podría optarse o bien por reducir el ritmo de entrada de nuevos recursos de generación en el período previo a la entrada de la central nuclear, ocasionando mayores riesgos de abastecimiento, o bien que esos recursos fuesen de bajo costo fijo y alto costo variable, lo que también podría implicar sobrecostos.

Cuanto mayor sea el tamaño de la central nuclear, mayores serían los posibles sobrecostos.

Si la central nuclear en nuestro país se desarrolla bajo el supuesto económico de que parte de la energía se exportará de manera firme a los países vecinos, se podrían evitar los sobrecostos debidos al tamaño de la planta. Realizar un proyecto de ese tipo requería del acuerdo de esos países y haría más complejos los contratos de venta de la energía de la central. Otra forma de viabilizar una central de gran porte, sería mediante profundos cambios estructurales en la matriz energética por electrificación de demanda hoy abastecida por otras fuentes.

Una vez decidido un proyecto de generación de gran porte en relación a la potencia instalada de un país se compromete el abastecimiento de gran parte de la demanda futura de energía eléctrica a partir de ese proyecto. En estos casos el cumplimiento de los plazos establecidos para la ejecución del proyecto es crítico dado que un atraso en los mismos estaría comprometiendo el abastecimiento de la demanda futura. De la misma manera, un proyecto como el de una central nuclear, al involucrar largos plazos de maduración y de construcción, otorga rigidez al plan de expansión de la generación pudiendo provocar sobrecostos.

Por otro lado, es necesario estudiar la opción nuclear en el contexto de la posible existencia de fuentes alternativas para generación eléctrica disponibles en nuestro país. Por ejemplo, en caso que se encontrasen yacimientos explotables de gas natural en aguas territoriales de Uruguay, podría resultar conveniente su empleo en la generación de energía eléctrica. Si el país se encontrase en ese momento en el proceso de desarrollo de una central nuclear, posponer o detener dicho desarrollo sería difícil y costoso. Esto plantea una dificultad, dado que sólo dentro de 6 o 7 años se espera tener información completa en relación a la disponibilidad tecnológica y comercial de gas natural propio.

De la misma manera si ocurriese algún evento capaz de cambiar la actitud de la población o autoridades respecto a la generación nuclear, obligando a suspender un proyecto en

construcción, como sucedió en muchos países en 1986 a raíz del accidente de Chernobyl, en la medida en que el proyecto nuclear constituiría una parte muy significativa de las centrales en expansión, se provocaría un perjuicio económico y un riesgo muy grave sobre abastecimiento de la demanda de energía eléctrica.

9.6 LOS ASPECTOS CONTRACTUALES ASOCIADOS A LA INCORPORACIÓN DE UNA CENTRAL NUCLEAR

En un proyecto de instalación, operación y mantenimiento de una central nuclear participan diferentes instituciones, organismos o empresas con distintos roles, entre los que se encuentra, el propietario de la central, el operador de la central, los proveedores de los suministros, la empresa eléctrica que adquiere la energía, el licenciataria, la autoridad reguladora y el Estado.

La construcción de una central nuclear determina la necesidad de delimitar claramente a través de una red de contratos relacionados, las responsabilidades de las partes involucradas. La empresa u organismo propietario de la central deberá realizar contratos para la provisión de los equipos y del combustible, con uno o más proveedores.

El impacto sobre los costos de la energía a generar, y sobre la situación fiscal, sería distinto según la propiedad de la central, pública o privada. En caso que la central fuese propiedad de una empresa u organismo público existente o a crearse, debería preverse el impacto fiscal de una inversión de esa magnitud y las fuentes de financiamiento para una inversión de esa magnitud. Para una central de 700 MW esto implicaría una inversión de aproximadamente 3000 millones de dólares¹⁰², comparable al 50% del presupuesto anual actual del Estado uruguayo. La tasa de retorno relevante para determinar el impacto de la inversión sobre los costos de la energía a generar sería determinada por las autoridades teniendo en cuenta el costo de oportunidad de los fondos públicos. En caso que la central fuese propiedad de una empresa privada, la tasa de retorno relevante para determinar el costo de la energía sería la tasa de retorno del proyecto que requeriría el empresario privado para remunerar los fondos de inversión, dados los riesgos que percibe en el proyecto. En ambos casos la empresa propietaria debería firmar un contrato de largo plazo por la energía con los distribuidores de energía que operen en ese momento. Ese contrato se firmaría con una gran anticipación, por ejemplo del orden de seis u ocho años previo a la fecha de entrada en servicio de la central.

¹⁰²Bajo la hipótesis de un costo unitario de inversión entre 3000 y 5000 USD/kW instalado (ver más adelante), el monto de inversión de una central nuclear de 700 MW estaría entre 2100 y 3500 MUSD, y el de una central de 1000 MW estaría entre 3000 y 5000 MUSD.

En cualquiera de esas dos modalidades, dado el tamaño del sector eléctrico y de la economía del país, la construcción de una central nuclear de gran tamaño implicaría una concentración muy significativa de los riesgos económicos en un solo proyecto.

Un aspecto esencial en todos estos contratos es la distribución de responsabilidades ante los riesgos originados en el proceso de construcción y operación de una central nuclear, especialmente:

- Los riesgos de ocurrencia de sobrecostos y demoras en la construcción de la central
- Los riesgos y responsabilidades asociadas a eventuales accidentes graves, que si bien no han ocurrido con frecuencia en la industria nuclear, están previstos en las convenciones internacionales.

La forma en que se repartan esos riesgos incidirá en el precio final de la energía y de la incertidumbre del mismo.

En cierta medida, las relaciones contractuales descritas anteriormente aparecen en la construcción de cualquier central de generación destinada al servicio público. No obstante, para el caso de una central nuclear, la complejidad en la elaboración de los contratos sería mayor.

9.7 LOS COSTOS DE LA GENERACIÓN NUCLEAR Y DE OTRAS FUENTES DE GENERACIÓN DE BASE

La comparación económica de las distintas alternativas de expansión de la generación debería considerar el efecto de ellas sobre el costo de abastecimiento total de la demanda, en distintos escenarios considerados factibles sobre la evolución de la situación energética mundial y regional, en particular la disponibilidad y costos de los restantes energéticos. No se trata de considerar simplemente los costos unitarios de generación de cada tipo de central, sino evaluar de manera completa el impacto de cada tipo de central sobre los costos totales de expansión del sistema, bajo hipótesis realistas sobre los plazos de desarrollo de los proyectos, períodos de construcción, tamaños e inflexibilidades operativas de las centrales.

En este sentido, es necesario considerar, en primer lugar, los costos totales o unitarios de generación de una central nuclear y de otros tipos de generación de base. En la determinación de los costos de la generación nuclear debe incluirse, junto a los costos de la central y del combustible nuclear, los costos de la infraestructura institucional, autoridad reguladora, y de disposición transitoria y final de los residuos radiactivos que se generan, de acuerdo a los cronogramas en que tendrían lugar.

Por otro lado, debe tenerse en cuenta que la mayor parte del costo de la energía nuclear es un costo fijo resultante de la inversión. Por lo anterior, las incertidumbres y riesgos respecto al costo estarían concentradas en el proceso de construcción y serían reducidas posteriormente, al

menos en tanto los precios del combustible no experimenten aumentos extraordinarios, dada la baja incidencia que el costo del combustible tiene en la ecuación que determina el costo de la energía nucleoelectrica. Por la misma razón, el costo medio de la energía será muy sensible al monto total de la inversión, a la tasa de retorno aplicada y al plazo de construcción:

- El monto total de la inversión se establece luego de negociaciones específicas entre el comprador y la empresa vendedora. En este sentido, precisamente, una de las conclusiones del encuentro organizado por el OIEA "Defining Coordinated Activities Based on the Common Users Considerations for Development and Deployment of Nuclear Power Plants for Developing Countries"¹⁰³ fue que no se encuentra disponible información que permita determinar a priori el precio de una nueva central nuclear, lo que dificulta la comparación de la opción nuclear con otras opciones energéticas alternativas.
- La tasa de retorno de la inversión tiene una incidencia decisiva en el costo de la energía de origen nuclear. Los países europeos suelen utilizar una tasa inferior a 6% la cual resulta muy baja comparada con las aceptadas para países en desarrollo. En nuestro país es usual emplear en la evaluación de proyectos en el sector eléctrico tasas de alrededor del 10%.
- El precio final de la energía nuclear depende fuertemente del tiempo total que insuma la construcción de la planta. Si bien los tiempos medios para la construcción de una planta nuclear tradicional es de 6 a 8 años, el informe del OIEA¹⁰⁴ muestra que existen varios casos en los que estos plazos se exceden.

Por otro lado, en caso de que se instale una central nuclear de más de 300 MW, es decir, de mayor tamaño que las disponibles para otras alternativas energéticas, es necesario considerar también los eventuales sobrecostos para el sistema de generación, descritos anteriormente de manera cualitativa. Asimismo, deben considerarse los eventuales sobrecostos por la mayor inflexibilidad en las decisiones asociada a un proyecto de mucho mayor plazo de maduración, como las centrales nucleares. El impacto de esta inflexibilidad depende directamente del tamaño del reactor a considerar, siendo menor cuanto más pequeño sea el mismo.

En contrapartida, deben tenerse en cuenta el eventual beneficio económico que podría aportar la energía nuclear en el marco de un mecanismo mundial que premiase económicamente la generación con fuentes que no contribuyen al efecto invernadero, o que castigase económicamente la generación con fuentes que sí lo hacen. Si bien actualmente los beneficios asociados a este aspecto no son significativos para una generación de energía en Uruguay, en un horizonte de 15 años, esta situación podría verse modificada.

¹⁰³ Este Foro puso en contacto a los países poseedores de la tecnología nuclear y a aquellos, en vías de desarrollo, que deseaban adquirirla, con el objetivo de definir consideraciones comunes a todos los posibles usuarios. Dos integrantes de esta Comisión asistieron a dicho encuentro, en setiembre de este año, en Viena

¹⁰⁴ Nuclear Power Reactors in the World – 2008

Asimismo, es necesario considerar los eventuales beneficios de colocación en sistemas interconectados de excedentes de energía debido a una incorporación de una central de gran magnitud.

Por último, el estudio global del costo de esta opción energética debería incluir los eventuales beneficios que podría traer la construcción de una central nuclear al introducir en el país conocimientos tecnológicos y una cultura de la seguridad aplicables a otros sectores.

El análisis de los aspectos anteriores de manera exhaustiva, requiere estudios que exceden las posibilidades de este informe y que dependen de la modelación de las incertidumbres respecto a los futuros costos y disponibilidades de los diversos combustibles.

La única consideración primaria que puede presentarse aquí, es respecto al costo medio de generación. A esos efectos, la conclusión cualitativa que se ha extraído es que no puede afirmarse que la energía nuclear en el Uruguay tenga con certeza una ventaja sistemática de costos en la generación de una cantidad dada de energía, respecto a otras alternativas de generación de base que emplean otros combustibles. Los elementos considerados para esta afirmación se presentan en la sección siguiente.

9.8 ESTIMACIÓN DE COSTOS MEDIOS DE GENERACIÓN A PARTIR DE DISTINTAS FUENTES

En este apartado se presentan los cálculos realizados para obtener una primera estimación de los costos medios de generación, en USD/MWh, de centrales que utilizan distintas fuentes. Se considera tres formas de generación de energía de base: una central nuclear, una central de ciclo de vapor empleando carbón y una central de ciclo combinado empleando gas natural.

En este cálculo no se consideran:

- los posibles sobrecostos para el sistema eléctrico debido al tamaño de la central.
- los posibles sobrecostos por excedentes de energía no empleados, o exportados a un precio inferior a su costo.
- los posibles beneficios monetarios que podría percibir el sistema de generación de Uruguay por recurrir a fuentes que no generan gases de efecto invernadero como la nuclear.

Es notoria la incertidumbre sobre los costos que tendrán en el futuro las inversiones en todos los tipos de centrales y en particular de una central nuclear, y sobre los costos futuros de los combustibles. Por lo anterior, los valores numéricos estimados que se presentan son de carácter indicativo, con el fin de respaldar la afirmación enunciada respecto a los costos de la opción nucleoelectrónica. Para dar una idea de la variabilidad de los costos se presenta en los resultados

sensibilidades para las variables más importantes y se consideran en particular tres niveles de precios para los combustibles fósiles considerados: carbón y gas natural importados al país.

Costos de generación para una central nuclear

En el cálculo que se presenta se consideró una central de 700 MW.

Como se indicara en una sección anterior, no se encuentra disponible públicamente información que permita determinar a priori el precio de una nueva central nuclear, el cual depende esencialmente de la negociación entre el comprador y el fabricante. Del análisis de la literatura y de los contactos mantenidos por integrantes de esta Comisión con proveedores y diversos expertos surgen valores muy diversos.

El Foro Nuclear Español¹⁰⁵ estima un costo unitario de potencia de 3000 euros/kW (unos 4200 USD/kW), sin incluir intereses durante la construcción, aunque la estimación fue realizada para un programa de 10 centrales por lo que el costo de una única planta sería mayor.

Por otro lado, la compra del primer reactor EPR (de 1600 MW), actualmente en construcción en Finlandia, se negoció en 3000 millones de euros (es decir, unos 2600 USD/kW), pero se estima que el costo final de la obra superaría el doble del precio pactado inicialmente.

Asimismo, expertos del OIEA y fuentes de la industria nuclear señalaron a miembros de esta Comisión que una empresa de distribución eléctrica de Florida, en Estados Unidos, ha recibido una oferta de una central por 7000 USD/kW.

A partir de estas y otras consideraciones, la Comisión entiende que una estimación del costo unitario de potencia eléctrica podría situarse hoy entre 3000 y 5000 USD/kW. De todas formas, en la estimación del costo de la energía nucleoelectrica que se presenta en este informe, se realizó un estudio de sensibilidad con una variación un poco mayor.

En cuanto al costo promedio de operación y mantenimiento se consideró 15.81 euro/kWh, que incluye los costos variables de combustible, los costos restantes de operación y mantenimiento y los costos medios de disposición temporaria de los residuos radiactivos. Este valor está respaldado a partir de la misma fuente.

Asimismo, se adiciona a los costos anteriores los siguientes costos anuales que se supone demandaría el mantenimiento de una infraestructura regulatoria y técnica capaz de sostener un plan nuclear:

- 2 MUSD/año antes del inicio de la construcción
- 5 MUSD/año durante la construcción
- 5 MUSD/año después de la entrada en servicio.

¹⁰⁵ www.foronuclear.org

Costo de generación para una central a carbón

Se considera una central de 300 MW a carbón, realizándose las hipótesis siguientes:

- Costo unitario de potencia de 2000 USD/kW instalado.
- Plazo de construcción de cuatro años, con inversiones repartidas por igual en cada uno de ellos.
- Se adiciona a la inversión de la central un monto de 150 MUSD por concepto de una cuota parte de las instalaciones de logística portuaria para descarga del carbón.
- El rendimiento de la central se toma igual al 38 %.
- El costo variable de operación y mantenimiento adicional al combustible se toma igual a 8 USD/MWh.
- Se supone que el combustible que emplearía la central sería carbón de 6500 kcal/kg de poder calorífico inferior, y para ese combustible se consideran tres precios:
 - Precio bajo: 100 USD/ton
 - Precio medio: 150 USD/ton
 - Precio alto: 200 USD/ton

Estos valores se han tomado a partir de las siguientes consideraciones:

- El indicador de precios promedio del carbón en los mercados del noroeste de Europa, en el año 2007 fue de 86.6 USD por tonelada¹⁰⁶.
- La CNE de Chile, a los efectos de calcular los precios de nudo regulados de la generación, en el período abril-octubre de 2008, ha tomado el valor de 121.USD/ton para nuevas centrales a construirse¹⁰⁷.

Costos de generación para una central de ciclo combinado a gas

Se considera una central de 360 MW de ciclo combinado con las siguientes hipótesis:

- Costo unitario de potencia de 900 USD/kW instalado.
- Plazo de construcción de dos años, con inversiones repartidas por igual en ambos.
- El rendimiento de la central se toma igual a 54 %.
- El costo variable de operación y mantenimiento adicional al combustible se toma igual a 5 USD/MWh.
- Se supone que el combustible tendrá 8400 kcal/m³ y se toma para el mismo los siguientes precios posibles:
 - Precio bajo: 10 USD/ton poder calorífico inferior
 - Precio medio: 15 USD/MBTU poder calorífico inferior

¹⁰⁶ Según Statistical Review of World Energy 2008

http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2008/STAGING/local_assets/downloads/pdf/coal_table_of_coal_prices_2008.pdf

¹⁰⁷ www.cne.cl

- Precio alto: 20 USD/MBTU poder calorífico inferior

Estos valores se han tomado a partir de las siguientes consideraciones:

- El indicador de precios spot del gas natural en Estados Unidos en el Henry Hub, respecto del cual suelen indexarse los contratos de gas en la cuenca del Océano Atlántico tomo el año pasado un valor promedio de 6.95 USD/MBTU¹⁰⁸.
- El precio del gas regasificado en Uruguay podría resultar de adicionar al precio del Henry Hub un premio para el vendedor respecto a dicho precio, considerado el costo de oportunidad, más un costo de regasificación.

Resultados obtenidos

Se presentan a continuación los resultados numéricos para diversos valores de la tasa de descuento y variando las magnitudes sujetas a mayor incertidumbre y de mayor incidencia en cada caso, el plazo de construcción y costo por kW instalado de una central nuclear (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.1**), y el costo del combustible fósil en las centrales a carbón y a gas natural (Tabla).

Tabla 111: Costo medio de energía de una planta nuclear (USD/MWh)

Para costo unitario de inversión		5000 US\$/kW								
		Tasa de descuento								
		5,0%	6,0%	7,0%	8,0%	9,0%	10,0%	11,0%	12,0%	13,0%
Período de construcción (años)	5	67,0	74,1	81,8	90,0	98,8	108,0	117,8	128,0	138,7
	6	68,2	75,8	84,0	92,9	102,5	112,7	123,5	135,0	147,0
	7	69,4	77,5	86,4	96,0	106,5	117,7	129,7	142,5	156,1
	8	70,7	79,3	88,8	99,3	110,7	123,0	136,4	150,7	166,1
	9	72,0	81,2	91,4	102,7	115,2	128,8	143,6	159,6	177,0
	10	73,4	83,2	94,1	106,4	119,9	134,9	151,3	169,3	188,9
	11	74,8	85,2	97,0	110,2	125,0	141,5	159,7	179,8	201,9
	12	76,3	87,3	100,0	114,3	130,4	148,5	168,7	191,2	216,1
	13	77,8	89,6	103,1	118,6	136,2	156,1	178,5	203,6	231,8
	14	79,4	91,9	106,4	123,2	142,3	164,2	189,1	217,2	249,0

Para período de construcción		6 años								
		Tasa de descuento								
		5,0%	6,0%	7,0%	8,0%	9,0%	10,0%	11,0%	12,0%	13,0%
Costo de inversión (US\$/kW) (sin intereses durante la construcción)	2500	46,0	49,8	54,0	58,5	63,4	68,6	74,1	79,9	86,0
	3000	50,4	55,0	60,0	65,4	71,2	77,4	84,0	90,9	98,2
	3500	54,9	60,2	66,0	72,3	79,0	86,2	93,8	101,9	110,4
	4000	59,3	65,4	72,0	79,2	86,9	95,0	103,7	112,9	122,6
	4500	63,7	70,6	78,0	86,1	94,7	103,9	113,6	123,9	134,8
	5000	68,2	75,8	84,0	92,9	102,5	112,7	123,5	135,0	147,0
	5500	72,6	80,9	90,0	99,8	110,3	121,5	133,4	146,0	159,2
	6000	77,0	86,1	96,0	106,7	118,2	130,4	143,3	157,0	171,4
	6500	81,5	91,3	102,0	113,6	126,0	139,2	153,2	168,0	183,6
	7000	85,9	96,5	108,0	120,5	133,8	148,0	163,1	179,0	195,8
	7500	90,3	101,7	114,1	127,4	141,6	156,9	173,0	190,0	208,0

¹⁰⁸ Según Statistical Review of World Energy 2008

http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2008/STAGING/local_assets/downloads/pdf/gas_table_of_natural_gas_prices_2008.pdf

Tabla 12: Costo medio de energía de centrales térmicas con combustibles fósiles (USD/MWh)

CARBÓN				
		precio bajo de combustibles	precio medio de combustibles	precio alto de combustibles
Tasa de descuento	6%	74.8	92.2	109.6
	8%	81.3	98.8	116.2
	10%	88.6	106.0	123.4
	12%	96.5	113.9	131.3
	14%	105.2	122.6	140.0
CC A GAS NATURAL				
		precio bajo de combustibles	precio medio de combustibles	precio alto de combustibles
Tasa de descuento	6%	85.9	120.9	155.9
	8%	87.9	122.8	157.8
	10%	90.0	125.0	160.0
	12%	92.3	127.2	162.2
	14%	94.7	129.6	164.6

De la tabla 11 surge, por ejemplo, que para costos de inversión de 2500 USD/kW y tasas de descuento del 5 %, el costo medio de la energía generada por una central nuclear no superaría los 46 USD/MWh. Valores comparables aparecen en un estudio realizado en Finlandia para la evaluación del proyecto del reactor EPR actualmente en construcción¹⁰⁹.

Por otro lado, tomando el precio de la central sugerido por el Foro Nuclear Español (3000 euros/kW) y suponiendo una tasa de descuento de 10%, el precio de la energía alcanzaría los 99 USD/MWh.

Asimismo, para valores de inversión de 5000 USD/kW, algo superiores a los de España dado que sus costos de inversión corresponden a un plan nuclear de 10 centrales, y con una tasa de descuento de 10%, el precio de la energía generada a partir de una central nuclear sería 113 USD/MWh.

Como ya se había mencionado, en la tabla 11 se puede visualizar cómo el precio final de la energía nuclear depende fuertemente del plazo total que insuma la construcción de la planta. Esto es particularmente importante cuando se observa que existe una gran dispersión en los plazos que efectivamente han insumido distintos proyectos nucleares en el mundo. Por ejemplo,

¹⁰⁹ "Comparison of electricity generation costs" - Tarjanne Risto, Kivistö Aija

si se considera el período 2001-2007, el promedio de los plazos de construcción de los reactores que entraron en servicio en ese período es del orden de los seis años. Por otro lado en el período 1996-2000 el mismo promedio fue de doce años¹¹⁰.

Si se analiza la experiencia de América Latina se confirma la extrema variabilidad de los plazos entre el inicio de la construcción y el inicio de la operación comercial. En el caso de Argentina, el tiempo de construcción de la primera central Atucha I fue de 6 años mientras que el tiempo de construcción de la central Embalse fue de 9 años y 10 meses. En el caso de Brasil, Angra I insumió 13 años y 8 meses para su construcción y Angra II 24 años y 1 mes. En el caso de México, su primera central Laguna Verde 1 insumió 13 años y 9 meses y la segunda central, Laguna Verde 2, 19 años y 10 meses¹¹¹.

En base a los datos presentados y dadas las incertidumbres existentes, no puede afirmarse con certeza que el costo medio de la energía de origen nuclear en Uruguay sea sistemáticamente mayor o menor respecto a otras alternativas de generación de base que emplean combustibles fósiles.

¹¹⁰ Nuclear Power Reactors in the World

¹¹¹ www.iaea.org

CAPÍTULO 10 ELEMENTOS PARA UNA DECISIÓN FUNDAMENTADA

Además de los elementos energéticos y económicos analizados en el capítulo anterior, la eventual introducción de la energía nuclear en nuestro país exige el estudio pormenorizado de otros aspectos. Como ha sido señalado, la introducción de la energía nucleoelectrica no se limita a comprar una central, sino que implica la puesta en marcha de un programa nuclear. Y buena parte de dicho programa tiene que estar en funcionamiento antes de la compra de la central, lo que eleva los plazos mínimos a los 15 años señalados anteriormente. En este capítulo se presenta una discusión primaria en relación a los principales aspectos que deben tenerse en cuenta durante la fase de análisis de la opción nucleoelectrica en el país. Esta fase, que ha sido someramente descrita en el capítulo 1, implica la preparación de todos los elementos necesarios para que el país pueda tomar una decisión fundamentada sobre la conveniencia de iniciar un programa nucleoelectrico.

10.1 EL MARCO INSTITUCIONAL

Un programa nuclear nacional exige el diseño de un marco institucional específico, que luego requerirá su aprobación por el marco normativo. No es posible que una única institución cumpla con todas las actividades que implica la industria nucleoelectrica, como por ejemplo la operación y el mantenimiento de la planta, la regulación de todos los procesos, y la investigación científica y tecnológica. En particular, como se señala en el capítulo 6 de este informe, una misma institución no debería operar y controlar al mismo tiempo.

Un punto previo a la construcción de la estructura institucional necesaria es la definición del operador de la planta. Este podría ser estatal, privado o mixto. En general, las empresas que fabrican y venden reactores nucleares no se encargan de operarlos. En el mundo, la mayoría de las plantas nucleares están operadas por el Estado.

Es posible imaginar tres instituciones separadas: una que opere, otra que regule y controle, y una tercera que investigue y desarrolle.

La primera debería encargarse de supervisar la construcción junto con el fabricante, de realizar la transferencia de información, luego de operar la planta, incluyendo el manejo del combustible en todas sus etapas, así como del desmantelamiento de la planta al final de su vida útil.

La segunda institución es una Autoridad Reguladora Nuclear Nacional. En Uruguay existe una Autoridad Reguladora en Radioprotección, unidad ejecutora que funciona en la órbita del Ministerio de Industria, Energía y Minería, creada por Ley 17.930 de diciembre de 2005. La misma tiene, entre otros, los cometidos de regular, fiscalizar y controlar las actividades con radiaciones ionizantes, elaborar normas y reglamentaciones técnicas así como emitir licencias de operación y autorizaciones individuales a personas que trabajan con radiaciones. Estas actividades están enmarcadas en el contexto de las prácticas que se llevan a cabo hoy en el país, por lo que no tienen un alcance en el ámbito nucleoelectrico. En nuestro país podría pensarse en una institución con un reducido grupo de profesionales altamente capacitados y con

los recursos necesarios para contratar internacionalmente parte de sus tareas. Es necesario tener en cuenta que las decisiones, en todos los casos, deben ser tomadas por los técnicos locales, por lo que el equipo nacional debe tener la capacidad necesaria para auditar los contratos internacionales.

La tercera institución es aquella dedicada a la investigación y desarrollo, la cual, con escalas de tiempo diferente a las de las otras dos instituciones, se encargaría de estas áreas. También podría ocuparse de la formación de recursos humanos, en colaboración con el sector académico universitario, y en estrecho contacto con instituciones de objetivo similar en otros países del mundo. Esta institución debería contar con presupuesto adecuado e investigadores en diferentes ramas de la actividad nucleoelectrica.

Toda esta estructura podría resultar onerosa para un país con una escala como la nuestra, pero resulta imprescindible para poder contar con un programa nuclear.

10.2 EL MARCO NORMATIVO

Uruguay prohíbe, por Ley 16.832, el uso de electricidad de origen nuclear en su territorio. Naturalmente, para instalar una planta nuclear, al menos el artículo correspondiente de esta ley precisaría ser derogado. Sin embargo, la introducción en el país de la industria nucleoelectrica exigiría la elaboración de un complejo marco normativo que trasciende ampliamente la simple derogación de un artículo de ley. Para empezar, el diseño institucional requiere ser aprobado por normas jurídicas de distinto nivel.

En el capítulo 6 de este informe se describe someramente el marco jurídico requerido para que la introducción de la generación nucleoelectrica en un país satisfaga las recomendaciones internacionales. Dicho marco debe respetar una docena de principios jurídicos, muchos de los cuales serían novedosos para Uruguay. Otros, si bien ya están incluidos en nuestro ordenamiento jurídico, requieren una revisión profunda.

La mayoría de los principios reseñados en el capítulo 6 son sólo recomendaciones. Sin embargo, nuestro país ha firmado diversos tratados internacionales, los que luego fueron ratificados por ley, y que por lo tanto necesariamente deberán respetarse en el marco jurídico a desarrollar.

En efecto, Uruguay ha ratificado convenios internacionales de responsabilidad por daño nuclear como la Convención de Viena sobre Responsabilidad Civil por Daños Nucleares y Protocolo Facultativo para Solución Obligatoria de Controversias. 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.

Uruguay tiene asimismo ratificados por ley una serie de Tratados y Convenciones, los que por lo tanto se han incorporado al ordenamiento jurídico nacional. A modo de ejemplo se cita: el

Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares, la Convención Sobre Pronta Notificación de Accidentes Nucleares, la Convención Sobre Asistencia en Caso de Accidente Nuclear o Emergencia Radiológica, la Convención Conjunta de Seguridad del Combustible Gastado y Seguridad de la Gestión de los Desechos Radiactivos, la Convención Sobre Seguridad Nuclear, la Convención Sobre Protección Física de Materiales Nucleares, y el Acuerdo Regional de Cooperación para la Promoción de la Ciencia y la Tecnología Nucleares en América Latina y el Caribe (ARCAL).

Uruguay, como firmante de la Convención Sobre Pronta Notificación de Accidentes Nucleares, tiene la obligación de informar al OIEA y a países vecinos en caso que ocurra un accidente. En ese sentido, Uruguay ha notificado al OIEA por los canales apropiados, por ejemplo vía el “Emergency Notification and Assistance Convention” (ENAC), cada vez que ha ocurrido algún incidente o accidente con fuentes de uso médico.

Cabe mencionar que en Uruguay está a estudio en el Parlamento una Ley de Protección Radiológica que abarca las actividades que se desarrollan en el país en todo el espectro de aplicaciones de la tecnología nuclear, pero que no incluye la producción de energía nucleoelectrónica. De igual manera, la Autoridad Reguladora en Radioprotección cuenta con un cuerpo normativo que regula todas las actividades que se llevan a cabo en el país con fuentes y materiales radiactivos pero que tampoco incluye la producción de energía nucleoelectrónica.

El desarrollo del marco normativo debe tener en cuenta no sólo la adecuación de la legislación actual sino además prever la manera de regular todas las actividades nucleares. Si bien es posible construir este nuevo marco normativo en base a aquellos vigentes en países que ya poseen la energía nuclear, su adaptación a la realidad jurídica nacional exige un cuidadoso estudio técnico. Dicho trabajo también requiere la formación de juristas especializados en el tema.

El inicio de un programa nuclear exige que los aspectos esenciales del marco jurídico nuclear se encuentren resueltos. Por ello, durante la fase de análisis, se requiere identificar los lineamientos del marco jurídico, las normas a modificar y las bases de aquellas a desarrollar.

10.3 EL URANIO Y EL CICLO DEL COMBUSTIBLE¹¹²

El análisis sobre el combustible nuclear debe realizarse simultáneamente con la elección de la tecnología de la planta, ya que ésta determina el tipo de combustible que se debe utilizar. Como ya se indicara, en caso que nuestro país resolviera introducir la opción nucleoelectrónica, la elección de la tecnología más apropiada no tendría lugar antes de 6 a 8 años. Sin embargo,

¹¹² Si bien la gestión de los residuos es parte del ciclo de combustible, en este capítulo se trata en la sección 10.5

dada la relevancia del tema del combustible, en esta sección se realiza un primer abordaje de este asunto.

El uranio es el componente fundamental del combustible de la casi totalidad de las plantas nucleares en funcionamiento y en desarrollo. La eventualidad de que no se encuentre uranio en el país, no inhibe la posibilidad de un plan nuclear nacional, ya que el combustible se encuentra disponible en el mercado internacional. Sin perjuicio de ello, la necesidad de uranio como combustible de las centrales nucleares es a veces considerada como un elemento que podría aumentar la dependencia energética de nuestro país.

Una alternativa viable para contrarrestar esta eventual dependencia energética consiste en realizar contrato de compra anticipada para el suministro de uranio. Esta estrategia es seguida por casi todos los países nucleares, lo que se ve facilitado por el bajo precio del uranio en comparación con el costo total de la industria nuclear. Con los precios actuales (unos 110 dólares por kilogramo de uranio en el mercado spot), el costo anual del uranio necesario para una central de tecnología PWR de 1.000 MW es de alrededor de 20 millones de dólares¹¹³.

Otra estrategia usual en el mundo para disminuir vulnerabilidades y, en definitiva, el grado de dependencia respecto del combustible nuclear, consiste en realizar un acopio de combustible. Diversos países que no poseen uranio, acopian en su territorio combustible para varios años de funcionamiento de sus centrales. El volumen ocupado es reducido y las condiciones tecnológicas para dicha operativa son sencillas y seguras, aunque exigen fuertes controles para aplicar las salvaguardas (para evitar robos o usos indebidos del combustible).

En este sentido, más allá de que aún no sea posible determinar la estrategia para el acceso al uranio, se entiende que, aún bajo las hipótesis más pesimistas, la introducción de la industria nuclear en nuestro país podría ayudar a disminuir vulnerabilidades en relación al combustible necesario para generación eléctrica.

En caso que se opte por una tecnología que demande uranio enriquecido, Uruguay seguramente no tendría su propia planta de enriquecimiento, ya que es una tecnología cara y los volúmenes de combustible que necesitaría nuestro país no justificarían su introducción, sin dejar de reconocer que se trata de una actividad estratégica. Como se ha señalado en el Capítulo 2, la oferta de uranio enriquecido se concentra en una media docena de empresas. Sin perjuicio de esto, podría aspirarse a la fabricación de los elementos combustibles al igual que muchos países que poseen generación nucleoelectrónica, incluso en la región.

En este marco, cabe preguntarse si Uruguay posee uranio. Durante la década del 70 y comienzo de los 80 del siglo pasado, Uruguay emprendió varias campañas de búsqueda de uranio, tanto

¹¹³ Esto representa aproximadamente lo que se ha llegado a gastar en petróleo en nuestro país, para generar electricidad, durante sólo una semana

con medios propios como con la colaboración de organismos extranjeros. El descenso del precio del uranio en los años 80 y el paulatino desmantelamiento de la DINAMIGE, desmotivaron la búsqueda, antes que pudieran alcanzarse conclusiones claras.

Dado que la tecnología actual para la prospectiva de uranio es muy costosa, el gobierno ha resuelto realizar un llamado internacional para la exploración y eventual explotación de yacimientos uraníferos. Al llamado inicial de expresiones de interés, en 2007, se presentaron varias mineras internacionales de gran porte¹¹⁴, lo que ha demostrado el interés por el uranio en general y por las posibilidades que ofrece nuestro territorio. En estos momentos, una comisión conformada por la DINAMIGE, la DNETN, la ARNR, la DINAMA y el MEF se encuentra redactando los pliegos para la licitación internacional de los bloques a explorar. Debe tenerse en cuenta que no resulta esperable que pueda extraerse uranio de una mina en nuestro país antes de diez años. El trabajo de la comisión referida tiene en cuenta que en este llamado se debe velar por los aspectos ambientales, garantizando que eventuales minas de uranio en Uruguay se exploten siguiendo procedimientos rigurosos avalados internacionalmente, tanto durante la explotación como para el cierre. También se debe garantizar que las condiciones de explotación (por ejemplo, ritmos de extracción, necesidad de certificación de reservas) puedan ser compatibles con la eventual utilización de parte de dicho mineral como combustible de un posible proyecto nuclear nacional.

Por último, y en el marco de las incertidumbres que tiene el desarrollo tecnológico futuro, corresponde indicar que hoy no puede descartarse la posibilidad que, para la década del 20, exista oferta de centrales funcionando con el ciclo del torio. Si este fuera el caso y si resultara conveniente instalar este tipo de centrales en nuestro país, la eventual discusión sobre la disponibilidad a futuro de uranio resultaría innecesaria.

10.4 EL SITIO Y SUS REQUERIMIENTOS

La selección y evaluación del sitio para la implantación de una central nucleoelectrónica, de los depósitos transitorios de residuos nucleares y de los repositorios, es un elemento esencial. En ese proceso de selección se expresan un gran número de elementos técnico-económicos, ambientales, y sociales, tanto en condiciones de operación normal como en condiciones contingentes. El resultado de ese proceso resulta ser determinante a la hora de emprender un programa nuclear.

Entre otros, los criterios más relevantes son:

- Existencia y/o posibilidad de desarrollo de las infraestructuras básicas
- Accesibilidad
- Posibilidad de conexión al sistema eléctrico

¹¹⁴ Las grandes mineras internacionales, en base a detecciones satelitales, suelen manejar mejor información que la conocida por la mayoría de los países en desarrollo.

- Geología
- Hidrogeología
- Hidrología
- Densidad demográfica
- Usos actuales y potenciales de suelo
- Usos y disponibilidad del agua
- Existencia de áreas naturales protegidas y/o ambientalmente sensibles
- Percepción social
- Otras cuestiones ambientales locales

Entre los aspectos técnicos y económicos a considerar, un elemento importante es la disponibilidad de una fuente fría. Como se señaló en el capítulo 2, una central nuclear, al igual que cualquier central térmica, necesita una fuente fría para enfriar el vapor que mueve las turbinas. Esta fuente fría puede ser un cuerpo de agua o una torre de enfriamiento. Cabe destacar que, ni el agua de enfriamiento en el primer caso, ni el aire en el segundo, entran en contacto con ningún elemento radiactivo, por lo que sólo se incrementa su temperatura.

La existencia de una corriente de agua caudalosa y cercana implica una notable ventaja. Un aumento de temperatura en el curso de agua que recibe el agua caliente puede tener consecuencias ambientales relevantes para la vida acuática. Por lo tanto, para que el aumento de temperatura no sea significativo, deberá tener un gran caudal. Una central de 300 MW, que debe disipar alrededor de 700 MW de calor, precisa un curso de agua con un caudal mínimo de unos 100 m³/s, de tal forma que el agua salga dos grados centígrados más caliente que al ingreso, como indica la norma ambiental nacional. Esta condición puede ser cumplida en varios cursos de agua de nuestro país.

En el caso de las torres de enfriamiento no existe el problema del calentamiento del curso de agua. Se trata de sistemas de enfriamiento más caros y que implican menores rendimientos de los ciclos, pero requieren un volumen de agua sustancialmente menor.

Otro elemento central es la densidad de población en el entorno de una planta y la distancia al centro poblado más próximo. En nuestro país, la baja densidad poblacional, permitiría ubicar una planta nuclear a una importante distancia de cualquier centro poblado. Desde este punto de vista, Uruguay se encuentra en una situación significativamente mejor que la mayoría de los países nucleares, en particular los europeos, donde las centrales suelen encontrarse a cortas distancias de centros poblados. Resulta obvio que cuanto menor sea la densidad de población en el entorno de la planta y cuanto mayor sea la distancia al centro poblado más cercano, tanto mejor será el sitio que se evalúa ya que las consecuencias de las eventuales contingencias serían más moderadas. Sin embargo no existe una única respuesta, o sea valores óptimos. Sin perjuicio de ello, como convención se puede elegir una distancia mínima al centro poblado más cercano y una densidad en el entorno de la planta (estrictamente es la densidad poblacional en función de la distancia a la misma). Esos valores mínimos surgirán de estudios detallados que deberán realizarse durante la fase de análisis.

Un tercer elemento central que requiere ser destacado muy especialmente es el de la percepción social del proyecto. Esta percepción se construye como una combinación de los impactos en operación normal y una imagen de los riesgos en situaciones contingentes. La selección de un emplazamiento genera en la población del entorno más próximo al predio de la planta una reacción negativa. Y esta reacción se da siempre por lo menos en quien se siente el vecino más cercano (y casi independientemente de la distancia a la planta). Esta percepción tampoco está asociada con el reconocimiento de los beneficios para la sociedad en su conjunto y va desde el cuestionamiento limitado del NIMBY¹¹⁵ hasta las posiciones extremas como la del concepto BANANA¹¹⁶.

Para abordar este aspecto, la elaboración del programa nucleoelectrico debe definir la forma de compensación por el uso del ambiente a quienes resultan afectados de alguna manera. Esta compensación es una reparación que se busca que sea percibida como equivalente a los perjuicios percibidos por estar a determinada distancia de la planta. La implementación de la compensación requeriría una estrategia de comunicación transparente y eficiente, que enfatice especialmente en que esa compensación no sustituye ni afecta en nada las medidas de prevención de los riesgos.

La aprobación de una ubicación para un reactor nuclear o para una instalación de tratamiento o disposición final de residuos seleccionada con los criterios descritos, es parte del proceso de licenciamiento y como tal involucra la participación de varias dependencias gubernamentales. Aplicado al Uruguay, se entiende que deberían participar, al menos, la Autoridad Reguladora Nuclear Nacional, la DINAMA del MVOTMA, la DNETN del MIEM y la Intendencia Municipal correspondiente junto con el futuro operador de la planta.

De lo expuesto surge que la comparación de potenciales emplazamientos se basa en el análisis de múltiples variables. Dado que la elección del sitio resulta técnica y socialmente sensible, parece recomendable que, durante la fase de análisis, se definan criterios para analizar y comparar distintas alternativas de localización. Al cabo de esta fase, debería producirse un Compendio de Criterios Ambientales de Localización.

10.5 LOS ASPECTOS AMBIENTALES

Si bien los impactos ambientales potenciales dependen mayoritariamente del ciclo de combustible que finalmente se adopte, los aspectos ambientales específicos a tener en cuenta para una central nuclear son las emisiones sólidas, emisiones líquidas, emisiones gaseosas,

¹¹⁵ Acrónimo de “Not In My Back Yard” expresión en inglés que puede traducirse como “no en mi patio trasero” o “no en mi entorno”

¹¹⁶ Acrónimo de “Build Absolutely Nothing Anywhere Near Anybody” expresión en inglés que puede traducirse como “construir absolutamente nada, en ningún lado, cerca de nadie”

emisiones radiactivas, el uso de la tierra, el uso del agua y la presencia física de las instalaciones.

Eventos de baja probabilidad de ocurrencia y que implican contaminación por radiación ionizante, responden a condiciones contingentes que no son incluidos en este apartado sino que son tratados en el capítulo sobre la Planificación de Contingencias.

Los aspectos ambientales derivados de la fase de construcción resultan ser los aplicables a toda obra civil y electromecánica de similar naturaleza.

Con relación a las emisiones sólidas, como ya se describió en el capítulo 5, existen diversas estrategias para manejar los residuos generados por la industria nucleoelectrónica. Este es un punto para el cual la pequeña escala de nuestro país también puede ser determinante. En efecto, muchas de las variantes para el tratamiento y la disposición final de los residuos nucleares sólo se financian adecuadamente si su volumen supera un umbral mínimo.

Los residuos menos peligrosos y que deben mantenerse confinados por menor tiempo, es decir aquellos de baja y algunos de los de media actividad descritos en el capítulo 5, podrían almacenarse en superficie en condiciones adecuadas. Esto podría realizarse en el país, sin mayores dificultades y costos. Hoy en día, algunos de los residuos de la medicina nuclear y de diversos laboratorios e industrias corresponden a esta categoría. Por ejemplo, Uruguay maneja desde hace décadas residuos nucleares de baja intensidad. Naturalmente, en caso de introducir la industria electronuclear, el volumen a procesar sería mucho mayor.

En cambio, la gestión de los residuos de alta actividad -básicamente el combustible quemado- plantean otros desafíos. Un primer aspecto que habría que decidir es si se resuelve reciclarlos para extraerle su contenido remanente de uranio y de plutonio o si en cambio se procederá a su disposición final sin reciclado.

Por la alta complejidad tecnológica y la necesidad de una escala mínima de la operación, el reciclado local no se considera viable. Una alternativa sería enviar el combustible quemado al exterior para su reciclado. De todas formas, nuestro país debería hacerse cargo de las llamadas "cenizas" del proceso de reciclado, las que deben mantenerse confinadas al menos durante decenas de miles de años.

Como se ha señalado antes, todos los países mantienen aún el combustible quemado o las cenizas de su reciclado en depósitos transitorios. Esto permite continuar estudiando las estrategias de disposición final más adecuadas, mientras se analizan desarrollos tecnológicos novedosos que permitan reducir de manera sustancial la carga tóxica de los residuos. La mayoría de los países nucleares tienen hoy un fondo, recolectado con la venta de la electricidad, para hacer frente a los futuros costos del desmantelamiento de la central y la disposición final de los residuos. Debe tenerse en cuenta que las estrategias actualmente conocidas para esta disposición final se financiarían a un costo razonable con un volumen de residuos de cierto porte, significativamente mayor que lo que produciría una central pequeña. En este sentido, una

alternativa posible para nuestro país podría consistir en analizar una estrategia compartida de manejo de residuos nucleares con otro u otros países, eventualmente de la región, y sin descartar la posibilidad de que se construyan repositorios conjuntos para abaratar costos.

En caso que ese camino no fuera viable y, por ende, nuestro país deba encargarse de la disposición final de sus residuos, hayan sido o no reciclados para recuperar los elementos de mayor valor comercial, deberá realizarse un pormenorizado estudio de alternativas. La posibilidad de un almacenamiento geológico, tal como se describió en el capítulo 5, parece altamente improbable dada la cantidad relativamente reducida de residuos que produciría el Uruguay.

Debe tenerse en cuenta que, como ya se indicara en el capítulo 5, 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 residuos, a través de los siguientes estudios:

- Relevamiento de la situación actual del tratamiento y disposición final de los residuos nucleares en el ámbito internacional, incluyendo investigaciones, perspectivas tecnológicas, capacidades existentes, regulaciones y experiencia específica con este tipo de residuos.
- Estimación de los volúmenes adicionales de residuos de cada categoría que se generarían en cada opción tecnológica.
- Identificación de las opciones viables en Uruguay para la gestión de los residuos, 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.

Con relación al resto de los aspectos ambientales, en la fase de análisis, se deberá realizar los siguientes estudios:

- Desarrollo conceptual del marco ambiental aplicable

Esta actividad deberá realizarse en coordinación con el desarrollo del resto del marco normativo aplicable. En este desarrollo, se deberá identificar el marco legal ambiental existente que resultaría aplicable a programas nucleares. A modo de ejemplo, los vertidos de aguas de enfriamiento deberán cumplir con lo establecido en el Decreto Reglamentario del Código de Aguas. Otro ejemplo lo constituyen las Autorizaciones Ambientales, Previa y de Operación, que establece el Decreto 349/005.

Este marco deberá ser evaluado identificando los aspectos en los que exista un vacío normativo desde el punto de vista ambiental y aquellos que requieren ser modificados a la luz de la especificidad del tema.

Como producto final de este estudio, se espera obtener un compendio de la normativa ambiental aplicable (tanto la existente como aquella por desarrollar).

- Criterios para analizar la viabilidad ambiental de la localización

Las cuestiones que hacen a la viabilidad ambiental de la localización, tanto de las centrales nucleares como de los depósitos transitorios y los repositorios, requieren ser analizados, a fin de definir los criterios ambientales a aplicar. Este punto ya se desarrolló en la sección que trata el sitio y sus requerimientos.

- Determinación de línea de base

Una vez identificados sitios posibles para la implantación de una central nuclear deben implementarse monitoreos específicos que permitan determinar el nivel de calidad ambiental preexistente. A tales efectos y más allá que puedan existir particularidades, deben ser definidos los aspectos a relevar y las técnicas y frecuencias de monitoreo que deberán ser implementados. Esta identificación debería producir una guía para la determinación de la línea de base.

- Establecimiento de programas de monitoreo y control

Se deben determinar los contenidos básicos del programa de monitoreo y control, el que deberá implementarse en concordancia con los requerimientos internacionales existentes. Se estima que deberán determinarse los parámetros a monitorear, su frecuencia, el procesamiento de los datos, la generación de indicadores de desempeño ambiental, la elaboración de informes y la comunicación de los mismos a las partes interesadas.

Esta actividad debería producir un protocolo para monitoreo y desempeño ambiental.

10.6 EL INVOLUCRAMIENTO DE LAS PARTES INTERESADAS

Un programa nucleoelectrico tiene una duración que se mide en décadas, involucrando por lo tanto varios gobiernos, por lo que requiere de estabilidad en los lineamientos y políticas por parte del Estado, o sea requiere una atmósfera política positiva y estable, la que sólo puede obtenerse si existe un adecuado involucramiento de las partes interesadas¹¹⁷ durante todas las etapas del programa. Ello es esencial para una adecuada inserción del mismo en la sociedad y requiere una activa promoción de esa participación desde el Estado. La opinión de la ciudadanía resulta esencial para la toma de decisión.

Por otro lado, debe reconocerse que la energía nuclear genera temores y una fuerte polarización dentro de las sociedades. En ese marco, la decisión de construir plantas nucleares requiere la no oposición -apoyo o neutralidad- de la mayoría de la población así como el respeto y la atención a las preocupaciones de quienes quedan en minoría. La búsqueda de una discusión abierta y sin preconceptos, podría evitar una fractura de la población uruguaya en dos posiciones irreductiblemente opuestas en relación al proyecto. Sin perjuicio de ello, en caso que primara la conveniencia de recorrer el camino nuclear, será necesario buscar los mecanismos más adecuados para brindar las máximas garantías exigidas por quienes se opusieron a dicho camino. Entre los mecanismos para brindar garantías se podría implementar la participación de

¹¹⁷ A los efectos del presente informe, son partes interesadas las personas o grupos que tienen interés o están afectados por el desempeño de un emprendimiento.

organizaciones de la sociedad civil opuestas a la industria nuclear en el seguimiento del programa nucleoelectrico, tal como se viene realizando en el seguimiento ambiental de grandes emprendimientos industriales desde hace más de cinco años.

Además de la posibilidad de que la población participe activamente y de que reciba información completa y adecuada, para un exitoso involucramiento de las partes interesadas resulta clave la competencia y la credibilidad de las personas y las organizaciones responsables del eventual programa nuclear. Particularmente importante es la competencia y transparencia de la Autoridad Reguladora para mantener la confianza del público.

En las etapas iniciales de la fase de análisis se debe determinar la forma de comunicar a todas las partes interesadas el desarrollo de esa propia fase. Durante ese desarrollo también se identificarán los medios y las modalidades de comunicación mejor adaptados para la comunicación en las fases posteriores, si las hubiere.

Al inicio de la fase de análisis, se deberá relevar la opinión *a priori* de la sociedad respecto de un eventual programa nuclear en Uruguay, identificando el tipo y grado de información que sustenta esa opinión y la disposición a atender argumentos que discrepen con la misma.

Con base en esa información, se podrá diseñar e implementar los mecanismos de participación de la sociedad en la fase de análisis. Ésta deberá incluir, al menos, la difusión pública de la evolución de esta fase, los resultados de los estudios, los criterios de evaluación de la localización de una planta, y los requisitos de desempeño ambiental exigibles a un proyecto nucleoelectrico.

Como parte del involucramiento de las partes interesadas, se deberá llevar adelante una campaña de divulgación de información seria y fundada que tenga en cuenta todas las visiones sobre la energía nuclear. Para que la opinión de la población sea estable, la campaña debe ser clara, meditada y bien fundamentada. La misma requiere, además de transparencia, una dosis importante de neutralidad la que podría obtenerse a través de asignar la responsabilidad de su diseño e implementación a un grupo de personas idóneas y con posiciones notoriamente diversas respecto de un eventual programa nucleoelectrico.

Asimismo, resulta relevante que durante la fase de análisis se diseñen las bases de la participación en las eventuales fases posteriores y se evalúe la factibilidad y la efectividad esperada. También resulta importante desarrollar las herramientas necesarias para que los voceros calificados de esta fase interactúen con las partes interesadas.

Al cabo de esta fase, deberían desarrollarse instancias de discusión pública de los resultados de los estudios de la fase de análisis. Luego de la difusión de los resultados, en particular, se estaría en condiciones de formalizar una eventual consulta formal a la ciudadanía.

10.7 LA PLANIFICACIÓN DE LA ATENCIÓN DE CONTINGENCIAS

Como ya se indicó en este informe, la seguridad es un tema esencial de las plantas nucleares. Progresivamente el desarrollo tecnológico de las plantas ha incorporado mayor cantidad de elementos de control para prevenir contingencias y hacerlas más seguras. Aún así, la probabilidad de ocurrencia, por baja que sea, no es nula y por ello se adoptan medidas para la detección en forma temprana en caso que algo funcione mal.

En este marco resulta evidente que esa detección temprana de una situación no prevista debe iniciar un proceso de respuesta. En Uruguay existe hoy un Plan de Contingencia para el caso que ocurran eventos que involucren fuentes con radiaciones ionizantes, llamado "Plan RAD". Este es un Plan de Respuesta Nacional a Accidentes Radiológicos que está inserto en los planes de contingencia del Sistema Nacional de Emergencia.

El objetivo del referido Plan es establecer una capacidad de respuesta organizada de emergencia con una acción coordinada y oportuna de las instituciones estatales del país. El Plan RAD describe las capacidades y responsabilidades de las instituciones intervinientes y un concepto para la integración de las actividades de estas instituciones a fin de proteger la salud y seguridad de las personas, bienes y medio ambiente.

Uruguay cuenta con equipos y fuentes radiactivas en diversas áreas como la industria (medidores nucleares, radiografía), en el área médica (aceleradores lineales, cobaltoterapia, braquiterapia, RX) e investigación (radiotrazadores, moléculas marcadas, etc.). Los planes de respuesta están adaptados a la eventualidad que puedan ocurrir incidentes o accidentes en estas áreas y con estos equipos y fuentes. Por lo tanto ante la posibilidad de instalación de un central nuclear se deberán diseñar otros escenarios posibles que tengan en cuenta un evento de incidente/accidente en dicha instalación, reformulando fuertemente el mencionado Plan de Respuesta Nacional y teniendo en cuenta la coordinación con los planes específicos de actuación que toda central debe poseer.

La respuesta estatal ante emergencias no releva al titular de la licencia de su obligación en esta materia, sino que su finalidad es complementar la respuesta de éste. La ley deberá delimitar claramente las obligaciones del titular de la licencia y las de las autoridades públicas.

En una instalación nuclear, puede originarse una emergencia y conducir a la emisión accidental de material radiactivo que se disperse más allá del límite del emplazamiento. Surge entonces la necesidad de aplicar medidas perentorias para proteger al público. Las centrales tienen, en general, planes de contingencia en los que se disponen medidas diferentes según la exposición. Así prevén medidas de protección para trabajadores como el grupo más expuesto por ser los más cercanos al reactor, medidas vinculadas a grupos críticos que, por ejemplo, viven cerca de la central y determinan medidas progresivamente menos exigentes a medida que se alejan de la central, hasta un límite en que los efectos serían de escasa entidad. En general, este límite ronda los 80 km.

Existen instrumentos internacionales como la Convención sobre Seguridad Nuclear (ratificada en Uruguay por Ley 17.588 del 10/12/2002) y la Convención Conjunta (ratificada en Uruguay por Ley 17.910 del 12/10/2005) que disponen que las partes contratantes adopten las medidas adecuadas para asegurar que existan planes de emergencia que sean aplicables dentro del emplazamiento y fuera de él y comprendan las actividades que se deban realizar en caso de emergencia. Por otra parte, dado que el accidente puede tener consecuencias fuera del país donde tiene lugar, todos los países con centrales nucleares en operación y algunos que no las tienen, como el nuestro, son signatarios de la “Convención sobre la Pronta Notificación de Accidentes Nucleares” y la “Convención sobre Asistencia en Caso de Accidente Nuclear o Emergencia Radiológica”.

En el desarrollo de la fase de análisis se deberá realizar una identificación primaria de los diferentes casos de contingencias según la escala geográfica de la afectación y los involucrados en la atención a la misma.

10.8 LA FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS

Otro aspecto central para posibilitar la introducción de la energía nuclear en el país es la adecuada formación de recursos humanos. Incluso en caso de una compra con escasa participación nacional, es necesario contar con profesionales y técnicos capacitados para resolver la compra más adecuada, para licenciar la instalación y para supervisar la construcción y la posterior operación. Este requerimiento, que es particularmente decisivo para la Autoridad Reguladora Nuclear Nacional, también resulta relevante para temas tan diversos como la formación de los operadores de la planta, para definir el marco legal, o para conocer el desarrollo de la industria en el mundo y aconsejar sobre su futuro en el país.

Nuestro país posee recursos humanos de alto nivel. Su comunidad científica, si bien es aún pequeña, trabaja de acuerdo a los estándares usuales a nivel internacional. Asimismo, esta comunidad académica se encuentra inserta internacionalmente. Por lo tanto, si bien nuestro país posee hoy un número extremadamente limitado de especialistas en temas nucleares, con el apoyo de la comunidad académica internacional podría formar, en un plazo relativamente corto, profesionales en el área, en caso de que el país los requiera.

Los planes de formación de los recursos humanos deben adaptarse a las necesidades de cada etapa. Por ejemplo, en el estado actual del tema en el país, no resultaría conveniente formar masivamente profesionales en el exterior en actividades que serían requeridas no antes de una decena de años.

La formación de recursos humanos requiere, por lo tanto, un ordenamiento temporal muy específico, por lo que es posible visualizar varias etapas. Como se explicita en el capítulo final de este informe, sólo dentro de 2 a 4 años el país podría estar en condiciones de tomar una definición definitiva en relación a la iniciativa nuclear. A partir de dicho momento, en caso de que la resolución sea positiva, será necesario contar con un grupo de expertos encargados de poner

en funcionamiento el programa nuclear. Entre otras actividades, este grupo debería: asesorar en la creación del marco normativo, poner en funcionamiento una nueva Autoridad Reguladora, elegir la tecnología más adecuada disponible internacionalmente en dicho momento, evaluar el grado de participación nacional en el proyecto, preparar la licitación para la compra de la central, asesorar en la negociación con los vendedores, asesorar en la construcción de la planta, etc. Este grupo debería constituir, asimismo, el germen de un futuro equipo de investigación y desarrollo uruguayo. Una parte de ese grupo, en estrecho contacto con especialistas contratados en el exterior, debería encargarse, por ejemplo, del licenciamiento del reactor.

Sólo en la última etapa, ya unos pocos años antes de la entrada en funcionamiento, se llevaría a cabo la formación de los operarios y técnicos que la harían funcionar. Esta última etapa debería continuar mientras la planta permanezca en operación.

10.9 LAS RELACIONES INTERNACIONALES

Comenzar un programa nuclear involucra a varias partes, instituciones, organismos y empresas. Entre ellas se encuentra el Ministerio de Relaciones Exteriores.

En efecto, tanto el acceso a la tecnología, como el acceso al uranio, así como la garantía de realización de los controles adecuados y, en particular, el compromiso de no-proliferación, corresponden o están relacionados con las políticas internacionales. Esto, para un país de la talla del nuestro, tiene aún mayor relevancia.

Por ejemplo, cualquier negociación para la compra de una determinada tecnología (tanto para el reactor como para el combustible) podría acompañarse, en contrapartida, por otros tipos de beneficios y obligaciones mutuas entre las partes (comprador y vendedor). Asimismo, dado que las compras de uranio se negocian a escala de varios años, o incluso décadas, dicha transacción requiere una delicada negociación internacional.

Por otro lado, las regulaciones y controles en aplicación de las recomendaciones propuestas por el OIEA, requieren de la firma o la ratificación de tratados internacionales.

Por último, el tema sin duda más delicado es el compromiso de no-proliferación, es decir, la garantía de que el país que accede a la tecnología nuclear sólo la utilizará con fines pacíficos. Este último aspecto, en particular, puede complicar el acceso a determinadas tecnologías para uso civil, debido a la sospecha de un “uso indebido”.

Los requerimientos internacionales vinculados a la no-proliferación, podrían condicionar la posibilidad de acceder a aquella que, por razones técnicas o económicas, termine resultando la más adecuada para nuestras necesidades.

10.10 PARTICIPACIÓN NACIONAL EN EL PROYECTO

La experiencia internacional muestra que la introducción en un país de la industria nucleoelectrica puede brindar un impulso muy relevante a otras ramas de la actividad del país. Uno de los elementos fundamentales para potenciar este impacto es el adecuado manejo del grado de participación nacional en el proyecto, dado que una excesiva participación nacional podría retrasar las obras y con ello aumentar significativamente los costos finales de la energía nucleoelectrica. A continuación se analizan someramente las ventajas e inconvenientes de dos situaciones extremas.

Un extremo posible sería la compra y la instalación de la central con una mínima participación nacional. Esta opción plantea varias dificultades. En primer lugar, la compra de tecnología requiere que el comprador tenga expertos capacitados para dialogar, de manera razonablemente igualitaria, con los técnicos de la empresa/país vendedor, para estar seguro de la adecuación de la tecnología a los requerimientos del comprador. Esta situación se vuelve aún más compleja si la compra se realiza en el mercado internacional.

Uno de los aspectos centrales es que una tecnología diseñada para una realidad muy diferente de aquella en la que se instalará, no necesariamente será la más adecuada para el país comprador. Los expertos locales conocen las necesidades y posibilidades de su propio país, debiendo de esta forma determinar cuál, de las varias opciones que le ofrecerán los vendedores, es la que mejor se adapta a la realidad local.

La compra de una central nuclear debería implicar, necesariamente, un diálogo técnico entre quien operará la planta en nuestro país y la empresa proveedora, en un marco controlado internacionalmente. Este diálogo deberá incluir, entre otros aspectos, definiciones acerca de las garantías de funcionamiento y el grado de respuesta ante las dificultades que aparezcan, la transferencia tecnológica hacia los expertos locales para que estos puedan realizar la operación y el mantenimiento de la central, una contribución en la capacitación de los futuros operarios, la tecnología del ciclo de combustible correspondiente a dicha central y la forma de acceso a dicho combustible, y la metodología y la estrategia para el manejo de los residuos.

También puede analizarse el otro extremo, es decir, el de una alta participación local en la construcción de la planta. Tanto Argentina como Brasil transitaron este camino, lo que resultó en un fuerte empuje para la industria y el desarrollo científico local. Asimismo, contribuyó a la formación de personal altamente calificado que adquirió en esta etapa de su actividad laboral una experiencia muy relevante. Por ejemplo, en Argentina, una consecuencia no despreciable de este proceso fue la creación de la empresa de capitales mixtos INVAP que hoy exporta equipamientos y servicios por cientos de millones de dólares anuales.

Al mismo tiempo, una alta participación local conlleva algunos riesgos. El principal es el hecho de que el proceso puede alargar el tiempo de construcción de la planta y con ello los costos finales de la electricidad de origen nuclear. Esta es la experiencia regional, pero también la internacional. Para el caso uruguayo, teniendo en cuenta el escaso desarrollo industrial del país, estos riesgos podrían incrementarse.

Resulta claro que se debe buscar la optimización del grado de participación nacional en un eventual proyecto nucleoelectrico. Tal fue uno de los temas centrales del antes mencionado taller "Defining Coordinated Activities Based on the Common Users Considerations for Development and Deployment of Nuclear Power Plants for Developing Countries". El OIEA provee herramientas para ayudar a un país a alcanzar esta optimización, basándose en las capacidades locales para desarrollar infraestructura (puertos, carreteras, etc.), capacidades para obras civiles, posibilidades de gerenciamiento, de manufactura local de componentes, procesos o servicios, etc. Para ello resulta necesario estudiar cuales son los nichos en los que la industria y los servicios uruguayos podrían contribuir. Mediante este estudio podría incluso identificarse los sectores que deberían ser apoyados para alcanzar el grado de desarrollo esperable al comienzo de la construcción.

En síntesis, la optimización de la participación nacional en la introducción de la energía nuclear, esto es la búsqueda de un equilibrio esencial entre la maximización del desarrollo local y la minimización de los riesgos, es un tema de crucial relevancia. Especialmente a la hora de hacer una evaluación global del proyecto nucleoelectrico.

10.11 EL EVENTUAL DESARROLLO REGIONAL CONJUNTO

Una alternativa que no puede descartarse *a priori* es la de construir una central en conjunto con alguno de nuestros países vecinos.

Esta alternativa presenta ventajas:

- Tanto Brasil como Argentina poseen varias décadas de experiencia en la industria nuclear y varios miles de profesionales, investigadores y técnicos con una amplia formación en esta temática.
- Al compartirse necesariamente la energía producida con el socio externo, podría instalarse con menores riesgos energéticos una central de unos 700 MW, es decir, un tipo de central que ya se encuentre disponible en el mercado y que cuente con miles de años-reactor de experiencia.
- Sería posible reducir los costos fijos asociados con la tecnología nuclear, por ejemplo, el número de expertos propios, tanto para la operación de la central como para la Autoridad Reguladora, y facilitaría las tareas de formación de recursos humanos.
- Un plan nuclear conjunto le facilitaría a nuestro país el acceso al uranio y a la fabricación de combustible, así como el manejo de los residuos.

En contrapartida, esta alternativa presenta también riesgos importantes:

- Si bien Salto Grande es un ejemplo de generación eléctrica compartida con uno de nuestros vecinos, se genera a partir de un recurso energético común. Una planta nuclear, en cambio, estaría íntegramente ubicada en un único país. En este caso se correría el riesgo de que cualquiera de las dos partes incumpliera los acuerdos de

compra-venta de energía. Un país como el nuestro es tan dependiente del exterior si tiene que comprar energía como si tiene que venderla en un mercado limitado.

- La industria nuclear exige firmeza para mantener políticas de muy largo plazo. Sólo así puede garantizarse que la infraestructura necesaria para que la central funcione se mantenga durante sus 60 años de vida útil. Esto ha sido particularmente difícil para nuestros dos vecinos, a lo largo de su corta historia nuclear, sin perjuicio de que sus centrales han funcionado siempre de manera adecuada. Garantizar esta continuidad, que ya resulta compleja cuando el programa depende de un único país, sería particularmente difícil en caso de involucrarse a más de un país.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de las consideraciones presentadas en este documento la Comisión ha extraído las conclusiones y formulado las recomendaciones que se exponen a continuación.

CONCLUSIONES

Planificación energética:

- La posibilidad de incorporar la energía nuclear a la generación eléctrica de un país se debe analizar en el marco de su política energética, en un contexto en el que se tomen en cuenta las distintas fuentes primarias disponibles, el grado de desarrollo tecnológico, el tamaño del sector eléctrico y los aspectos institucionales, todos ellos específicos de cada país.
- En un grado mucho mayor que para las restantes fuentes energéticas, el desarrollo de un programa nuclear en un país consiste no sólo en la adquisición de una planta de generación, sino que requiere un esfuerzo muy significativo para desarrollar un marco legal, nuevas instituciones, formación de recursos humanos, una cultura específica de la seguridad, un marco internacional adecuado, compromisos a largo plazo, un sustento industrial, económico y financiero, así como una clara aceptación pública, entre otros.
- Un programa nucleoelectrico tiene una duración muy extensa por lo que requiere estabilidad en los lineamientos y políticas por parte del Estado.
- Las recomendaciones del OIEA, que recogen una vasta experiencia mundial, indican que en caso de adoptarse la opción nucleoelectrica y aún con un clima político favorable y con respaldo social, el cúmulo de actividades que un país de escaso desarrollo tecnológico industrial debe llevar adelante para introducir la industria nuclear de manera segura y responsable hace que el plazo mínimo para inaugurar la primera planta difícilmente sea menor a 15 años. De acuerdo a esa recomendación si se decidiese en los próximos años construir una central nuclear en Uruguay, su entrada en servicio no ocurriría antes del año 2025.
- Desde la actualidad hasta el 2025, fecha a partir de la cual podría incorporarse la producción de energía eléctrica de origen nuclear en Uruguay, el país deberá necesariamente desarrollar su generación en base a otras fuentes, por ejemplo, gas natural, carbón, energías renovables e incluso derivados del petróleo. Si se verificase la existencia en Uruguay de yacimientos económicamente explotables de gas natural es probable que la expansión del sistema de generación se haga principalmente con esta fuente, y la incorporación de otras fuentes, incluso la nuclear, sería menos probable o se demoraría en el tiempo.

El tamaño de la central:

- La introducción en un sistema eléctrico de una central de base¹¹⁸ cuya potencia representa un porcentaje significativo de la demanda del sistema, concentra riesgos técnicos, operativos y comerciales:
 - Al incorporarse al sistema quedarían ociosas otras centrales que necesariamente se debieron incorporar con anterioridad para evitar riesgos en el abastecimiento de la demanda. Esto generaría sobrecostos por subutilización de estos recursos.
 - Una parada de la planta podría generar importantes dificultades para abastecer la demanda.
 - Estos riesgos aumentan a medida que se extiende el plazo de implementación del proyecto.
- Las recomendaciones internacionales, en particular el OIEA, establecen que un país no debería instalar en su red eléctrica una central con una potencia superior al 10% del total de la potencia instalada, cualquiera sea su fuente primaria de energía. Para nuestro país, en 2025, esta recomendación implicaría que un módulo unitario de una central no debería superar los 300 a 400 MW de potencia.
- Una central nuclear está diseñada para operar como central de base.
- La potencia de plantas nucleares comercializadas hoy en el mundo es del orden de 700 MW o superior, si bien existen en operación módulos anteriores de potencia menor. Existen en desarrollo reactores para plantas nucleares de un tamaño mejor adaptado al sistema eléctrico nacional. Los fabricantes prevén que estos reactores se encuentren comercialmente disponibles no antes de 10 años, por lo que estos modelos contarían con escasa experiencia operativa en el momento de su eventual compra por nuestro país.
- Los impactos de una central nuclear sobre el sistema eléctrico uruguayo serán significativamente distintos según su tamaño:
 - Si tiene una potencia de 700 MW o superior, existirían impactos negativos originados en sobrecostos para el sistema de generación y en la concentración de riesgos operativos y económicos, que deben ser considerados.
 - Si tiene una potencia de 300 MW o inferior, esos impactos no serían significativos.
- La instalación en nuestro país de una central nuclear de los tamaños comercialmente disponibles (700 – 1.000 MW) podría viabilizarse bajo el supuesto económico de que parte de la energía se exporte de manera firme a los países vecinos y que, a su vez, éstos respalden con certeza ante paradas de la central. Realizar un proyecto en estas hipótesis requeriría de políticas de integración regional muy firmes y con garantías de estabilidad de varias décadas. Otra forma de viabilizar una central de gran porte, sería mediante profundos cambios estructurales en la matriz energética por electrificación de demanda hoy abastecida por otras fuentes.

¹¹⁸ Central de base es aquella que por razones técnicas o económicas, opera a plena carga la mayor parte del tiempo.

Operación de la central nuclear:

- Un país que implementa un programa nucleoelectrico debe contar con una Autoridad Reguladora Nacional Nuclear estatal e independiente de los demás actores del sector nucleoelectrico. Ésta fija y controla las condiciones de operación de las plantas, incluyendo los niveles admisibles de emisión radiactiva al ambiente en operación normal.
- Como todos los estándares de emisión, esos niveles son una convención social basada en la protección de la salud humana, de la salud animal, de los ecosistemas y de otras actividades de las personas.
- En las plantas nucleares se pueden liberar cantidades controladas de radiación sin que por ello se considere que la planta está fuera de operación normal. En particular, las emisiones radiactivas de una central nuclear en funcionamiento normal son significativamente menores que la radiación ambiental media.
- Las centrales nucleares no producen, en operación normal, emisiones gaseosas ni de material particulado significativas. Específicamente, no emiten CO₂, gas vinculado al origen del cambio climático. Sin perjuicio de ello, el resto de las actividades de la cadena de la industria nuclear las producen, pero en su conjunto son inferiores a las de generación eléctrica de origen fósil.
- En operación normal se generan residuos radiactivos los que son gestionados inicialmente dentro de la central.
- Las emisiones líquidas en operación normal no difieren significativamente de aquellas de centrales térmicas convencionales de potencia similar.

La seguridad nuclear:

- La industria nuclear se encuentra muy controlada internacionalmente. Para construir y operar una planta nuclear, Uruguay debería seguir los criterios internacionales de seguridad y bajo el control de la OIEA a fin de permanecer integrado a la comunidad internacional.
- Desarrollar un programa nucleoelectrico implica desarrollar una cultura de la seguridad específica. Todas las personas vinculadas directa o indirectamente a una planta nuclear deben seguir un riguroso proceso de capacitación permanente y requieren autorización de la Autoridad Reguladora Nuclear Nacional.
- Las medidas de seguridad, tanto en aspectos físicos como humanos, se han visto sustancialmente incrementadas en los últimos años.
- En las plantas nucleares pueden ocurrir contingencias con efectos significativos fuera de los confines de la instalación. De acuerdo a la información a la que esta Comisión ha podido acceder, se ha identificado no más de 5 accidentes en plantas nucleares en que los niveles de radiación fuera del recinto de la planta superaron la radiación ambiental media.
- El más grave de estos accidentes fue el de Chernobyl, único accidente con víctimas fatales fuera de los límites de una central. De acuerdo al Foro Chernobyl, las víctimas ocurridas o

que ocurrirían a causa del accidente son unas 4.000 personas entre las 600.000 más expuestas, y otras 5.000 entre otras 6.800.000 que recibieron dosis radiactivas superiores a la ambiente. La consecuencia ambiental más notable es que los suelos, en un radio de 30 km alrededor de la central, quedaron inutilizados para uso agrícola durante unos 30 años. El reactor tenía sistemas de seguridad significativamente inferiores a los de los demás reactores utilizados en otros países aún en ese momento.

- A excepción del caso anterior y de acuerdo a la información a que esta Comisión tuvo acceso, la cultura de la seguridad nuclear ha hecho posible que en los accidentes o incidentes en plantas nucleares, el número de víctimas fatales del personal no ha alcanzado a una decena.
- Con la misma excepción y de acuerdo a la información a que esta Comisión tuvo acceso, en la totalidad de los demás accidentes nucleares, los niveles de exposición radiactiva del individuo más expuesto fuera de los límites de la central no superaron los niveles de radiación ambiente.
- Más allá del impacto sobre los seres humanos, diversos incidentes y accidentes nucleares han tenido consecuencias económicas negativas importantes e incluso, en algunas ocasiones, han provocado el cierre anticipado de plantas nucleares.
- Un reactor nuclear, en un accidente, puede aumentar excesivamente su temperatura, fundiendo así algunas corazas protectoras y eventualmente liberando sustancias radiactivas, pero no puede explotar como una bomba atómica.

El ciclo del combustible:

- Las reservas probadas de uranio a nivel mundial, con la tecnología actual basada en uranio 235, podrían ser suficientes para abastecer el consumo anual total actual durante 80 años. Por su parte, las reservas probables podrían ser suficientes para abastecer el consumo anual total actual durante otros 100 años. Cabe resaltar que el requerimiento anual mundial de los reactores nucleares en operación ha sido suministrado en los últimos años en un 60 % por uranio proveniente de las reservas y el resto ha sido obtenido de fuentes secundarias.
- Existen tecnologías en desarrollo que producen energía a partir del uranio 238 o torio 232, mucho más abundantes que el uranio 235, por lo que podría sostenerse la producción nucleoelectrónica actual por varios milenios. Si bien actualmente funcionan dos reactores con esta tecnología, la misma no se encuentra disponible comercialmente.
- Existen yacimientos de uranio en decenas de países, aunque seis países concentran el 80% de las reservas mundiales: Australia, Kazajistán, Rusia, Sudáfrica, Canadá y Estados Unidos, en orden decreciente de reservas. En la región, Brasil posee un 5% de las reservas mundiales probadas de uranio (corresponde al 7º lugar) y Argentina 0,3%.
- Sólo luego de las campañas prospectivas que se llevarían a cabo en los próximos años será posible saber si nuestro país posee uranio. Su ausencia no inhabilitaría la instalación de la industria nuclear en Uruguay, pero esta información resulta fundamental para determinar la

mejor estrategia de introducción nucleoelectrica, en particular respecto a las definiciones tecnologicas.

- La producción de combustible para una planta nuclear requiere, además de la materia prima, una serie de procesos de alto grado de complejidad tecnológica para la elaboración del elemento combustible propiamente dicho, tanto para uranio natural como enriquecido. La mayor parte de los reactores operativos actualmente en el mundo utiliza uranio enriquecido. El 90% de la capacidad de enriquecimiento de uranio se concentra en cuatro proveedores y las principales plantas se encuentran en Rusia, EEUU, Francia, Reino Unido, Alemania y Holanda. El 90% de la capacidad de fabricación de combustible para estos reactores se concentra en seis proveedores y los países con las mayores capacidades son EEUU, Rusia, Kazajistán, Japón y Francia. Por otro lado, empresas de Canadá, Argentina, China, India, Corea y Rumania fabrican combustible para reactores de uranio natural. Brasil y Argentina producen el elemento combustible para su consumo propio.
- Una central nuclear genera residuos radiactivos de alta, media y baja actividad. Actualmente existen soluciones para la disposición de los residuos de media y baja actividad.
- En cuanto a los residuos de alta actividad, que tienen una vida media que va desde decenas de miles hasta millones de años, existen soluciones diseñadas para la etapa inicial, entre uno y tres siglos, las cuales han funcionado satisfactoriamente hasta el presente.
- No existe aún en el mundo una solución definitiva implementada para los residuos de alta actividad. En general, se considera como la alternativa para la disposición final de esos residuos la construcción de un depósito definitivo en capas geológicas estables y secas (repositorio). Asimismo, existe intensa investigación y desarrollo para mejorar las alternativas.
- El volumen de residuos que se produciría en una central nuclear en Uruguay es relativamente pequeño. Para un volumen tan limitado, la financiación de un repositorio propio, siguiendo las estrategias actuales, debe estudiarse en detalle.
- El reprocesamiento de combustible quemado, enviándolo a países que manejan esa tecnología, implica recibir las cenizas de dicho proceso las que tienen volumen menor, pero siguen siendo residuos de alta actividad. Por otro lado, la posibilidad que países nucleares reciban la totalidad del combustible quemado, lo que resolvería el problema de la disposición final para Uruguay, puede considerarse por ahora remota.

Consideraciones económicas:

- Dadas las incertidumbres existentes, no es posible afirmar con certeza que el costo medio de la energía de origen nuclear en Uruguay sea sistemáticamente mayor o menor respecto a otras alternativas de generación de base que emplean combustibles fósiles.
- Las variables más relevantes para determinar el costo medio de la energía nuclear son: el costo de inversión de la planta, la tasa de descuento y el plazo de ejecución del proyecto.
- En lo que se refiere al monto de la inversión de una planta nuclear, el mismo se establece luego de negociaciones específicas entre el país comprador y la empresa vendedora. No se

encuentra disponible información que permita determinar a priori con certeza el precio de una nueva central nuclear, lo que dificulta la comparación de la opción nuclear con otras opciones energéticas. De acuerdo a la información recabada por esta Comisión, los costos de inversión asociados a una nueva planta nuclear presentan gran dispersión, pudiendo estimarse entre 3.000 y 5.000 USD/kW instalado, no incluyendo los intereses durante la construcción.

- Para una central de 700 MW la inversión sería del orden de 3000 millones de dólares, magnitud comparable al 50% del presupuesto anual actual del Estado uruguayo. Esto implica una concentración muy significativa en un sólo proyecto de los riesgos económicos, dado el tamaño del sector eléctrico y de la economía del país.
- El combustible tiene una baja incidencia en el costo medio de la energía eléctrica de origen nuclear, entre diez y quince por ciento, lo cual reduce las consecuencias de la incertidumbre en el precio de la misma. Esta incertidumbre puede acotarse aún más mediante la compra anticipada del combustible para varios años. Si bien el costo del combustible es menor dentro de la estructura de costos de la energía nucleoelectrónica, es necesario seguir su evolución internacional. El precio del uranio ha aumentado con un factor no menor a siete en los últimos ocho años en el mercado spot mientras que en el mercado de contratos de medio y largo plazo, donde se comercializa la mayor parte de éste, aumentó menos de un 50%.
- La disposición final de los residuos de una planta nuclear podría implicar montos hoy indeterminados a erogarse mucho después de terminada la vida útil de la central. Si bien al aplicar tasas de descuento a dichos montos su valor presente podría ser insignificante, la disposición final genera un problema económico de largo plazo para el que es necesario definir previamente una solución financiera.
- En un proyecto de generación nucleoelectrónica, cuyo plazo para la puesta en marcha de la primera central es no menor a 15 años, la erogación de montos significativos del proyecto se realiza durante la segunda mitad del mismo, con la adquisición de la planta, o sea en los últimos 7 u 8 años.
- La introducción de la industria nuclear en nuestro país podría generar un impacto positivo en el desarrollo de procesos de alto contenido tecnológico y en la cultura de la seguridad a todos los niveles.

La opinión ciudadana:

- El desarrollo de un programa nucleoelectrónico requiere, además de un clima político favorable, un grado importante de aceptación por parte de la ciudadanía.
- A lo largo de la elaboración de un proyecto nucleoelectrónico, es necesario que la ciudadanía disponga de canales de participación que permitan considerar, en el proyecto, sus opiniones y ópticas dando robustez a las decisiones que se adopten.
- La localización de una planta nuclear requiere un cuidadoso análisis que incluye aspectos técnicos, ambientales, sociales, económicos y jurídicos y una adecuada comunicación.

En suma, esta Comisión puede afirmar que:

- *El país no se encuentra hoy en condiciones de adoptar una decisión definitiva respecto de iniciar un programa nucleoelectrico. Se identificaron aspectos que deben ser estudiados en mayor profundidad para poder tomar una decisión fundamentada.*
- *Del análisis realizado no surgen elementos que descarten a priori la opción nucleoelectrica como una alternativa para nuestro país en el largo plazo.*
- *Una central nuclear instalada en nuestro país dificilmente aportará al sistema eléctrico nacional antes del 2025.*

RECOMENDACIONES

Para poder tomar una decisión fundamentada respecto a la conveniencia de adoptar o no la alternativa nuclear en nuestro país, esta Comisión estima adecuado seguir las recomendaciones del OIEA sobre los hitos en el desarrollo de infraestructura nucleoelectrica¹¹⁹. El camino propuesto se divide en tres fases. El OIEA entiende que un país sólo se encontrará en la situación requerida para tomar una decisión técnica, económica, ambiental, política y socialmente sustentable al final de la primera fase.

Esta primera fase, de análisis, producirá elementos de juicio para una decisión fundamentada respecto del inicio de un programa nucleoelectrico. La misma posee una duración no menor a dos años y puede conducir a una de las siguientes conclusiones respecto a la opción nucleoelectrica:

- que no sea adecuada para Uruguay
- que sí sea adecuada, por lo que se pasa a la siguiente fase
- que las incertidumbres sobre variables esenciales permanezcan por lo que no resulte conveniente tomar una decisión definitiva y en consecuencia sea recomendable mantener el tema abierto y sin resolución, realizando un seguimiento de esas variables

En caso de que la fase de análisis finalice con una resolución positiva, podrá abordarse la segunda fase, de construcción de la infraestructura necesaria para el sustento de un programa nuclear (marco institucional y legal, formación de recursos humanos, etc), seguida de la tercer fase en la que se seleccione la tecnología más adecuada, se compre la central y se comience su construcción. Cabe destacar que los trabajos de la fase de análisis, en caso de decidir continuar con las fases posteriores, constituyen insumos relevantes que permitirían abordarlas en forma más eficiente, rápida y económica.

Esta Comisión recomienda abordar la fase de análisis.

La duración definitiva de esta fase, aún contando con un adecuado apoyo político y presupuestal, dependerá tanto de factores externos al país como del grado de involucramiento

¹¹⁹ "Milestones in the Development of a National Infrastructure of Nuclear Power" OIEA Sept. 2007

de la ciudadanía en el proceso de discusión pública. Es importante señalar que la fase de análisis no implica el comienzo de un programa nucleoelectrico dado que podría concluir en una decisión negativa.

La Comisión recomienda que, en esta fase de análisis, se contemplen al menos los aspectos siguientes:

- Seguir la evolución tecnológica de los reactores de porte mejor adaptado a la realidad de nuestro país y evaluar las fechas de su disponibilidad comercial, su confiabilidad técnica y su costo.
- Favorecer los vínculos internacionales, en particular para la integración energética regional, en la ciencia y tecnología nuclear y con los países proveedores de la tecnología.
- Realizar los proyectos de inversión con énfasis en la seguridad del financiamiento. La experiencia internacional muestra que un corte en el flujo de dinero preprogramado ha tenido consecuencias económicas negativas muy importantes.
- Determinar las necesidades y las posibles opciones de participación nacional en el proyecto de introducción de la tecnología nuclear en el país, tanto para la adquisición y construcción como para la operación y mantenimiento de la central.
- Estudiar cuál sería la mejor estrategia para el tratamiento de los residuos nucleares en el país a la luz de la información disponible internacionalmente. Ello implica seguir de cerca la evolución de las estrategias tecnológicas de gestión de los residuos desarrolladas en el exterior.
- Elaborar los lineamientos de un plan para la capacitación de recursos humanos, que defina cómo se alcanzaría la formación de los técnicos, profesionales e investigadores que requiere cada etapa de un eventual programa nuclear.
- Realizar una evaluación ambiental estratégica, determinando las exigencias ambientales para el licenciamiento de las instalaciones nucleares en el país, particularmente definiendo los criterios ambientales para la localización de plantas nucleares y de depósitos de residuos, los estándares de calidad ambiental en materia de radiaciones ionizantes, los estándares de emisión específicos y los lineamientos para la gestión de los residuos. Definir un cronograma de las necesidades para cada etapa.
- Diseñar un marco institucional adecuado. Ello implicará identificar el conjunto de instituciones a crear o potenciar, sus competencias y sus vinculaciones con el resto de las instituciones del Estado. Se identifica a priori la necesidad de contar, para el desarrollo de un programa nucleoelectrico, con una Autoridad Reguladora Nuclear Nacional independiente, una institución que actúe como promotora de esta opción y un operador de la central. De acuerdo a las recomendaciones internacionales no es compatible que un mismo organismo promueva, opere y regule o fiscalice una central nuclear.

Asimismo es necesario definir un plan para el desarrollo de esas instituciones con etapas y metas claramente definidas. Esto es particularmente crucial en el caso de la Autoridad Reguladora Nuclear Nacional, que debe contar con una estructura técnica mínima en materia nucleoelectrica desde el momento en que se toma la eventual decisión de comenzar un programa nucleoelectrico.

- Elaborar en base a la experiencia internacional, los lineamientos primarios de un marco normativo (legal y reglamentario) coherente y consecuente con el marco institucional y los tratados internacionales suscritos por el país. Asimismo, deberá identificar los requisitos para los licenciamientos de construcción y operación de una central y las regulaciones técnicas y ambientales aplicables. Se identificarán las acciones y etapas a seguir para su concreción.
- Releva la opinión de la ciudadanía a los efectos de conocer su posición inicial respecto a un eventual programa nucleoelectrico identificando las necesidades de información y los medios más adecuados para proveerla.
- Llevar adelante una campaña de divulgación de información seria y fundada que tenga en cuenta todas las visiones sobre la energía nuclear.
- A lo largo de la fase de análisis, se deberían desarrollar instancias de participación pública, en el entendido que una eventual decisión de instalar una central nuclear exige que tanto los aspectos técnicos, económicos como los sociales sean favorables. La percepción de los actores sociales podría relevarse mediante una consulta formal a la ciudadanía, al final de la fase de análisis.

Esta Comisión entiende que, para realizar estas actividades, es conveniente adoptar la recomendación del OIEA¹²⁰ de crear un grupo de trabajo encargado de conducir la fase de análisis, cuya función sea coordinar la preparación de la información necesaria para que las autoridades competentes puedan tomar una decisión técnicamente fundamentada, avalada por la opinión pública y sus organizaciones políticas y sociales. Al mismo tiempo, en el caso en que la decisión resultara positiva, este proceso inicial de análisis deberá dejar preparado el camino para que la introducción de la industria nucleoelectrica en el país se realice de la manera más rápida y eficiente.

Como recomienda el OIEA, este grupo debe “responder al Ministerio de Energía o equivalente”. Dada la complejidad y amplitud de las actividades enumeradas, será necesario que dicho grupo trabaje en coordinación con todas las instituciones involucradas en esta iniciativa, entre otros, además del Ministerio de Industria y Energía, con los Ministerios de Economía y Finanzas, de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, de Relaciones Exteriores, de Defensa, de Salud Pública, UTE, e instituciones académicas. Asimismo, se estima conveniente que el proceso se realice considerando las visiones de las diferentes organizaciones sociales y políticas.

Inicialmente, este grupo podría estar constituido por unos pocos expertos, no necesariamente de todas las áreas involucradas en la opción nucleoelectrica, pero debe tener el presupuesto adecuado para poder contratar estudios nacionales o internacionales en aquellos temas en los cuales no existen capacidades desarrolladas en el país. Asimismo, es necesario que el grupo sea rentado, para garantizar una dedicación importante a la tarea.

En cuanto a la composición de este grupo de trabajo, una de las recomendaciones del OIEA es que esté constituido por personas de reconocido prestigio en su área de especialidad, con sólidos conocimientos técnicos y, lo que resulta más fuertemente recomendable, sin haber

¹²⁰ “Milestones in the Development of a National Infrastructure of Nuclear Power” OIEA Sept. 2007

mostrado a priori una posición, ni a favor ni en contra, en relación a la opción nuclear. Estas características son esenciales para que el conjunto de la ciudadanía pueda confiar que el trabajo será realizado de manera imparcial y profesional y que las autoridades puedan confiar que sus recomendaciones estarán sólidamente fundamentadas. Esta Comisión recomienda también que las personas que integren el grupo de trabajo tengan buena capacidad de diálogo para poder interactuar con los diversos grupos de opinión o referentes sociales que han tomado posición en relación a la opción nucleoelectrica en nuestro país.

Definir si se inicia el camino nuclear representa un desafío de una relevancia poco usual en la realidad nacional, en un tema particularmente sensible como el energético. Esta decisión tiene consecuencias que atraviesan la sociedad, requieren planificación a largo plazo y estabilidad en las decisiones políticas.