



Oportunidades y retos de la energía nuclear en México

Carlos Villanueva Moreno

**Banco
Interamericano de
Desarrollo**

Departamento de
Infraestructura y Medio
Ambiente

**Nota Técnica
No. 170**

Oportunidades y retos de la energía nuclear en México

Carlos Villanueva Moreno



Banco Interamericano de Desarrollo

2010

© Banco Interamericano de Desarrollo, 2010
www.iadb.org

Las “Notas técnicas” abarcan una amplia gama de prácticas óptimas, evaluaciones de proyectos, lecciones aprendidas, estudios de casos, notas metodológicas y otros documentos de carácter técnico que no son documentos oficiales del Banco. La información y las opiniones que se presentan en estas publicaciones son exclusivamente de los autores y no expresan ni implican el aval del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Director Ejecutivo ni de los países que representan.

Este documento puede reproducirse libremente a condición de que se indique que es una publicación del Banco Interamericano de Desarrollo.

1300 New York Ave. N.W. Washington D.C. 20577. Stop W0616.

Oportunidades y retos de la energía nuclear en México¹

Carlos Villanueva Moreno

Resumen

En la década de 1950, las primeras centrales nucleoelectricas iniciaron su operación comercial en algunos países de Europa y en Estados Unidos y, desde entonces, ha habido en 31 países un crecimiento moderado de la capacidad instalada y la generación con energía nuclear, que ahora representa el 17% del total de electricidad mundial. Actualmente se vislumbra la reanudación de la construcción de centrales nucleares en algunos países y la construcción de la primera central en otros. En el seminario internacional “La Nucleoelectricidad en México y en el Mundo” se examinó la situación de los programas nucleoelectricos en varios países, incluidos Argentina, Bélgica, Canadá, Chile, Francia y México. Asimismo, se analizaron las actividades de apoyo a los programas que realizan el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), la Agencia de Energía Nuclear de la OCDE y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta nota técnica contiene una síntesis de lo expuesto en el seminario y se discuten las mejores prácticas y lecciones

¹ Este trabajo fue realizado con información recabada en el seminario internacional “La Nucleoelectricidad en México y en el Mundo” y en breves entrevistas realizadas durante el evento a los participantes extranjeros, entre ellos, los señores Pal Vincze, del OIEA; Alexey Lokhov, de la AEN; Leandro Alves y Jesús Tejeda, del BID; Gonzalo Gutiérrez, de la CCHEN; Rubén Semmoloni, de la NASA; Luc Geraets, de GDF Suez; y Duncan Hawthorne, de Bruce Power.

Adicionalmente, se recopiló valiosa información sobre la génesis y el desarrollo del proyecto nucleoelectrico Laguna Verde, así como de la prospectiva en la materia eléctrica durante extensas entrevistas con los señores Juan Eibenschutz Hartman, de la CNSNS; Raúl Ortiz Magaña, del ININ; Eugenio Laris Alanís, Gonzalo Arroyo Aguilera y Miguel Medina Vaillard, de la CFE; José Miguel González Santaló, del IIE; Juan Luis Francois, de la UNAM; así como con los señores Carlos Vélez Ocón y César García Martínez, ex funcionarios del OIEA y de la CFE respectivamente, que ahora se desempeñan como consultores.

A todos ellos se les agradece su valiosa colaboración e información para enriquecer esta nota técnica. Finalmente se reconoce el trabajo de Jesús Tejeda Ricardez, del BID y de Angélica Vélez Médicis (consultora internacional) en la revisión del contenido y edición de la nota. Se agradece también los comentarios de Gastón Astesiano y de Haydemar Cova León durante la revisión del documento por parte de la División de Energía del BID.

aprendidas en la generación de electricidad con energía nuclear en varios países, se analizan las ventajas y desventajas de la generación de electricidad con energía nuclear, se exponen las oportunidades y los retos, así como los hitos en el desarrollo de un programa nucleoelectrico.

Contenidos

Siglas y acrónimos	viii
Lista de cuadros y gráficos	xii
Capítulo 1	
Resumen ejecutivo	1
Síntesis y resultados del seminario internacional	1
Mejores prácticas y lecciones aprendidas	3
Ventajas y desventajas	4
Oportunidades y retos	5
Hitos en el desarrollo de un programa	6
Capítulo 2	
Síntesis y resultados del seminario internacional “La nucleoelectricidad en México y en el mundo”	8
Sesión I.	
Los organismos multilaterales: beneficios y desafíos de la generación nucleoelectrica, sus programas actuales y mecanismos de colaboración	10
Sesión II.	
Actualidad y prospectiva de los países participantes: situación vigente, planes a futuro y el porqué del reinicio del desarrollo nucleoelectrico	17
Sesión III.	
México: la situación actual y los planes a futuro del desarrollo nucleoelectrico	26
Conclusiones	35
Capítulo 3	
Mejores prácticas y lecciones aprendidas en energía nuclear en varios países	38
México	38
Francia	44

Estados Unidos	45
Canadá	48
Finlandia	49
República de Corea	50
Argentina	51
Brasil	54
India	56
China	60
Principales recomendaciones	64
Resumen de la capacidad y generación nucleoelectrica mundial	68
Capítulo 4	
Ventajas y desventajas de la generación nucleoelectrica	72
Economía	73
Limpieza	77
Seguridad	80
Confiabilidad	83
Capítulo 5	
Oportunidades y retos de un programa nucleoelectrico	86
Impacto socioeconómico	86
Impacto ambiental	89
Impacto en el sistema eléctrico interconectado	91
Seguridad física de las instalaciones y materiales nucleares	93
Salvaguardias y no proliferación	94
Manejo de residuos radiactivos y contaminación	95
Capítulo 6	
Hitos en el desarrollo de un programa nucleoelectrico	97
Etapa I: Planeación y estudios de factibilidad	98
Etapa II: Licitación, construcción y puesta en servicio	99

Etapa III: Operación comercial y mantenimiento	100
Etapa IV: Desmantelamiento de la central y manejo del combustible irradiado	102
Anexo	
Notas periodísticas	105
Bibliografía	115
Lista de sitios de web de empresas y organismos	123

Siglas y acrónimos

ABACC	Agencia Brasileño-Argentina de Contabilidad y Control de Materiales Nucleares
AEC	Comisión de Energía Atómica de los Estados Unidos
AEC	Comisión de Energía Atómica de India
AEN	Agencia de Energía Nuclear
AECL	Atomic Energy of Canada, Limited
AHWR	Reactor avanzado de agua pesada
AI	Academia de Ingeniería
AIE	Agencia Internacional de Energía
ALLEGRO	Reactor rápido de cría enfriado con gas
APEC	Foro de Cooperación Económica Asia-Pacífico
ASTRA	Reactor rápido de cría enfriado con Sodio líquido
ATMEA1™	Reactor de mediano tamaño de la generación III+
BAHVINI	Baratiya Nabhibiya Vidyut Nigan, Ltd.
BARC	Bhaba Atomic Research Centre
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
BWR	Reactor moderado y enfriado con agua ligera en ebullición
CANDU	Reactor del tipo canadiense, de agua pesada como moderador y refrigerante
CAREM	Central Argentina de Elementos Modulares
CCHEN	Comisión Chilena de Energía Nuclear
CEA	Comisión de Energía Atómica de Francia
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CFER	Reactor rápido de cría chino, experimental
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas de España
CIER	Comisión de Integración Eléctrica Regional
CNE	Comisión Nacional de Energía de Chile
CNEA	Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina

CNEN	Comisión Nacional de Energía Nuclear de México
CNEN	Comisión Nacional de Energía Nuclear de Brasil
CNNC	China National Nuclear Corporation
CNSC	Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear
CNSNS	Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONUEE	Comisión Nacional para el Uso Eficiente de Energía
COPAR	Costos y parámetros de referencia para la formulación de proyectos de inversión del sector eléctrico
DAE	Departamento de Energía Atómica de India
DFEC	Donfang Electric Corporation
EDF	Electricité de France
Eletronuclear	Eletronuclear, S. A.
EPR	Reactor europeo de agua ligera presurizada
FBR	Reactor rápido de cría
GCR	Reactor enfriado con gas
HWB	Heavy Water Board
HTGR	Reactor de alta temperatura enfriado con gas
IAEA	International Atomic Energy Agency
IGCAR	Indira Gandhi Centre for Atomic Research
IIE	Instituto de Investigaciones Eléctricas
INEN	Instituto Nacional de Energía Nuclear
ININ	Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
INPO	Instituto de Operaciones Nucleoeléctricas
INPRO	Proyecto internacional sobre reactores nucleares y sus ciclos de combustible innovadores
IPN	Instituto Politécnico Nacional
IRENA	International Renewable Energy Agency
IRIS	International Reactor Innovative and Secure
KWU	Kraftwerk Union
LWGR	Reactor de agua ligera moderado con grafito

MAEP	Ministerio de Energía Atómica e Industria de Rusia
MERCOSUR	Mercado Común del Sur
MHI	Mitsubishi Heavy Industries
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NASA	Nucleoeléctrica Argentina, S. A.
NFCH	Nuclear Fuel Complex Hyderabad
NPCIL	National Power Corporation of India, Ltd.
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica
OLADE	Organización Latinoamericana de Energía
OPANAL	Organización para la Proscripción de las Armas Nucleares en América Latina y el Caribe
PRONASE	Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía
PHWR	Reactor moderado y enfriado con agua pesada
PWR	Reactor moderado y enfriado con agua ligera presurizada
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SENER	Secretaría de Energía
SCCC	Sistema común de contabilidad y control de materiales nucleares
SIC	Sistema Interconectado Central de Chile
SIEPAC	Sistema de Interconexión Eléctrica para América Central
SinoU	China Nuclear International Uranium Corporation
Tenex	Texhsnabexport
TNP	Tratado sobre la No Proliferación de las Armas Nucleares
Tratado de Tlatelolco	Tratado para la Prohibición de las Armas Nucleares en América Latina y el Caribe
TRIGA	Reactor de investigación y producción de radioisótopos General Atomic
UAEM	Universidad Autónoma del Estado de México
UAM	Universidad Autónoma Metropolitana
UAZ	Universidad Autónoma de Zacatecas

UCIL	Uranium Corporation of India, Ltd.
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
UNASUR	Unión de Naciones Suramericanas
URAMEX	Uranio Mexicano
USDOE	United States Department of Energy
USNRC	United States Nuclear Regulatory Commission
UV	Universidad Veracruzana
VHTR	Reactor de muy alta temperatura
VVER	Reactor de tipo ruso, moderado y enfriado con agua ligera
WEC, México	Capítulo México del Consejo Mundial de Energía

Lista de cuadros y gráficos

Cuadros

<i>Cuadro 3.1.</i> Capacidad mundial instalada y generación nucleoelectrica en 2009	68
<i>Cuadro 3.2.</i> Capacidad nuclear en construcción y planeación en 2009	70
<i>Cuadro 4.1.</i> Costos de inversión y de generación de centrales eléctricas diseñadas para operar en Estados Unidos en la carga base y otras	74
<i>Cuadro 4.2.</i> Costos de inversión y de generación de centrales eléctricas diseñadas para operar en México en la carga base y otras	75
<i>Cuadro 4.3.</i> Costos de inversión y de generación de centrales eléctricas diseñadas para operar Brasil en la carga base y otras	76
<i>Cuadro 4.4.</i> Estimación de las emisiones de CO ₂ a la atmósfera en la generación mundial de electricidad en 2007	78
<i>Cuadro 5.1.</i> Estimación del valor presente de los costos de una central nucleoelectrica de 1,350 MWe	87
<i>Cuadro 5.2.</i> Estimación de los factores de emisión unitaria de CO ₂ a la atmósfera en la generación mundial de electricidad en 2007	90
<i>Cuadro 5.3.</i> Beneficios y costos del sistema eléctrico interconectado por el desempeño de una central nucleoelectrica de 1.350 MWe en una vida útil de 40 años	92

Gráficos

Gráfico 4.1. Factor de disponibilidad de energía en toda la vida útil de los reactores.	84
Gráfico 6.1. Etapas en la ejecución de un programa nucleoelectrico y en la construcción y operación de la primera central	97
Gráfico 6.2. Principales tareas de la etapa I de un programa nucleoelectrico	98
Gráfico 6.3. Principales tareas de la etapa II de un programa nucleoelectrico	99
Gráfico 6.4. Principales tareas de cada ciclo de la etapa III de un programa nucleoelectrico	101
Gráfico 6.5. Tareas durante la ejecución de la etapa IV de un programa nucleoelectrico	103

1. Resumen ejecutivo

El objetivo de esta nota técnica es divulgar información certera y actualizada sobre las experiencias internacionales y regionales en la generación y expansión de la energía nuclear. Con este fin, el presente documento da a conocer la síntesis y los resultados del seminario internacional “La Nucleoelectricidad en México y en el Mundo”, que se celebró en la ciudad de México, el 13 y el 14 de mayo de 2010. Adicionalmente y como parte complementaria, en el documento se identifican las mejores prácticas y lecciones aprendidas en 10 países de diversas regiones del mundo que han emprendido programas nucleoelectricos; se analizan las ventajas y desventajas de la generación nucleoelectrica; se exploran las oportunidades y los retos que presenta la ejecución de un programa nucleoelectrico; y se comentan los hitos en el desarrollo de dichos programas.

En el escrito se analiza principalmente la generación nucleoelectrica como una opción entre las tecnologías comerciales que existen para satisfacer la demanda en la carga base de los sistemas eléctricos interconectados. Se reconoce que las energías renovables, como la eoloelectrica, la solar térmica y la solar fotovoltaica, presentan ventajas medioambientales superiores a las demás tecnologías de generación. Sin embargo, debido a la intermitencia de sus recursos, se complica su contribución en la capacidad firme del sistema eléctrico interconectado dificultando el suministro eléctrico en la carga base, como es el caso de la generación hidráulica a gran escala, los combustibles fósiles y la energía nuclear.

A continuación se compila un resumen de los puntos sobresalientes que se discuten con detalle en las respectivas secciones de la nota técnica.

Síntesis y resultados del seminario internacional

El seminario se realizó en tres sesiones: la primera dedicada a los organismos multilaterales; la segunda, a la actualidad y prospectiva mundial; y la tercera, al caso de México.

- En la sesión I, los organismos multilaterales presentaron los objetivos y programas de acción de sus respectivas organizaciones y detallaron los mecanismos de cooperación

que pueden brindar a los países interesados en estudiar la factibilidad de emprender un programa nucleoelectrico.

- En la sesión II participaron funcionarios de Argentina, Bélgica, Canadá, Chile y Francia. Chile reseñó los trabajos preliminares que se han realizado para analizar la factibilidad de construir la primera central nuclear en ese país. El representante de Francia y Bélgica relató la génesis y evolución del programa nucleoelectrico en ambos países, y se refirió a los trabajos que se realizan en Francia para el diseño y la construcción futura de reactores avanzados de la Generación IV. Argentina relató las actividades que se han desarrollado para crear una industria nuclear nacional y los planes que hay para construir centrales nucleares adicionales a las que ya operan en el país. Finalmente Canadá presentó brevemente la historia de la energía nucleoelectrica en ese país y los trabajos para diseñar y construir reactores de nueva generación.
- En la sesión III participaron funcionarios de la Comisión Federal de Electricidad, de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, de la Academia de Ingeniería y del Capítulo México del Consejo Mundial de Energía.
 - ✓ El Gerente de Centrales Nucleoelectricas de la Comisión Federal de Electricidad se refirió principalmente al desempeño que ha mostrado la central Laguna Verde desde el inicio de operación de la primera unidad en 1989, así como a los trabajos en curso para incrementar en un 20% la potencia original de los dos reactores. También se refirió al estudio que ha publicado en conjunto con la Academia de Ingeniería acerca de las oportunidades que representa reanudar el programa de centrales nucleares en México.
 - ✓ El Director General de la Comisión de Seguridad Nuclear y Salvaguardias mostró y explicó la estructura jerárquica de las leyes, los reglamentos y las normas que constituyen el marco regulatorio de la energía nuclear para usos pacíficos en México.
 - ✓ El Director General del Instituto de Investigaciones Nucleares reseñó la creación y evolución en México de las instituciones responsables de la investigación y el desarrollo en materia nuclear, y señaló las capacidades actuales para apoyar un programa de centrales nucleoelectricas.

- ✓ El Presidente de la especialidad de Ingeniería Nuclear de la Academia de Ingeniería explicó las capacidades que poseen las instituciones de educación superior en México para la enseñanza de la ciencia y tecnología nuclear, así como también para la formación de los recursos humanos necesarios en todas las etapas de un programa nucleoelectrico.
- ✓ Finalmente, la Presidenta del Capítulo México del Consejo Mundial de Energía habló sobre las capacidades de la industria nacional para participar en el suministro de equipos y componentes para las centrales de un futuro programa nucleoelectrico en México.

Como resultado del seminario, los actores políticos y del sector energético conocieron y discutieron ampliamente sobre el estado actual del desarrollo de la energía nuclear con fines pacíficos en México y en el mundo, y acerca de las actividades que los organismos multilaterales pueden desarrollar para apoyar a la reanudación de un programa nucleoelectrico. Se concluyó que existe en el país la infraestructura básica y la experiencia para emprender nuevamente la construcción de centrales nucleares, pero que es necesario fortalecer las instituciones del sector que participarían en tal empresa; así como contar con una amplia participación de todos los actores políticos, privados y académicos relevantes.

El consenso que se deriva de las presentaciones del seminario es que la generación de electricidad por medios nucleares brinda una opción más a ser analizada entre las tecnologías comerciales que existen para satisfacer la demanda en la carga base de los sistemas eléctricos interconectados.

Mejores prácticas y lecciones aprendidas

Las principales lecciones aprendidas por los países que han emprendido programas nucleoelectricos son:

- Es necesario controlar el tiempo de construcción y puesta en operación de las centrales.
- Se requiere lograr elevados índices de disponibilidad y altos factores de capacidad durante la operación de las centrales a lo largo de su vida útil.
- La seguridad en la operación de las centrales nucleoelectricas debe tener prioridad sobre la satisfacción de la demanda de los sistemas eléctricos.

- La generación nucleoelectrica es un asunto de incumbencia internacional, extensamente regulado por una estructura jurídica que fija normas internacionales de seguridad nuclear y radiológica, así como de seguridad física y de salvaguardias de las instalaciones y los materiales nucleares, para vigilar que se utilice de manera adecuada.
- El fomento y el desarrollo oportuno de las capacidades locales es uno de los mecanismos para lograr el éxito de los programas nucleares con fines pacíficos.
- La nucleoelectricidad contribuye favorablemente a disminuir las emisiones totales de CO₂ a la atmósfera.

Las mejores prácticas que se derivan como consecuencia de las lecciones aprendidas se discuten ampliamente en la correspondiente sección de esta nota.

Ventajas y desventajas

La generación de energía eléctrica con centrales nucleares tiene una serie de características técnicas, económicas y ambientales que favorecen su empleo como una de las pocas alternativas eficientes para satisfacer la demanda de la carga base de los sistemas eléctricos interconectados.

Las principales ventajas son:

- El costo de la electricidad generada es competitivo frente a otras opciones tecnológicas para satisfacer la demanda de la carga base de los sistemas eléctricos interconectados.
- En los reactores nucleares, el proceso físico de producción de energía es la fisión con neutrones de uranio y plutonio, en la cual no se liberan a la atmósfera CO₂ y otros gases de efecto invernadero.
- El uranio es un elemento abundante en la naturaleza y su costo es relativamente bajo y estable, al igual que el de las etapas del ciclo de combustible nuclear.
- Los poderes caloríficos del uranio y el plutonio son elevados, por lo que se necesitan masas muy pequeñas para producir una gran cantidad de energía.
- El volumen de residuos y productos de la fisión también es bajo. Además, el manejo del combustible irradiado se realiza con severas medidas de seguridad física, nuclear y radiológica, conforme a un régimen internacional de seguridad nuclear y salvaguardias.

- Los programas de garantía de calidad de la industria nucleoelectrica permiten que las centrales alcancen una alta disponibilidad durante su operación comercial, que da lugar a factores de capacidad elevados durante toda su vida útil.

Las principales desventajas son:

- El costo unitario de inversión es elevado y el período de construcción es largo, lo que da lugar a acumular significativos intereses durante la etapa preoperativa de las centrales.
- El proceso de fisión del uranio y el plutonio en los reactores da lugar a la formación de radioisótopos, en algunos casos de vidas medias largas.
- El manejo del combustible irradiado está sujeto a salvaguardias internacionales para evitar que el uranio y el plutonio residuales se desvíen hacia usos no pacíficos.
- En la mayoría de los diseños de reactores se requiere que se detenga la operación para realizar el recambio de combustible y para mantenimiento, lo que reduce el factor de disponibilidad.

Oportunidades y retos

La ejecución de un programa nacional de planeación, construcción, puesta en servicio, operación y desmantelamiento de centrales nucleoelectricas es una iniciativa nacional que tiene implicaciones de muy largo plazo para los gobiernos y las entidades públicas y privadas que participan en las diferentes etapas del programa.

Los principales retos y oportunidades que se les presentan a los países en la ejecución de un programa nacional son los siguientes:

- En materia socioeconómica, al inicio del programa el reto más grande es financiar y aplicar oportunamente la elevada inversión requerida. La oportunidad que se presenta es erogar localmente tal inversión, promoviendo la participación de la industria y de las firmas de ingeniería nacionales.
- En materia ambiental, la ejecución de un programa de centrales nucleoelectricas le brinda al país la oportunidad de contribuir positivamente al esfuerzo mundial para reducir la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera.
- Respecto de la operación del sistema eléctrico interconectado, el costo unitario por concepto del combustible nuclear es muy pequeño. Esta ventaja comparativa es

importante y a las empresas eléctricas se les presenta la oportunidad de operar con elevados factores de capacidad.

- En materia de seguridad física de las instalaciones y los materiales nucleares, a los países se les presenta el importante reto de implantar en las industrias nucleares sistemas de vigilancia y contabilidad de dichos materiales, además de instalar y operar sistemas de seguridad física para evitar que sean sustraídos de las instalaciones o desviados hacia usos no autorizados.
- En el contexto del esquema jurídico, administrativo y técnico de salvaguardias internacional, existen retos a los que se enfrentan los gobiernos de los países que emprenden programas nucleoelectricos. En primer lugar, acceder a los instrumentos internacionales de no proliferación, como el Tratado de Tlatelolco para los países de América Latina y el Caribe, y el Tratado de No Proliferación en el ámbito global. En segundo lugar, celebrar con el Organismo Internacional de Energía Atómica los acuerdos de salvaguardias correspondientes.
- En materia de manejo de residuos radiactivos y contaminación, el reto de más largo plazo para los gobiernos y las instituciones responsables es elaborar una política nacional para las etapas posteriores del ciclo de combustible. Después, es necesario decidir el destino final de los residuos nucleares y los desechos radiactivos, y diseñar, construir, poner en servicio y operar durante muchos años las instalaciones relevantes.

Hitos en el desarrollo de un programa

El desarrollo de un programa de centrales nucleoelectricas es un compromiso nacional de muy largo plazo que, a nivel internacional y nacional, tiene implicaciones jurídicas, regulatorias, tecnológicas, económicas y financieras, políticas, sociales y ambientales que se retroalimentan y se extienden durante varias décadas. La ejecución del programa se divide en cuatro etapas de distinta duración y complejidad. El término de cada una de las etapas y el inicio de la siguiente se identifican por un hito importante en la ejecución del programa nucleoelectrico:

- Etapa I (5 años): estudios preliminares. Hito: el gobierno toma la decisión de emprender el programa nucleoelectrico e inicia el proyecto de la primera central.

- Etapa II (10 años): construcción y puesta en servicio de la primera central del programa. Hito: la empresa suministradora de la tecnología concluye las pruebas de puesta en servicio y garantía a fin de que la empresa eléctrica inicie la operación comercial de la primera central.
- Etapa III (40 años): ciclos de operación y de mantenimiento programado, diseño, licenciamiento y fabricación de las recargas de combustible, así como de las inspecciones de salvaguardias y de seguridad nuclear a cargo del Organismo Internacional de Energía Atómica y de la *World Association of Nuclear Operators*, respectivamente. Hito: la empresa eléctrica toma la decisión de concluir la operación comercial de la primera central e inicia el desmantelamiento y el manejo y almacenamiento temporal fuera del sitio de todo el combustible irradiado.
- Etapa IV (puede extenderse por varios decenios): almacenamiento seguro del combustible irradiado. Hito: el gobierno toma las decisiones para reprocesar el combustible irradiado, reciclar el uranio y el plutonio residuales y almacenar definitivamente los desechos radiactivos en un depósito geológico, fuera de todo contacto con la biosfera.

2. Síntesis y resultados del seminario internacional “La Nucleoelectricidad en México y en el Mundo”

La Secretaría de Energía (SENER), el Senado de la República, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y el Capítulo México del Consejo Mundial de Energía (WEC, México) presentaron el 13 y el 14 de mayo de 2010 el seminario internacional “La Nucleoelectricidad en México y el Mundo”.

El evento se realizó en tres sesiones, la primera dedicada a los organismos multilaterales: la segunda, a la actualidad y prospectiva mundial; y la tercera, al caso de México:

- En la sesión I participaron representantes del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), de la Agencia de Energía Nuclear (AEN), de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), y del Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
- En la sesión II participaron funcionarios de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), GDF Suez, Nucleoeléctrica Argentina (NASA) y Bruce Power, quienes reseñaron sobre la situación y el desarrollo nucleoelectrico en sus países
- En la sesión III participaron funcionarios de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), de la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS), del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), de la Academia de Ingeniería (AI) y del WEC, México.

En la clausura del seminario, el BID refirió al apoyo que puede ofrecer al gobierno de México para estudiar la viabilidad de la reanudación del programa de centrales nucleoelectricas. Por último, el Senador Carlos Navarrete Ruiz, Presidente de la Mesa Directiva del Senado de la República, afirmó que ante los retos en materia de energía que se le presentan al país y el rezago en que se ha incurrido históricamente en materia de energía nuclear es necesario rectificar el camino e impulsar esta tecnología para satisfacer la demanda de energía eléctrica.

Los resultados del seminario fueron los siguientes:

- Los actores políticos y del sector energético conocieron y discutieron ampliamente el estado que guarda el desarrollo de la energía nuclear con fines pacíficos en México y el mundo.
- Se analizaron las ventajas y los desafíos que conlleva el desarrollo nucleoelectrico en materia de seguridad, medioambiente, tecnología, capacidad institucional y su impacto socioeconómico.
- Se discutieron puntos relevantes al desarrollo nucleoelectrico, como son los siguientes:
 - a. La generación de electricidad por medios nucleares puede ser una alternativa económica, limpia, segura y confiable.
 - b. Brinda una opción más a ser analizada entre las tecnologías comerciales que existen para satisfacer la demanda en la carga base de los sistemas eléctricos interconectados.
 - c. Algunas razones por las cuales los países analizan la opción de la expansión de su desarrollo nucleoelectrico son:
 - La diversificación de su matriz energética.
 - El aseguramiento del suministro energético.
 - La generación de electricidad con un menor impacto en las emisiones de CO₂ a la atmósfera.
 - d. Existen varios desafíos para el desarrollo nucleoelectrico:
 - Tecnológicos: capacidad limitada para la fabricación de componentes pesados y falta de tecnologías especializadas en construcción y administración.
 - Necesidad de mayor capacitación y existencia de recursos humanos limitados (desarrollo de nuevos profesionales y técnicos).
 - Continuar mejorando el manejo y almacenamiento adecuados de los residuos.
 - Continuar manteniendo los niveles de seguridad nuclear y seguridad física.
 - e. Para el caso de México, de acuerdo a los especialistas existe en el país la infraestructura básica y la experiencia para emprender nuevamente la construcción de centrales nucleares. Un poco más de la mitad del costo de una nueva central nucleoelectrica podría ser cubierto con suministros y servicios nacionales. Sin embargo, existen los siguientes desafíos:

- Promover políticas públicas que permitan ver el potencial y la oportunidad de la participación de la industria nacional.
- Certificar o recertificar las empresa mexicanas.
- Asegurar la capacitación y el desarrollo de los recursos humanos.
- Garantizar el consenso y la participación de todos los actores políticos, económicos, académicos y de investigación y desarrollo.

A continuación, se presenta la información más relevante tratada en cada una de las sesiones del seminario.²

Sesión I. Los organismos multilaterales: beneficios y desafíos de la generación nucleoelectrónica, sus programas actuales y mecanismos de colaboración.

“Routes for Nuclear Power Development”. OIEA. P. Vincze. Section Head. Division of Nuclear Power. International Atomic Energy Agency.

Conforme a su estatuto (OIEA, 1990), el OIEA se apoya en tres pilares, la tecnología, la seguridad y la verificación, para acelerar e incrementar la contribución de la energía nuclear a la paz en el mundo sin menoscabo de la seguridad nuclear, la seguridad física y las salvaguardias.

Entre otras, las funciones del OIEA son: la cooperación técnica; el entrenamiento; los proyectos de investigación coordinada; las misiones de revisión y asesoría; la publicación de estándares de seguridad y la serie de energía nuclear; la difusión de información, bibliotecas y bases de datos; los servicios de apoyo a nuevos países que deseen emprender programas de energía nuclear.

El OIEA apoya a los Estados miembros para elevar el desempeño de sus centrales nucleares y lograr una operación más segura, limpia, confiable y económica. En particular, apoya las tareas de extensión de la vida útil del 95% de las centrales en operación. Para ello,

² Para conocer las declaraciones y las posturas de las instituciones publicadas en la prensa, consultar la sección de anexos.

desarrolla una serie de guías técnicas y reportes, y brinda diversos servicios a través de su programa de cooperación técnica.

El OIEA publica estándares de seguridad (OIEA, 2007) y difunde los instrumentos legales que ha adoptado la comunidad internacional en materia nuclear (OIEA, 2003). Entre otros documentos, también publica anualmente una base de datos básicos de los reactores nucleoelectrónicos en operación y un informe de la experiencia operacional de las centrales en los Estados miembros.

Con el proyecto internacional sobre reactores nucleares y sus ciclos de combustible innovadores (INPRO), el OIEA promueve la discusión conjunta entre proveedores y usuarios de la tecnología acerca de las innovaciones deseables en materia de reactores nucleares y sus ciclos de combustible, a fin de asegurar que los sistemas de energía nuclear contribuyan a la oferta de energía sustentable en el siglo XXI.

Las razones para continuar con el desarrollo de la nucleoelectricidad en el mundo son: el cambio climático, la seguridad del suministro energético, la crisis económica mundial y el incremento de los precios de los combustibles fósiles, y el récord del buen desempeño y la confiabilidad de las centrales.

En 2009 había 437 reactores nucleoelectrónicos en operación en 30 países, con aproximadamente 370.000 MWe³ de capacidad instalada, 13.900 años-reactor de experiencia y un factor de planta acumulado promedio del 80%, los cuales producían alrededor del 16% de la electricidad mundial (OIEA, 2009b y OIEA, 2009c). Entre 2004 y 2009 se ha incrementado paulatinamente la construcción de reactores, que suman 40 unidades y 38,700 MWe de capacidad.

Otros 60 países están considerando incorporar la energía nuclear en su matriz energética, de los cuales 12 ya preparan programas de centrales nucleoelectrónicas y otros 20 consideran tenerlas en operación hacia el año 2030. En un escenario de bajo crecimiento, el OIEA proyecta que hacia 2030 las centrales nucleares tendrán una capacidad mundial instalada de 473,000 MWe y, en un escenario de alto crecimiento, proyecta una capacidad de 748,000 MWe. En el primer caso, habría entre dos y seis países con nuevas centrales nucleoelectrónicas y, en el segundo, habría entre seis y 21.

³ Megavatio eléctrico, unidad de capacidad eléctrica que equivale a 1 millón de vatios.

Actualmente, algunos de los desafíos para construcción de nuevas centrales nucleoelectricas son: la capacidad limitada en el mundo para la fabricación de componentes pesados; la falta de tecnologías especializadas de construcción y de administración de proyectos, los recursos humanos limitados, y la competencia por el acceso a los recursos disponibles entre los programas de extensión de vida de las centrales en operación y la construcción de nuevas unidades. Además, entre 1980 y 2008, se ha reducido de 13 a nueve el número de los suministradores mundiales de tecnología para centrales nucleoelectricas.

Mediante proyectos de cooperación técnica y misiones de expertos, el OIEA está preparado para apoyar a los Estados miembros que están considerando emprender programas nucleoelectricos, los cuales se preguntan: ¿tengo el apoyo del gobierno y de la sociedad durante toda la vida del proyecto?; ¿puedo acceder al financiamiento?; ¿quién me venderá los reactores adecuados, el combustible y las partes de repuesto?; ¿qué se va a hacer con los residuos?; ¿tengo el personal capacitado?; ¿el proyecto va a crear fuentes de trabajo locales?, etc.

Un programa nucleoelectrico implica un compromiso nacional de muy largo plazo. En efecto, se requieren: entre cinco y 10 años para prepararlo; entre cinco y siete años para construir cada central; entre 30 y 60 años para operarlas; y, por lo menos, 100 años para manejar y almacenar los residuos (OIEA, 2007b). También supone contraer obligaciones internacionales en materia de seguridad nuclear, seguridad física y salvaguardias. El OIEA puede apoyar a los Estados miembros en cada etapa de este largo proceso, pero las decisiones son tomadas por los propios países (OIEA, 2007c).

“Benefits and Challenges of Nuclear Development Programs”. Alexey Likhov. *Nuclear Development Division. OCDE, AEN.*

Las razones del renovado interés mundial por la energía nuclear son: el crecimiento de la población y de la demanda de electricidad, los perjuicios de las emisiones de CO₂ a la atmósfera y la seguridad del suministro energético. La AEN de la OCDE concuerda con el OIEA en estos temas.

La ruta tecnológica a seguir para el desarrollo de la energía nuclear se sustenta en: el foro internacional sobre los reactores de la generación IV; el manejo y almacenamiento adecuado de los residuos; y la disponibilidad de los recursos humanos capacitados. Por otro

lado, los retos económicos son: la competitividad de la generación nucleoelectrica y el financiamiento para la construcción de las nuevas centrales.

La misión de la AEN (OCDE, 1995) es asistir a través de la cooperación internacional a los países miembros en el mantenimiento y desarrollo de la base científica, tecnológica y legal requerida para el uso pacífico, seguro, económico y ambientalmente amigable de la energía nuclear. Los países miembros de la AEN poseen centrales nucleoelectricas que tienen el 85% de la capacidad mundial instalada. La agencia trabaja muy de cerca con el OIEA, con la Agencia Internacional de la Energía (AIE) de la OCDE (OCDE, 2010) y con otras organizaciones y funciona como un foro para compartir información y experiencia y para promover la cooperación internacional. Además, ayuda a los países miembros a mancomunar y mantener el *expertise* técnico; y también es un vehículo que facilita el análisis de políticas y que desarrolla consensos basados en su trabajo técnico.

Específicamente, las áreas de trabajo de la AEN son: la seguridad nuclear y la regulación, el desarrollo de la energía nuclear, el manejo y almacenamiento de los residuos radiactivos, la protección radiológica y la salud pública, la legislación y la responsabilidad civil por daños nucleares, y la ciencia nuclear. También mantiene una base de datos y facilita el flujo de información y la comunicación entre los miembros.

Hacia 2050 la población mundial aumentará entre un 30% y un 50%, y la demanda mundial de electricidad, en un 150%, a razón de una tasa anual del 2.5% (OCDE, 2008a). Las emisiones de CO₂ correspondientes a la energía nuclear, junto con las de la hidroelectricidad, la fotovoltaica y la eoloelectrica, son las más bajas entre las tecnologías para generación eléctrica.

En un escenario de bajo crecimiento nuclear, hacia 2050 el mundo contaría con una capacidad instalada de sólo 576,000 MWe, que podría responder a los siguientes factores: una captura y un almacenamiento efectivos del CO₂ por parte de las centrales carboelectricas; una elevada contribución de las fuentes renovables de energía; una experiencia negativa en la construcción de nuevas centrales nucleares; y una baja aceptación social y política de la energía nuclear. En estas condiciones, hacia 2050 la generación eléctrica con centrales nucleares aportaría sólo el 9% de la electricidad mundial.

En cambio, en un escenario de alto crecimiento nuclear, hacia 2050 el mundo contaría con una capacidad instalada de 1,418,000 MWe, que podría deberse a los siguientes factores: una captura y un almacenamiento deficientes del CO₂ por parte de las centrales carboeléctricas; una baja contribución de las fuentes renovables de energía; una experiencia positiva en la construcción de nuevas centrales nucleares; un incremento en la preocupación social y política acerca del cambio climático y la seguridad del suministro energético; un aumento de los esquemas de intercambio de bonos de carbono y una fijación de valor a las emisiones evitadas; y, finalmente, una creciente aceptación social y política de la energía nuclear. En tal caso, en el año 2050 la generación de las centrales nucleares aportaría el 22% de la electricidad mundial.

Cabe señalar que en las proyecciones del OIEA la capacidad instalada hacia 2030 es alrededor de un 20% mayor que la capacidad instalada calculada en las proyecciones de la AEN, tanto en el escenario bajo como en el alto. Por otro lado, mientras el OIEA no realiza proyecciones hacia 2050, la AEN sí las realiza y, en ellas, la capacidad instalada crece en un 44% en el período 2030-2050 en el escenario bajo y se dispara en el escenario alto, ya que aumenta en un factor de 2.3 veces. Esto quiere decir que, de cumplirse los supuestos de la agencia, en el período 2030-2050 podría haber un inusitado auge en la puesta en operación de centrales nucleoeeléctricas a nivel mundial.

Respecto de la seguridad del suministro energético, las mayores reservas de uranio se encuentran distribuidas equitativamente en alrededor de 13 países en los cinco continentes; y, en el escenario de alto crecimiento de la capacidad instalada, estas reservas son suficientes para alimentar todas las centrales hasta 2030 (OCDE, 2008b y OCDE, 2009). La base de recursos identificados puede incrementarse potencialmente para asegurar un suministro suficiente por más de 100 años usando el ciclo abierto actual, sin reprocesamiento. En el escenario de alto crecimiento se requerirá incrementar la producción y será necesario, alrededor de 2050, implementar exitosamente las tecnologías avanzadas de reactores y de ciclos de combustible.

Los diseños revolucionarios de los reactores de la generación IV (The Generation IV International Forum, 2002), que estarán disponibles a partir de 2030, reúnen las siguientes ventajas: incrementarán sus niveles de seguridad nuclear; reducirán la producción de residuos y harán mejor uso de los recursos naturales de uranio y torio; serán más

económicos; tendrán mayor protección física y su ciclo de combustible será más resistente a la proliferación. En la evolución de los reactores actuales hacia los de la generación IV será necesario cerrar el ciclo de combustible mediante el reprocesamiento de los ensamblajes irradiados, para recuperar los residuos valiosos de uranio y de plutonio y reciclarlos en forma de combustibles de óxidos mixtos (MOX). De esta manera, se reducirá la cantidad de desechos radiactivos y, en 300 años, también disminuirá su radiotoxicidad a niveles semejantes a los que hay en la naturaleza.

Conjuntamente con la AIE de la OCDE, la AEN ha estudiado y publicado a principios de 2010 la proyección de costos de generación de electricidad en la carga base (AIE y AEN, 2010) con 190 plantas de diferentes tecnologías en 21 países, cuya entrada en operación sería en 2015. El estudio adoptó un precio de 30 US\$₂₀₀₈/t CO₂⁴ y los precios de largo plazo para los combustibles fósiles, según la prospectiva energética mundial de la AIE, publicada en 2009.

La principal conclusión del estudio es que, ya sea a nivel mundial o regional, en los países de la OCDE no hay ninguna tecnología que tenga una clara y contundente ventaja económica sobre las otras. Según la tasa real de descuento sea del 5% o del 10% anual, los costos unitarios nivelados de la generación a lo largo de la vida de las centrales serían:

- ✓ Nuclear, 59-99 US\$₂₀₀₈/MWh.
- ✓ Carbón, 65-80 USD₂₀₀₈/MWh.
- ✓ Carbón con captura y almacenamiento de CO₂, 62-90 USD₂₀₀₈/MWh.
- ✓ Gas natural, 86-92 USD₂₀₀₈/MWh.
- ✓ Viento, 97-137 USD₂₀₀₈/MWh.

En el caso de México estudiado por la AIE y la AEN, con una tasa real de descuento del 10% anual, los costos nivelados serían:

- ✓ Ciclo combinado, 91.85 US\$₂₀₀₈/MWh.
- ✓ Carbón, 92.28 US\$₂₀₀₈/MWh.
- ✓ Combustóleo, 119.04 US\$₂₀₀₈/MWh.

⁴ US\$₂₀₀₈/t: dólares por tonelada de CO₂ en 2008.

La CFE no proporcionó a la OCDE datos sobre los costos de inversión, de operación y mantenimiento y del ciclo de combustible de una central nucleoelectrica en México, pero para fines comparativos se destaca que con esa alta tasa de descuento, en Estados Unidos, el costo nivelado de generación sería de 77 US\$₂₀₀₈/MWh.

“IDB Energía Sostenible para Todos”. *Leandro F. Alves. Jefe de la División de Energía. BID.*

El BID es un organismo internacional que apoya proyectos de desarrollo energético, entre otros sectores de desarrollo. El sector energético es el segundo más importante en cuanto a los montos de los financiamientos otorgados por el BID, que suman US\$25,661 millones, canalizados en proyectos desde 1961 hasta abril de 2010.

La visión del BID acerca del nuevo sector energético enfatiza, entre otros aspectos, la reducción al mínimo del uso de combustibles fósiles para generar energía eléctrica en la carga base, y la mitigación de riesgos naturales. En materia de eficiencia energética el BID respalda, por ejemplo, a la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de Energía (CONUEE) de México para ejecutar el Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (PRONASE). Asimismo, también apoya la interconexión de Guatemala y México, en el contexto del Sistema de Interconexión Eléctrica para América Central (SIEPAC) (BID, 2010).

En materia energética, el BID estimula el diseño y la preparación de estudios de impacto ambiental, la recopilación de información y el monitoreo de estudios sobre los efectos en el ambiente socioeconómico y sobre el ambiente físico, y el desarrollo de planes de gestión ambiental y socioeconómica para mitigar los impactos adversos.

También apoya, mediante la contratación de expertos internacionales y el financiamiento, la rehabilitación, la modernización y el aumento de la capacidad energética en operación. Asimismo, colabora en el desarrollo de estudios de impacto ambiental, en las auditorías *due diligence* que determinan la viabilidad técnica y financiera, y en el financiamiento para ejecutar los proyectos de generación eléctrica.

Mediante donaciones, el BID ofrece los siguientes instrumentos de apoyo al sector energético: conocimiento y fortalecimiento de capacidades (KCP), cooperaciones técnicas (CT), y financiamiento de inversiones no reembolsables. Además, también otorga préstamos

de inversión y préstamos de política, así como garantías financieras y políticas. De la misma manera, el BID asiste tanto a los gobiernos para mitigar los riesgos técnicos, medioambientales y sociales, como a los estratégicos asociados a megaproyectos de infraestructura energética.

Sesión II. Actualidad y prospectiva de los países participantes: situación vigente, planes a futuro y el porqué del reinicio del desarrollo nucleoelectrico.

“Nucleoelectricidad, ¿una alternativa viable para Chile?”. Gonzalo Gutiérrez Gallardo. Presidente del Consejo Directivo. CCHEN.

En Chile, el sector energético importa el 70% del carbón, el 75% del gas y el 98% del petróleo. El sector eléctrico está desregulado y la generación, la transmisión y la distribución son privadas; por lo que el rol del Estado se limita a la regulación del juego limpio y la promoción de la transparencia del mercado. El país posee una capacidad instalada de 16,000 MWe y el 60% de la electricidad se genera con combustibles importados. Cabe señalar que Chile no posee centrales nucleoelectricas y que existe un único proveedor del gas, que representa el 36% de la capacidad instalada. Por su parte, la hidroelectricidad representa el 52% de la capacidad instalada del sistema interconectado central (SIC), pero hay fuertes fluctuaciones pluviométricas.

En 2007 Chile padeció una crisis energética provocada por varios factores: la suspensión de las importaciones de gas natural desde Argentina, la sequía del período 2007-2008, algunas fallas en centrales importantes, así como el fuerte terremoto en el norte del país. Además, a principios de 2010 hubo otro sismo de muy elevada intensidad que afectó a la región central de Chile. Actualmente, el país enfrenta una creciente demanda energética, el agotamiento de las fuentes tradicionales de origen fósil y las consideraciones ambientales.

Para enfrentar esos obstáculos y mitigar la recurrencia de tales crisis, Chile considera usar las energías renovables no convencionales, impulsar la eficiencia energética y, con interrogantes, emprender un proyecto nucleoelectrico. En 2009, la Comisión Nacional de Energía (CNE) (CNE, 2008) adoptó los “Nuevos Lineamientos de Política Energética” con el objeto de transformar la crisis energética en una oportunidad y asegurar el suministro de energía suficiente, segura, competitiva, sustentable y equitativa. Las líneas estratégicas a

seguir para lograr esos objetivos son: el fortalecimiento de las instituciones, la promoción y el fomento de la eficiencia energética, el apoyo a la equidad en el uso de la energía, la compatibilidad con el desarrollo sostenible , la preparación para contingencias, y la optimización de la matriz energética.

En 2010 se creó el Ministerio de Energía, y también se fundaron el Centro de Energías Renovables y la Agencia de Eficiencia Energética. Además, se fortalecieron las relaciones con la AIE de la OCDE y con el Foro de Cooperación Económica Asia-Pacífico (APEC). Asimismo, se apoyó la creación de la nueva Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, por su sigla en inglés) y, en el ámbito regional, se han intensificado las acciones con la Organización Latinoamericana de Energía (Olade), la Unión de Naciones Suramericanas (Unasur), la Comisión de Integración Eléctrica Regional (CIER), el Mercado Común del Sur (Mercosur) y el apoyo técnico del BID.

En Chile, el sector energético requiere inversiones de US\$27,499 millones en el período 2009-2013 y, para diversificar la matriz energética, se contemplan el carbón, los biocombustibles, los colectores solares, las hidroeléctricas convencionales y las energías renovables no convencionales, además de analizar la opción nuclear. En este sentido, Chile observa las mejores prácticas recomendadas por el OIEA para evaluar y decidir sobre tal opción, que es un proceso que lleva de 12 a 15 años, desde el inicio de los estudios hasta la operación comercial de la primera planta nuclear.

El análisis, que se inició en 2007 y continúa desarrollándose actualmente, servirá para decidir, en un plazo de 2 a 3 años, cómo fortalecer la infraestructura energética nacional. A tal efecto, se han elaborado documentos y se han desarrollado estudios, seminarios, talleres y sesiones de trabajo con el apoyo del Programa de Cooperación Técnica del OIEA. Si tentativamente se tomara una decisión en diciembre de 2010, se iniciarían la licitación y las negociaciones contractuales, así como la preparación del sitio para iniciar la construcción en 2016 y conectar la central a la red eléctrica en 2024.

Para evaluar la conveniencia técnico-económica de incorporar la central nuclear al sistema interconectado de Chile, se ha modelado su expansión hasta 2035 con herramientas del OIEA, la AIE y la CNE. Se concluyó que la nucleoelectrica sustituye a centrales de carbón con un impacto positivo en términos de costos competitivos y de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Los impactos ambientales locales son bajos,

incluidos los del combustible usado y los residuos radiactivos, aunque se requiere evaluar los impactos de cada proyecto en particular. También se concluyó que, aun con la alta sismicidad de Chile, las plantas nucleares son seguras.

No obstante lo anterior, mediante la metodología del OIEA también se concluyó que Chile no está aún en condiciones de implementar un programa nucleoelectrico con los estándares de seguridad requeridos, ya que hay brechas legales, regulatorias y de recursos humanos. Sin embargo, el país puede cerrar oportunamente dichas brechas apoyándose en su fortaleza institucional y en la experiencia acumulada con los reactores de investigación. En este caso, con el lapso requerido para cerrar las brechas, el inicio de la construcción se movería a 2018 y la operación comercial de la central nuclear comenzaría en 2024. Por otra parte, también se registra que la opinión pública no es favorable y se requiere contar con un amplio acuerdo nacional para poder tomar una decisión.

“Nuclear Power in France and Belgium” (Generación Nucleoelectrica en Francia y Bélgica). Luc H. Geraets. Vicepresidente, División de Actividades Nucleares. GDF Suez.

El programa nucleoelectrico de Francia y de Bélgica es el de mayor éxito en el mundo. El 75% de la electricidad generada en Francia es de origen nuclear, a un costo de 45 €/MWh. Además, es el mayor exportador mundial de electricidad, principalmente a Italia, el Reino Unido y Holanda, lo que en su balanza comercial le representa un ingreso anual de €3,000 millones. Francia ha desarrollado tecnología y exporta reactores, así como productos y servicios del ciclo de combustible.

Cuando se desarrolló localmente y estuvo disponible comercialmente la tecnología del enriquecimiento de uranio por difusión gaseosa, en 1974 se adoptó la tecnología de Estados Unidos del reactor presurizado moderado y enfriado con agua ligera (PWR) y, debido a la elevada dependencia energética del exterior, Francia se embarcó en un ambicioso programa de desarrollo de diseños propios de centrales con ese tipo de reactor. Actualmente, *Electricité de France* (EDF) cuenta con una capacidad total instalada de 63,160 MWe en 58 unidades, algunas de las cuales operan en el modo de seguimiento de carga, y que generan conjuntamente alrededor de 390,000 GWhe⁵ anuales.

⁵ Gigavatios-hora eléctrico, unidad de generación de electricidad que equivale a 1 millón de kilovatios-hora.

Con el apoyo de EDF y de empresas alemanas, Areva ha diseñado el reactor europeo presurizado (EPR) de la generación III y está construyendo la unidad Flamanville 3 con una capacidad neta de 1.600 MWe, que se conectará a la red eléctrica en 2012. El proyecto ha enfrentado obstáculos por asuntos de control de calidad, cambios técnicos y regulatorios, así como impactos en costos por la inflación que se reflejará en un mayor costo nivelado de generación, 54 €/MWh. Este tipo de reactor se ha exportado a Finlandia, donde se encuentra en construcción la unidad Olkiluoto 3, que enfrenta obstáculos en el licenciamiento y retrasos en la construcción. También se ha exportado a China, donde se construyen dos unidades en Taishan.

Bélgica adoptó tempranamente en 1962 la tecnología del PWR y las reglas de seguridad y licenciamiento de Estados Unidos. Actualmente, cuenta con una capacidad instalada neta de 5,902 MWe en siete unidades, que generan alrededor de 45,000 GWhe anuales.

El éxito del programa nucleoelectrico francés se ha basado en la estandarización del diseño, la fabricación de componentes y la construcción de unidades replicadas en varios sitios, con estrictos programas de garantía de calidad y regulaciones de referencia. También Francia cuenta, desde la creación de la Comisión de Energía Atómica (CEA), con una fuerte infraestructura de investigación y desarrollo, que apoyó el progreso de todas las actividades del ciclo de combustible, desde la minería del uranio (Cogema), la conversión a UF₆ (Comurhex), el enriquecimiento del uranio (Eurodif) y la fabricación de ensambles en Francia y en Bélgica (Areva), hasta el reprocesamiento del combustible irradiado (Areva), la fabricación de combustibles de óxidos mixtos (MELOX) y su reciclado en los mismos reactores PWR y, finalmente, el almacenamiento de los desechos radiactivos de mediano y bajo nivel en l'Aube (ANDRA).

También se investiga el almacenamiento de residuos de alto nivel en formaciones geológicas estables, cuyo laboratorio experimental se localiza en el sitio de Meuse/Haute-Marne, a una profundidad de 490 metros, en una formación con una antigüedad de 155 millones de años (ANDRA).

Desde 1946 Francia fue el mayor productor de uranio en Europa, pero en 2001 se cerró la última mina de uranio en territorio francés; el suministro actual y futuro proviene de Canadá, Níger, Australia, Kazajstán y Rusia.

La CEA realiza investigaciones para desarrollar, hacia 2024, nuevos reactores rápidos de cría, de los cuales un tipo será de enfriado con sodio líquido (ASTRID) y otro de enfriado con gas (ALLEGRO). Además, también desarrolla un reactor de muy alta temperatura (VHTR) para aplicaciones industriales, como la producción de H₂ para el transporte, entre otras. Asimismo, participa en el consorcio internacional cooperativo para el desarrollo de los reactores de la generación IV, e investiga los ciclos de combustible avanzados para los reactores de la generación III+ y la generación IV.

Por su parte, EDF trabaja en la extensión de la vida útil de sus unidades PWR de 900 y 1.300 MWe, así como en la repotenciación de algunas de ellas. En Bélgica se trabaja en la extensión por otros 10 años de la vida de sus unidades. AREVA y *Mitsubishi Heavy Industries* (MHI) de Japón trabajan en el diseño y licenciamiento del reactor de mediano tamaño de la generación III+ ATMEA1TM de 1.100 MWe de capacidad, adecuado para redes eléctricas medianas. Este reactor es similar al EPR.

La industria nuclear está fuertemente regulada y monitoreada en Francia y, según el Eurobarómetro, es económica, limpia, segura y confiable. Sin embargo, debe incrementar su transparencia y debe mejorar la comunicación hacia la población, ya que hay asuntos que generan preguntas sobre la proliferación y las soluciones del manejo de los residuos de larga vida, que deben contestarse.

“El Desarrollo Nuclear en Argentina”. Rubén O. Semmoloni. Director del proyecto Central Nuclear Embalse. Nucleoeléctrica Argentina, S. A.

En 1950 Argentina creó la Comisión Nacional de Energía Nuclear (CNEN) y, en 1958, se puso en operación el primer reactor nuclear de investigación en Latinoamérica (RA-1). En 1967 se puso en marcha el reactor RA-3 para la producción de radioisótopos. Desde 1957 y hasta la actualidad, Argentina ha desarrollado reactores de investigación y de pequeña potencia, algunos de los cuales ha exportado a Perú (1978,1988), Argelia (1989), Egipto (1998) y Australia (2006).

En 1968 se licitó la construcción del reactor nucleoelectrico CN Atucha I, del tipo moderado y enfriado con agua pesada (PHWR), con una capacidad bruta de 357 MWe. Atucha I se ejecutó mediante un contrato llave en mano con *Siemens AG* de Alemania, y con

una participación nacional del 36%. En 1974 se inició la operación comercial y desde entonces ha acumulado un factor de planta del 70%.

En 1974 se adjudicó al consorcio *Atomic Energy of Canada (AECL)-Italimpianti* el contrato para la central CN Embalse, del tipo canadiense de agua pesada como moderador y refrigerante (CANDU), con una capacidad bruta de 648 MWe. La central Embalse se construyó con un 51% de participación nacional e inició su operación comercial en 1984. Desde entonces, ha acumulado un factor de planta de 85%.

En 1980 se firmaron contratos con *Kraftwerk Union (KWU)-Siemens* para la construcción de la CN Atucha II, del tipo PHWR con una capacidad bruta de 700 MWe, pero la construcción se vio demorada en el período 1984-1990. En 1994 se reasignaron las funciones de la CNEA para separar la actividad regulatoria y crear Nucleoeléctrica Argentina, S. A. (NASA), que se encargaría de la operación de las centrales nucleoelectricas. En 1997 la generación nucleoelectrica se declaró sujeta a privatización y en 2003 se iniciaron los estudios para evaluar la conveniencia de reanudar la construcción de la CN Atucha II, que en 2005 se le encomienda finalizar a NASA.

En agosto de 2006 el Gobierno nacional definió el “Plan para la reactivación de la actividad nuclear en la Argentina”, el cual proyecta finalizar la construcción de la CN Atucha II, extender la vida de la CN Embalse y aumentar su capacidad en 35 MWe. Asimismo, el plan incluye estudiar la factibilidad de construir, con máxima participación nacional y acuerdos de transferencia de tecnología, una nueva central nuclear de 2 unidades de 750 MWe cada una, que deberían entrar en operación en 2016 y 2017; reactivar la planta de producción de agua pesada; y reactivar el desarrollo del reactor de la Central Argentina de Elementos Modulares (CAREM).

Desde la entrada en operación de la CN Embalse en 1984, la capacidad nuclear bruta instalada en Argentina se ha estancado en 1,005 MWe, mientras que la térmica convencional se ha triplicado entre 1984 y 2009, pasando de 5,908 a 15,526 MWe, y la hidráulica se ha duplicado, pasando de 5,088 a 10,514 MWe en ese mismo período. La capacidad nuclear en 2009 en el mercado eléctrico argentino representa el 3.7% del total de 27,045 MWe, y la generación nucleoelectrica de 8,162 GWhe representa el 7.1% del total de 114,734 GWhe en 2009.

Hacia el futuro, en el escenario tendencial que contempla la evolución propia de la demanda sin implementar políticas o cambios estructurales, se esperaría generar 264,700 GWhe en 2025, los que se repartirían porcentualmente en: nuclear, 17.2%; hidráulica, 33.4%; renovables, 6.2%; autoproducción 1.5%; gas natural, 10.4%; líquidos, 24.5%; y carbón, 6.8%. En cambio, en el escenario estructural que describe la evolución de la demanda implementando políticas para el uso racional y eficiente de la energía, se esperaría generar 216,400 GWhe en 2025, los que se repartirían en: nuclear, 21.1%; hidráulica, 40.7%; renovables, 7.6%; autoproducción, 1.9%; gas natural, 9.6%; líquidos, 6.3%; y carbón, 12.8%.

En este escenario estructural se requeriría contar en 2025 con una capacidad total instalada de 50,201 MWe, de los cuales 29,020 MWe serían centrales nuevas y se retiran por obsolescencia 1,116 MWe. Entre 2010 y 2025, la nueva capacidad hidroeléctrica sería la de mayor crecimiento, 9,700 MWe; seguida de la nuclear, 4,750 MWe; y, en menor medida, energías renovables, principalmente eololéctrica, 3,500 MWe; y carbón, 3,440 MWe. La capacidad restante de 7,630 MWe sería una combinación de centrales térmicas a base de combustóleo, gas natural y combustibles líquidos.

Desde la perspectiva del sector eléctrico argentino, las razones para relanzar el plan nuclear son: diversificar la matriz energética, ya que las reservas de gas natural son de sólo 7.9 años; reducir la participación de este energético en el total de la generación; generar energía eléctrica de bajo costo marginal, con elevados niveles de disponibilidad de la capacidad instalada; reducir paulatinamente el consumo de combustibles líquidos; y cumplir con los objetivos de la política ambiental mediante la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

Desde la perspectiva del sector nuclear argentino, con el relanzamiento del plan se lograría: consolidar el desarrollo del sector; dar un horizonte de negocio para las empresas del sector, así como a nuevas empresas con capacidad tecnológica; permitir al sector industrial participar en proyectos nucleares fuera de Argentina; transferir tecnología a fin de aumentar las capacidades técnicas para desarrollar nuevas centrales nucleares.

“Nuclear Power in Canada: Present and Future” (El presente y futuro de la generación nucleoelectrica en Canadá). Duncan Hawthorne. Presidente y CEO. Bruce Power.

La industria nuclear de Canadá se ubica principalmente en el sector público y, por conducto de la empresa AECL, el gobierno ha encabezado su desarrollo desde hace 60 años. AECL es el dueño del diseño del reactor canadiense moderado y refrigerado con agua pesada PHWR (CANDU), que inicialmente utilizaba uranio natural como combustible, pero que también puede operar con uranio muy ligeramente enriquecido a fin de optimizar la física de neutrones y el quemado de los ensambles. Canadá es uno de los cinco países del mundo que posee las mayores reservas identificadas de uranio: 423,200 toneladas, que representan el 7.7%. En 2006 era el mayor productor mundial con 9,862 toneladas, aproximadamente el 25% del total, seguido de Australia, con un 19%, y de Kazajstán, con un 13%.

La industria nuclear en Canadá representa una actividad económica de \$Can6,600 millones anuales e involucra una fuerza de trabajo de 71,000 personas. Se producen radioisótopos para usarlos en la medicina nuclear, que se exportan a todo el mundo y de los que se aplican 50,000 dosis diarias. En la provincia de Ontario, AECL tiene 3,000 empleados permanentes y ha iniciado un proceso para evaluar la participación de inversionistas del sector privado en el negocio de servicios a los reactores en operación, incluyendo rehabilitaciones y la construcción de nuevas instalaciones.

En 2009 la oferta energética primaria en el sector eléctrico a nivel nacional se componía de la siguiente manera: hidráulica, 63%; carbón, 17%; nuclear, 15%; gas natural, 4%; y renovables, 1%. Los principales retos energéticos que ahora enfrenta Canadá son: la preocupación pública acerca de las emisiones de gases de efecto invernadero y el cambio climático; el envejecimiento de la infraestructura, que tiene que hacer frente al incremento de la demanda de electricidad; los elevados requerimientos de inversión pública y privada; y la gran disparidad regional de la disponibilidad de fuentes de energía primaria. La oferta es esencialmente hidráulica en cuatro provincias: Manicouagan, 99%; Québec, 95%; British Columbia, 94%; y New Brunswick, 57%. En dos provincias la energía es de origen térmico: Alberta, 95%; y Saskatchewan, 86%. La oferta en Ontario depende en mayor medida de la energía nuclear, 55%.

En 1967 entró en operación la central Douglas Point, con el prototipo PHWR de 206 MWe netos de capacidad, que ya salió de operación. La primera unidad CANDU de la clase

600 MWe inició su operación en 1971 en la central Pickering A, y la primera unidad de la clase 900 MWe arrancó en 1977 en la central Bruce A, ambas ubicadas en la provincia de Ontario. Actualmente, la capacidad neta operativa instalada en Canadá es de 12,569 MWe, en 18 unidades que generan el 15% de la electricidad del país. También hay una capacidad neta instalada no operativa de 2,530 MWe, en tres unidades que se encuentran indefinidamente fuera de servicio.

Canadá ha exportado reactores PHWR prototipos de pequeña potencia a Pakistán (KANUPP, 1971), India (RAPPS, 1973; 1974), así como reactores CANDU de la clase 600 MWe a Argentina (Embalse, 1983), República de Corea (Wolsong, 1982, 1997, 1998, 1999), Rumania (Cernavoda, 1996, 1997) y China (Qinshan, 2002, 2003).

En Ontario más del 50% de la electricidad es de origen nuclear y se genera en tres sitios, cuyas capacidades totales instaladas son: Pickering, 4,124 MWe en ocho unidades; Bruce, 6,194 MWe en ocho unidades; y Darlington, 3,512 MWe en cuatro unidades. Hacia 2020, además de la rehabilitación del complejo de Bruce Power y de la central de Darlington, se proyecta añadir 2,000 MWe con la construcción de dos nuevas unidades y extender la vida de las unidades del sitio de Pickering.

Las otras dos provincias que pueden adoptar la energía nuclear son Alberta y Saskatchewan, que dependen del carbón, necesitan reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero y cuentan con el apoyo público a la energía nuclear.

En Alberta hay una creciente demanda de electricidad y vapor para desarrollar la extracción de las arenas bituminosas y *Bruce Power* desarrolla un proyecto nuclear en el norte de la provincia. Un panel gubernamental reconoce la contribución que la energía nuclear podría aportar para atenuar el problema ambiental.

En Saskatchewan el gobierno provincial está interesado en desarrollar la cadena de valor completa del uranio. *Bruce Power* monitorea estos los desarrollos y ha identificado algunos sitios viables para ubicar nuevas instalaciones. El gobierno ha declarado que considera la energía nuclear como una opción para la oferta energética a largo plazo.

Entre 2004 y 2009 el apoyo de la opinión pública nacional al programa de energía nuclear ha ido en ascenso y fue en promedio $61.2\% \pm 4.7\%$. En la provincia de Ontario, entre 2002 y 2009, ha fluctuado el apoyo y ha sido en promedio $60.5\% \pm 5.2\%$.

Al futuro, los retos que enfrenta Canadá son: mantener los recursos humanos suficientes y capacitados, incrementar la infraestructura en las nuevas centrales y en las instalaciones del ciclo de combustible nuclear, contener el incremento de los costos y financiar la nueva infraestructura, mantener los niveles de seguridad nuclear y seguridad física, y reducir los riesgos de proliferación.

Sesión III. México: la situación actual y los planes a futuro del desarrollo nucleoelectrico.

“La central nucleoelectrica Laguna Verde”. Ing. Rafael Fernández de la Garza. Gerente de Centrales Nucleoelectricas. CFE.

La central nucleoelectrica Laguna Verde de la CFE consta de dos unidades suministradas por *General Electric*, modelo BWR/5 del tipo reactor en ebullición moderado y enfriado con agua ligera (BWR), cada una con capacidad neta instalada de 650 MWe. La construcción de la central se inició en octubre de 1976 y, noviembre de 1988, se alcanzó la primera criticidad de la carga inicial de combustible de la primera unidad, que se conectó a la red en abril de 1989 e inició su operación comercial en julio de 1990. La criticidad de la carga inicial de combustible de la segunda unidad se logró en septiembre de 1994; la unidad se conectó a la red en noviembre de 1994 e inició la operación comercial en abril de 1995 (OIEA, 2009b y OIEA, 2009c).

Desde entonces, la central ha recibido diversos reconocimientos de *General Electric* por su excelente desempeño y, hasta 2009, había generado 157,000 GWhe, evitando de esta manera que las centrales del sistema interconectado nacional emitieran 116 millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera. Actualmente, la central opera en la carga base de la curva de demanda y genera el 4.6% de la electricidad del país para servicio público (SENER, 2009b). El resto de la electricidad la producen, en su mayor parte, centrales de diversos tipos que consumen gas natural, combustóleo, carbón o diesel, que se reparten porcentualmente de la siguiente manera: ciclo combinado, 48.6%; termoeléctrica convencional, 18.6%; carboeléctrica, 12.7%; turbogás, 0.9%; y combustión interna, 0.5%.

La dependencia de los combustibles fósiles es excesiva ya que representa el 80.8% de la generación. En consecuencia, en 2009 se emitieron 138 millones de toneladas de CO₂ a la

atmósfera. Por su parte, las tecnologías limpias que durante su operación no emiten gases de efecto invernadero sólo producen el 18.7% de la electricidad nacional para el servicio público: hidroeléctrica, 11.1%; nucleoeeléctrica, 4.6%; geotérmica, 2.9%; y eoloeléctrica, 0.1%.

La central Laguna Verde participa en la Asociación Mundial de Operadores Nucleares (WANO), así como en el Instituto de Operaciones Nucleoeeléctricas (INPO) de Estados Unidos, con lo cual observa las mejores prácticas de operación y busca situarse en los niveles de excelencia a nivel mundial.

En 2009 la AI patrocinó la publicación de un estudio realizado por la Gerencia de Centrales Nucleoeeléctricas que, entre otros temas de relevancia para la reanudación de un programa nucleoeeléctrico, realiza la comparación de los costos nivelados de generación de varias tecnologías de carga base en distintos casos (Fernández de la Garza, 2009). Para ello se utilizó la metodología del documento de costos y parámetros de referencia para la formulación de proyectos de inversión del sector eléctrico (COPAR) de la CFE. En síntesis, los resultados del estudio son:

- ✓ Nuclear, 89.86-95.54 US\$/MWh.
- ✓ Ciclo combinado con gas natural, 74.68-84.34 US\$/MWh.
- ✓ Ciclo combinado con gas natural y con captura y secuestro de CO₂, 103.13-104.38 US\$/MWh.
- ✓ Ciclo combinado con gasificación integrada, 93.78-112.71 US\$/MWh.
- ✓ Ciclo combinado con gasificación integrada y con captura y almacenamiento de CO₂, 144.70-147.53 US\$/MWh.
- ✓ Carboeléctrica supercrítica con carbón pulverizado, 76.26-96.02 US\$/MWh.
- ✓ Carboeléctrica supercrítica con carbón pulverizado y con captura y almacenamiento de CO₂, 150.23-153.13 US\$/MWh.

De acuerdo al estudio, se concluye que los costos nivelados de la central nucleoeeléctrica compiten favorablemente con los de las otras tecnologías, especialmente cuando se consideran los costos de la captura y el almacenamiento del CO₂.

En 2010 concluye el proceso para aumentar la potencia bruta de cada una de las unidades en un 20%, que llegará a 817 MWe. El costo total de la repotenciación será de

US\$606 millones, es decir US\$2,225 por Kw bruto incremental. La participación nacional será de un 22% en el suministro de equipos y componentes; un 98% en la mano de obra de 4,000 trabajadores; y un 100% en la supervisión.

En las encuestas de opinión a los pobladores de la región se les ha preguntado lo siguiente con un cuestionario de opción múltiple de respuesta: “Laguna Verde es la única central nucleoelectrica de México y se ubica en Veracruz, ¿qué significa esto para ti?”. Las respuestas se repartieron porcentualmente de la siguiente manera: orgullo, 34.6%; gusto, 29.1%; me da igual, 24.3%; riesgo, 2.2%; temor, 2.8%; sentimientos encontrados, 6.3%; y no contestaron, 0.7%. Más del 50% de los encuestados tiene una opinión favorable sobre la central nuclear.

“La infraestructura en ingeniería y construcción”. WEC, México. Dra. Cintia Angulo. *Presidenta del Consejo Mundial de Energía, Capítulo México, A. C.*

Actualmente, en el mundo hay 438 reactores nucleoelectricos en operación, con una capacidad neta total instalada de 372,000 MWe. Entre estos reactores, 266 son del tipo PWR, 92 son BWR, 46 son PHWR, 15 son del tipo de reactor de agua ligera moderado con grafito (LWGR), 18 son del tipo de reactor enfriado con gas (GCR), y uno es del tipo de reactor rápido de cría (FBR) (OIEA, 2009c).

Hay cinco reactores que se encuentran indefinidamente fuera de servicio y hay 58 en construcción. De estos últimos, 50 son PWR, tres son BWR, dos son PHWR, dos son FBR, y uno es LWGR.

El mercado potencial de nuevos reactores en el mundo hacia 2030 es del orden de unos 288,000 MWe, según el promedio en un escenario bajo y uno alto del OIEA (OIEA, 2009d), que se distribuyen geográficamente en: América del Norte, 34,200 MWe; América del Sur, 12,900 MWe; Europa Occidental, -2,500 MWe; Europa Oriental, 54,500 MWe; África, 9,800 MWe; Medio Oriente y Sur de Asia, 33,800 MWe; Sureste de Asia y el Pacífico, 2,600 MWe; y Lejano Oriente, 142,700 MWe. La mitad del crecimiento potencial se concentra en el Lejano Oriente. En el mundo, las empresas que pueden ofrecer una central llave en mano son *General Electric, Westinghouse, Siemens con Areva, Toshiba y Atomenergoprom.*

El costo de una nueva central nucleoelectrica en México se estima en US\$4,500 millones, de los cuales el 57.4% podría ser de suministros nacionales de equipos, materiales y servicios. Con la experiencia histórica de la construcción de la central Laguna Verde se estima que las erogaciones en un nuevo proyecto podrían ser de origen nacional: el 9% de los equipos de la isla nuclear y el 46% de los equipos del balance de planta; el 70% de los materiales de la isla nuclear y el 90% de los materiales del balance de planta; el 90% de la construcción; el 41% de los servicios de administración del proyecto, ingeniería de diseño y pruebas de arranque; y finalmente, el 100% de los costos indirectos de la CFE.

En resumen, la participación nacional representaría una erogación de US\$2,519 millones, repartidos de la siguiente manera: 256 millones en la isla nuclear, 560 millones en el balance de planta, 1,284 millones en la construcción, 310 millones en los servicios, y 109 millones en los costos indirectos de la CFE. Para lograr esta deseable participación nacional en un nuevo proyecto sería necesario certificar o recertificar las empresas mexicanas y promover políticas públicas que permitan ver el potencial plan nuclear como una oportunidad de mayor participación de la industria mexicana. En el reciente proyecto de aumento de la potencia de las dos unidades de Laguna Verde la participación nacional será de un 22% y, entre los 25 pedidos de componentes que se fincaron, en 10 de ellos fue completo el suministro nacional y, en otros dos, hubo suministro parcial. En México, en los Estados de Querétaro, Nuevo León, Veracruz y Michoacán, entre otros, existen empresas de muy alto nivel tecnológico que podrían fabricar los equipos y componentes que engloban cerca del 57% del total de una central nuclear.

Las acciones inmediatas que se requieren para impulsar la opción nuclear en México son: la voluntad política del Estado y de sus tres poderes de gobierno para lanzar un programa de largo plazo y la creación de un amplio consenso político y económico para respaldarlo; generar el interés y la participación de todos los actores políticos, económicos, académicos y de investigación y desarrollo; fortalecer la capacidad de la industria nacional para desarrollar y financiar proyectos locales; y la certificación o recertificación de las empresas mexicanas.

México tiene la capacidad y la oportunidad tecnológica de reanudar el programa nucleoelectrico porque dispone de: infraestructura desarrollada con una importante red de carreteras, vías férreas y puertos; empresas líderes que ofrecen tecnología de punta y que

también son proveedoras; empresas nacionales que no están especializadas en energía nuclear, pero que pueden proveer componentes para una central nucleoelectrica.

“La infraestructura en recursos humanos en México”. Dr. Juan Luis François Lacouture. Presidente de la especialidad de Ingeniería Nuclear, Academia de Ingeniería; Profesor de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

México cuenta con la infraestructura básica para la formación y capacitación de los recursos humanos de alto nivel requeridos para sustentar la reanudación del programa nucleoelectrico.

Durante el período 1961-2008, el Instituto Politécnico Nacional (IPN) ofreció en la Escuela Superior de Física y Matemáticas una maestría en Ciencias en Ingeniería Nuclear. Desde 2009 se ofrece la maestría y el doctorado en Ciencias Físico-Matemáticas, con una línea en investigación en Ingeniería Nuclear.

En el posgrado de la Facultad de Química de la UNAM se ofreció una maestría en Ingeniería Química Nuclear que, partir de 1997, se ha enfocado sólo al área de Química Nuclear. En 1999 se incorporó a la Facultad de Ingeniería un contingente de profesionales de muy alto nivel que formó el grupo de Ingeniería Nuclear, el cual realiza investigación y docencia en sistemas nucleoelectricos en el posgrado en energía. Este grupo también imparte un posgrado a distancia en sistemas energéticos a ingenieros de la CFE, entre los cuales hay algunos profesionales de la central Laguna Verde.

Desde 1974 la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) imparte la carrera de Ingeniería en Energía, con algunas materias optativas en Ingeniería Nuclear. En 1996 la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ) creó la Maestría en Ciencias Nucleares, con opciones en Ingeniería Nuclear, Técnicas Analíticas Nucleares, Instrumentación Nuclear y Medicina Nuclear. Desde 1996 la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM) imparte, en colaboración con el ININ, una Maestría y Doctorado en Ciencias Nucleares y Física no Lineal. La Universidad Veracruzana (UV) ha formado a muchos de los físicos e ingenieros de diversas especialidades que en la actualidad trabajan en la central Laguna Verde.

La Gerencia de Centrales Nucleoelectricas de la CFE tiene un centro de entrenamiento en el sitio de Laguna Verde para reclutar, seleccionar y formar a los

profesionales y técnicos que requiere para ocupar puestos específicos en la organización de ingeniería, de diseño y de operación de la planta. Un simulador que replica el cuarto de control de una de las unidades de la central fue diseñado y construido por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) y se utilizó durante varios años para el entrenamiento de los operadores. En la actualidad, dicho simulador fue reemplazado por otro más moderno suministrado por Technatom y GC.

La CNSNS tiene un programa de capacitación del personal, que se fundamenta en la Ley del Servicio Profesional de Carrera y su reglamento. La capacitación básica se realiza en México y la específica se apoya en cursos impartidos por expertos de la Comisión Reguladora Nuclear (USNRC) de Estados Unidos, del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) de España, así como en cursos regionales del OIEA y en estancias y residencias del personal de la CNSNS en organismos especializados.

El ININ tiene un Departamento de Educación Continua para capacitar a su personal en el campo de las ciencias nucleares, la protección radiológica y disciplinas afines. Los cursos de protección radiológica también capacitan a profesionales que trabajan en el sistema de salud en el diagnóstico médico con rayos X, así como a quienes fungen como responsables de la seguridad radiológica en la industria que usa fuentes radiactivas. El ININ cuenta con 650 profesionales, de los cuales una tercera parte tiene grados de maestría y doctorado; otra tercera parte, de licenciatura; y el tercio restante, de técnicos medios.

La reanudación del programa nucleoelectrico va a requerir la formación de nuevos profesionales y técnicos capacitados para las tareas de licenciamiento, ingeniería, construcción, puesta en servicio y operación de las nuevas centrales nucleoelectricas, así como para las tareas de investigación y desarrollo, docencia y capacitación en el trabajo. Para lograrlo serán indispensables fuertes apoyos institucionales y presupuestales, así como la asistencia técnica del OIEA y de otras instituciones externas, que puede ser muy importante. En la CNSNS y, en menor medida, en el ININ se enfrentan problemas por la carencia de recursos presupuestales para las tareas de capacitación; la baja retención del personal capacitado; el envejecimiento y retiro cercano del personal con experiencia; y la carencia de un sistema de gestión del conocimiento.

“Infraestructura regulatoria en materia nuclear en México”. Ing. Juan Eibenschutz Hartman. Director General de la CNSNS.

La pirámide regulatoria en materia nuclear en México se compone en la cúspide de leyes y reglamentos, así como de convenciones y tratados internacionales que ha firmado el gobierno de México. Entre las leyes, se destaca la Constitución Política, que en su artículo 27, entre otras estipulaciones, dispone que: “Corresponde exclusivamente a la Nación generar, conducir, transformar, distribuir y abastecer energía eléctrica que tenga por objeto la prestación del servicio público. En esta materia no se otorgarán concesiones a los particulares y la Nación aprovechará los bienes y recursos naturales que se requieran para dichos fines”. A continuación, se dispone que: “Corresponde también a la Nación el aprovechamiento de los combustibles nucleares para la generación de energía nuclear y la regulación de sus aplicaciones en otros propósitos. El usos de la energía nuclear solo podrá tener fines pacíficos”.

En el ámbito de la seguridad radiológica, en un segundo nivel de la pirámide regulatoria se ubica el Reglamento General de Seguridad Radiológica y, en un tercer nivel, los requerimientos de licencias y guías. En el ámbito de la seguridad nuclear, en el segundo nivel se ubica el Código de Regulaciones Federales 10CFR de Estados Unidos, ya que las autoridades decidieron aplicar a la central Laguna Verde las regulaciones del país de origen del suministrador de la tecnología BWR de *General Electric*. En un tercer nivel se encuentran las guías reguladoras y, luego, los requerimientos de licencia, boletines y órdenes.

Entre otros instrumentos internacionales en materia nuclear firmados por México, se encuentran el Tratado para la Proscripción de las Armas Nucleares en la América Latina y el Caribe (Tratado de Tlatelolco) y el Tratado sobre la No Proliferación de Armas Nucleares (TNP). En función de estos tratados, el gobierno de México celebró acuerdos de salvaguardias con el OIEA. Para el suministro del reactor de investigación y producción de radioisótopos (TRIGA) del ININ y los reactores de la central Laguna Verde de la CFE, así como para los respectivos combustibles de uranio ligeramente enriquecido, el gobierno mexicano celebró acuerdos trilaterales con el gobierno de Estados Unidos y el OIEA. Posteriormente, firmó la Convención de Seguridad Nuclear.

En el Capítulo VI de la Ley reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en materia nuclear (Diario Oficial de la Federación, 1985) se señalan las atribuciones y la estructura de la CNSNS, así como la composición de su Consejo Consultivo. La CNSNS es un organismo desconcentrado de la SENER y cuenta con 116 profesionales, de los cuales 82 se dedican a tareas reguladoras.

Entre los logros de la CNSNS se encuentran: la implantación del sistema nacional de control y contabilidad del material nuclear especial requerido por los acuerdos de salvaguardias con el OIEA; el licenciamiento de la construcción y la operación de la central Laguna Verde; la observancia, atención y respuesta oportuna de los compromisos contraídos por el gobierno de México en función de los tratados internacionales, en particular el Tratado de Tlatelolco, el TNP y la Convención de Seguridad Nuclear; la creación y adaptación del marco normativo en materia de seguridad radiológica; y el control total de las fuentes radiactivas que se encuentran legalmente en México.

“Infraestructura en la investigación nuclear”. M. en C. J. Raúl Ortiz Magaña. Director General del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.

En 1943 se creó en México la Comisión Impulsora y Coordinadora de la Investigación Científica, la cual fue el antecedente de la Comisión Nacional de Energía Nuclear (CNEN) creada en 1956, que en 1972 se transformó en el Instituto Nacional de Energía Nuclear (INEN). En 1979 se separaron las funciones regulatorias de las de investigación y desarrollo e industriales del INEN, dando lugar a la modificación de la ley y a la creación de la CNSNS, del ININ y de Uranio Mexicano (URAMEX).

En 1986 se modificó la ley para expedir la Ley reglamentaria del artículo 27 de la Constitución nacional en materia nuclear, que se encuentra en vigor. Por razones económicas y sindicales, se extinguió URAMEX y se fijaron las atribuciones del ININ y de la CNSNS, así como las de la CFE en materia nucleoelectrónica.

A partir de 1979, entre las principales actividades del ININ se encuentran las siguientes: la puesta en marcha del centro de metrología de radiaciones ionizantes; la modificación del núcleo del reactor TRIGA para operarlo con una mezcla de ensambles de combustible con un 20% y un 70% de enriquecimiento en ${}_{92}\text{U}^{235}$; y la puesta en marcha de un acelerador de partículas de 2 MeV.

Los recursos humanos del ININ para la investigación y el desarrollo en ingeniería nuclear están integrados por 33 profesionales con doctorado, 33 con maestría y 30 con licenciatura. En este contexto, el personal del ININ participa en el proyecto internacional de diseño del reactor “*International Reactor Innovative and Secure (IRIS)*” de la generación III+. También en el ININ se realizan estudios para vigilar y extender la vida útil de la central Laguna Verde. Dichos estudios consisten en la vigilancia de materiales de las vasijas de los reactores; la vigilancia de los efectos por la modificación de la química del agua; el análisis de los daños a las vasijas por la fluencia de neutrones; la calificación de los equipos y componentes; la cuantificación de su confiabilidad; y la evaluación y gestión del envejecimiento de los sistemas, las estructuras y los componentes.

Aunque el ININ es la principal institución mexicana de investigación y desarrollo en ciencia y tecnología nucleares, otras instituciones como el IPN, la UNAM, la UAM, la UAZ, la UAEM y el IIE colaboran en actividades afines. Por ejemplo, un grupo interinstitucional de profesionales del ININ, el IIE, la UNAM y el IPN ha realizado para la CFE estudios especializados en administración de combustible para optimizar su uso en los reactores y para crear la capacidad de diseño y licenciamiento de las recargas.

El ININ y la UAZ colaboran para diseñar y construir instrumentos para detectar la radiación, desarrollan sistemas electrónicos de control para reactores, diseñan y construyen torres meteorológicas, y desarrollan sistemas de control de acceso de personal a las instalaciones.

Asimismo, el ININ junto al IIE y la UNAM desarrollan métodos para el análisis de riesgos y confiabilidad transitorios y accidentes, y la operación a bajas potencias y durante el apagado del reactor.

Además, el ININ y la UNAM realizan estudios para conocer las especificaciones técnicas de nuevos reactores, evaluar la factibilidad de nuevos sitios para el emplazamiento de centrales nucleares, determinar la viabilidad económica y financiera de reactores de nuevo diseño, y evaluar el impacto socioeconómico de la construcción y operación de nuevas centrales.

La investigación en ingeniería nuclear ya tiene tradición en México, que cuenta con los recursos humanos capacitados suficientes para apoyar inicialmente un programa

nucleoeléctrico. No obstante, para apoyarlo con oportunidad y eficiencia se requiere incrementar la infraestructura y el personal de alto nivel.

Por otra parte, es urgente determinar el monto de las reservas de uranio que hay en México y debe buscarse la independencia tecnológica en los procesos del ciclo de combustible, con programas que reciban apoyo suficiente y de largo plazo.

Asimismo, se debe informar a la población de manera objetiva y oportuna acerca de la energía nuclear y sus beneficios.

Conclusiones

Las conclusiones sobre lo expuesto en el seminario son las siguientes. En primer lugar, los beneficios que podría aportar la energía nucleoelectrica para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, así como para asegurar el abastecimiento energético oportuno y económico frente a la gran volatilidad de los precios de los combustibles fósiles en los mercados internacionales.

En segundo lugar se concluyó que, por su competencia científica, técnica y financiera, los organismos multilaterales están preparados para apoyar a los países de América Latina y el Caribe en la evaluación de la factibilidad de construir su primera central nucleoelectrica para satisfacer parte de la creciente demanda de electricidad en sus sistemas interconectados, así como para continuar apoyando a los países de la región en la reanudación de sus programas nucleoelectricos.

En el caso del OIEA, además del programa regular de cooperación técnica, esta institución puede emprender proyectos ad hoc a solicitud de sus miembros.

Asimismo, la AEN de la OCDE puede apoyar principalmente con el intercambio de la información que genera conjuntamente con el OIEA y la AIE de la OCDE, así como con el suministro de expertos de sus países miembros para misiones de asesoría en temas muy específicos del ámbito de sus áreas de trabajo. En particular, la AEN publica y divulga estudios sobre los costos de generación de electricidad con diferentes tecnologías para satisfacer la demanda de la carga base, entre ellas, de las centrales nucleoelectricas.

En tercer lugar, se concluyó que los países que han desarrollado programas exitosos de centrales nucleoelectricas, como lo son Argentina, Canadá y Francia, desde su inicio

crearon y fortalecieron instituciones de investigación y desarrollo con recursos humanos muy calificados para diseñar, construir y operar de forma económica, limpia, segura y confiable centrales de su propio diseño o para adaptar a las condiciones locales los diseños importados de otros países. También han desarrollado la capacidad para realizar las operaciones del ciclo de combustible nuclear de sus tipos de reactores.

Después de desarrollar y operar reactores del tipo GCR, Francia adoptó el diseño del reactor PWR de Estados Unidos, que luego estandarizó para replicarlo en múltiples unidades de mayor tamaño, lo que constituye su mayor éxito. En la actualidad, exporta electricidad a otros países de Europa con gran beneficio económico para EDF.

Por su parte, Canadá desarrolló un tipo de reactor PHWR que denominó CANDU y lo replicó en varias unidades, algunas de las cuales exportó a varios países de Asia, América y Europa. Además, escaló con éxito el diseño CANDU a unidades de mayor tamaño y desarrolló la industria del ciclo de combustible de uranio natural y de producción de agua pesada.

Para sus primeros dos reactores, Argentina importó la tecnología del reactor PWHR de Alemania y del reactor CANDU de Canadá. Actualmente, tiene la capacidad de construir unidades adicionales para reanudar su programa nucleoelectrico con elevada participación de la industria nacional. Además, ha desarrollado localmente la industria del ciclo de combustible nuclear completo y tiene diseños propios de reactores nucleares de investigación que ha operado localmente y también ha exportado a varios países.

Chile ha formulado un plan de acciones muy bien estructuradas para estudiar, evaluar y decidir la construcción de su primera central nucleoelectrica. El apoyo del OIEA ha sido muy útil en estas tareas.

En cuarto lugar, se concluyó que México tiene la infraestructura institucional básica para reanudar su programa nucleoelectrico. Dicha infraestructura está integrada principalmente por la CFE, la CNSNS y el ININ, apoyados por varias entidades como el IIE, el IPN, la UNAM y otras universidades.

Para reanudar el programa nucleoelectrico, la CFE tendrá que buscar los mecanismos de financiamiento para elevada inversión necesaria para construir una nueva central, con una mayor participación de la industria nacional en el suministro de materiales, equipos y

sistemas. Asimismo será necesario fortalecer la capacidad técnica y los recursos humanos de la CNSNS y del ININ, con mayores recursos presupuestales que los actuales.

3. Mejores prácticas y lecciones aprendidas en la generación de electricidad con energía nuclear en varios países

Desde su creación a mediados de los años cincuenta del siglo XX, la industria nucleoelectrica ha acumulado una serie de experiencias a partir de la ejecución de diversos programas, de los que se desprenden lecciones aprendidas que finalmente resultan en mejores prácticas. Estas lecciones podrían ser consideradas por los países de América Latina y el Caribe interesados en iniciar o continuar sus programas de generación nucleoelectrica.

Entre las lecciones aprendidas, el control del tiempo necesario para la construcción y puesta en operación comercial de una central nucleoelectrica bajo los estándares de calidad requeridos es clave. Esto impacta directamente sobre la reducción de los costos de inversión por kilovatio instalado y los respectivos intereses durante la construcción. Un ejemplo claro de esta experiencia se vivió en Estados Unidos en la década de 1980, cuando se canceló la construcción de varias centrales en diversas etapas de avance a raíz del descontrol en la relación tiempo-costo originadas por diversas causas de tipo técnico, social y administrativo. Ante dicho fracaso, las empresas decidieron abandonar los proyectos y, en algunos casos, solicitaron a las autoridades reguladoras estatales trasladar los costos hundidos a las tarifas eléctricas de sus consumidores. Sin embargo, esto no siempre se logró.

A continuación se compila una breve síntesis de las experiencias de diversos países que han emprendido programas de planeación, diseño, construcción y operación de centrales nucleoelectricas.

México

En 1956 se creó la Comisión Nacional de Energía Nuclear (CNEN), que inició las actividades para promover los usos pacíficos de la energía nuclear en la medicina, la industria, la agricultura, la hidrología y la investigación científica, así como para la exploración y explotación de las reservas de uranio y para iniciar un incipiente programa de reactores.

En 1967 la Comisión Federal de Electricidad (CFE) realizó un estudio sobre la incorporación de centrales nucleares al sistema interconectado centro-sur de México y, con

la asesoría del OIEA, seleccionó Laguna Verde como el sitio idóneo para la primera central nuclear del país. En enero de 1970 se inició el concurso internacional para recibir ofertas de un sistema nuclear de suministro de vapor o una isla nuclear para la primera unidad de Laguna Verde. En 1972 se le otorgó a *General Electric* de Estados Unidos el contrato para un sistema nuclear de suministro de vapor con un reactor BWR de 654 MWe netos. Un año después se ejerció la opción de la segunda unidad (Vélez Ocón, 1997).

En 1968 el gobierno de México había celebrado con el OIEA, en relación con el Tratado de Tlatelolco (OPANAL, 1967), un acuerdo de salvaguardias (OIEA, 1967) que quedó en suspenso cuando, en 1973 y en relación con el TNP (OIEA, 1970), el gobierno de México celebró con el OIEA el acuerdo de salvaguardias que se encuentra en vigencia desde entonces (OIEA, 1973b).

Para el suministro de los reactores y del combustible de la central Laguna Verde no fue necesario firmar un acuerdo bilateral con el gobierno de Estados Unidos ya que, en 1974, se decidió solicitar la intermediación del OIEA, conforme a las provisiones del Estatuto (OIEA, 1990 y Vélez Ocón, 1997). Con esto, el gobierno de México celebró el acuerdo trilateral EE.UU./OIEA/México (OIEA, 1974a), que fue el primero de su tipo en el ámbito internacional con la participación del organismo.

El suministro inicial del UF₆ natural se realizó mediante un contrato con *Comurhex* de Francia. En el contexto del acuerdo trilateral con el OIEA, se contrataron los servicios de enriquecimiento de la Comisión de Energía Atómica (AEC) y la fabricación de los ensambles de combustible de *General Electric*; ambos de Estados Unidos.

Las lecciones aprendidas por México son:

- En el proceso de inicio del proyecto de Laguna Verde, la CFE convocó a un concurso internacional con amplia participación de proveedores del sistema nuclear de suministro de vapor o de la isla nuclear y se promovió una fuerte competencia entre los concursantes. De esta manera logró firmar contratos en términos ventajosos con *General Electric* para las dos unidades de la central. La buena práctica que se recomienda a un país que emprende su primer proyecto nucleoelectrico es realizar un estudio preliminar para conocer en profundidad las tecnologías disponibles en el mundo y los proveedores calificados, a fin de elaborar bases de licitación robustas que promuevan la competencia

entre las ofertas técnicas y económicas y que garanticen la calidad y oportunidad del suministro.

- La participación del OIEA fue muy importante para eliminar los obstáculos que había para la selección del sitio y para el suministro de los equipos y el combustible. La buena práctica recomendable es aprovechar las ventajas que representa la extensa estructura jurídica internacional en materia de regulación del uso seguro de la energía nuclear con fines pacíficos en el mundo y que ha dado lugar al sistema multilateral de seguridad nuclear y salvaguardias (OIEA, 2003).
- El INEN y la CNSNS heredaron las funciones regulatorias de la CNEN y decidieron aplicar para el licenciamiento de la central Laguna Verde el Código Federal Regulatorio (*Code of Federal Regulations*, Part 50 [CFR50]) de Estados Unidos. Para esto se concertó un acuerdo de cooperación con la USNRC, que ha resultado en un fuerte apoyo para la capacitación del personal de la CNSNS, así como para recibir asesoría sobre la interpretación y observancia de las regulaciones.
- La construcción de la central de Laguna Verde se inició en 1976 sin tener suficiente avance de la ingeniería que realizaba la firma Ebasco en Nueva York, lo que resultó un serio obstáculo para el avance de las obras. En 1982 México entró en una severa crisis financiera que afectó el proyecto nuclear. Se decidió entonces que la CFE tomara la dirección del proyecto y la ingeniería de diseño se trasladó a Dos Bocas (Veracruz), donde, bajo la supervisión de Ebasco, se capacitó un numeroso grupo de ingenieros mexicanos, que realizaron la ingeniería de detalle con mucho éxito. La experiencia en el diseño y la construcción de la primera unidad se capitalizó con la segunda unidad, cuyos trabajos se realizaron más rápidamente y con menos obstáculos (Vélez Ocón, 1997).
- El ambicioso plan nacional de energía pronosticaba que para el año 2000 habría una capacidad nuclear instalada de 20 GWe para satisfacer la creciente y elevada demanda del sistema eléctrico, consecuencia del plan nacional de desarrollo industrial. Por ello, la CFE contrató en 1979 a tres consultores internacionales para estudiar las implicaciones económicas, laborales y técnicas del plan de expansión nuclear y, en 1981, convocó a un concurso internacional para el suministro de islas nucleares para una nueva central cuya capacidad podría ser entre 1,800 y 2,400 MWe. Se recibieron ofertas en 1982, pero debido a la severa crisis se canceló el concurso (Vélez Ocón, 1997).

La lección aprendida por México con este estudio de las implicaciones de un ambicioso programa de centrales y con la licitación para el suministro de las islas nucleares de la primera de ellas fue que la amplia experiencia de los consultores internacionales resultó ser muy útil para formular las bases de licitación, que dieron lugar a muy atractivas ofertas en lo técnico. Sin embargo, no se llegaron a conocer las ofertas económicas por la súbita cancelación del concurso. Recurrir a la consultoría internacional es una buena práctica que se recomienda a los países que deseen emprender un programa nucleoelectrico.

- La construcción y puesta en servicio de la central Laguna Verde se desarrollo con un mejor ritmo que el arranque del proyecto y la criticidad inicial del primer reactor se alcanzó en diciembre de 1988. La unidad se conectó a la red en abril de 1989 e inició su operación comercial en julio de 1990. El segundo reactor alcanzó su primera criticidad en septiembre de 1994, la segunda unidad se conectó a la red en noviembre del mismo año y la operación comercial inició en abril de 1995 (OIEA, 2009b y OIEA, 2009c).
- La principal lección aprendida durante la ejecución del proyecto de la central Laguna Verde fue que el haber iniciado la construcción del proyecto con poco avance en la ingeniería, resultó en un serio obstáculo para el avance del proyecto. A esto se sumaron las complicaciones por los frecuentes cambios en la dirección de la CFE y en la dirección del proyecto. El resultado fue que una central que podía construirse en cinco años tardó 14 años en terminar la primera unidad y 19 en total para la entrada en operación de la segunda. La buena práctica que se deriva de esta lección es que la construcción de la central debe no iniciarse hasta que la ingeniería está terminada.
- Adicionalmente, durante la operación de la central la CFE ha observado rigurosamente las regulaciones y normas de la CNSNS y del OIEA. Estas prácticas han mantenido la central de Laguna Verde operando bajo elevados estándares de seguridad y la ubican entre las mejores del mundo. En el manejo del combustible irradiado y de los desechos radiactivos de mediano y bajo nivel también se han seguido las regulaciones y normas nacionales e internacionales.
- En lo que se refiere a impactos en el medioambiente, desde la etapa de construcción se adoptaron las recomendaciones del OIEA para instaurar desde el inicio del proyecto la buena práctica de contar con un programa permanente de monitoreo ambiental de las

condiciones iniciales del sitio y de las emisiones al aire, al agua y a la tierra durante la etapa operativa. Los resultados del monitoreo que ha operado desde 1970 han demostrado que, a partir de que la primera unidad cargó el combustible al reactor en 1988, no han habido afectaciones al medioambiente por encima de los límites nacionales e internacionales en materia de radiactividad ambiental.

- También se ha seguido la buena práctica de instaurar un programa de emergencia radiológico externo que involucra a la CFE y a varias dependencias de los gobiernos federal y estatal en las acciones a tomar para proteger a la población aledaña a la central en caso de una emergencia que diera lugar a la emisión al medioambiente de radiactividad por encima de los límites nacionales e internacionales.
- Finalmente, durante los 19 años que duró la construcción, la ejecución del proyecto representó una importante derrama económica en la región norte de la ciudad de Veracruz y propició el desarrollo socioeconómico de Ciudad Cardel y otras poblaciones vecinas. Estas ciudades fueron dotadas de infraestructura de caminos vecinales, escuelas, servicios de salud y otras obras de beneficio colectivo. El desarrollo de industrias, empresas y firmas de ingeniería nacionales dedicadas al suministro de equipos y componentes, al desarrollo de ingeniería de detalle, a la construcción y puesta en servicio, así como al mantenimiento y apoyo a la operación, resultaron efectos multiplicadores de tipo económico y tecnológico en algunas regiones del resto del país.

Actualmente siguen operando estas dos únicas unidades con una capacidad neta total instalada de 1,365 MWe, que en 2009 generaron 10,108 GWhe con un factor de capacidad conjunto del 84.5% (OIEA, 2009b y OIEA, 2009c). Se está ampliando la potencia instalada en las dos unidades para llegar a 1,560 MWe de capacidad hacia fines de 2010.

En la Estrategia Nacional de Energía publicada por la SENER en febrero de 2010 (SENER, 2009a), una de las líneas de acción clave para lograr la seguridad energética y la sostenibilidad ambiental es diversificar las fuentes de energía, incrementando la participación de tecnologías limpias, como las energías renovables, las grandes hidroeléctricas y la energía nuclear, para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero. En ese contexto, una de las metas del

eje rector de sostenibilidad ambiental hacia 2024 es alcanzar un 35% de participación de las tecnologías limpias en la capacidad del parque de generación eléctrica.

Las principales razones para considerar la energía nuclear como una de las tecnologías limpias para la expansión en el mediano plazo de la generación en el sistema interconectado nacional son:

- Se cuenta con la excelente experiencia de operación de las dos unidades de la central Laguna Verde, con altos índices de seguridad, una elevada disponibilidad y bajos costos de operación, mantenimiento y combustible.
- Se cuenta en el país con una sólida estructura regulatoria y normativa para los usos pacíficos de la energía nuclear, así como un órgano regulador competente.
- En su ciclo de vida completo, Laguna Verde y las futuras centrales emiten a la atmósfera cantidades bajas de CO₂ en comparación con las que emiten otras fuentes convencionales y renovables de generación.
- La volatilidad de los precios del gas natural y su disponibilidad son un riesgo estratégico que obliga a diversificar las fuentes primarias de energía para generar electricidad.
- El costo nivelado de generación nucleoelectrica en México (Fernández de la Garza, 2009) es competitivo frente a los costos de las tecnologías alternas disponibles.
- El programa nucleoelectrico presenta la oportunidad a la industria, las empresas y las firmas de ingeniería nacionales de contribuir con altos niveles de participación en el suministro de bienes y servicios a los proyectos.
- El programa nucleoelectrico presenta la oportunidad a las instituciones de investigación y desarrollo y los centros de educación media y superior de contribuir con la prestación de servicios de apoyo a los proyectos y a la continua formación de recursos humanos de alto nivel.

Francia

Francia inició el programa nucleoelectrico a mediados de la década de 1950 con un fuerte apoyo de la CEA y, en 1959, puso en operación el primer reactor del tipo GCR de una serie de ocho, que actualmente está fuera de servicio.

En 1977 arrancó la operación del primer reactor de una larga serie de 34 unidades del tipo PWR de la clase 900 MWe, con tecnología de origen de Estados Unidos. En 1984 inició la operación de la primera de una serie de 24 unidades del tipo PWR de la clase 1,300 MWe. Actualmente EDF opera estas 58 unidades con una capacidad neta total instalada de 63,130 MWe que, en 2009, generaron 390,000 GWh con un factor de capacidad conjunto del 70.5% (OIEA, 2009b y OIEA, 2009c). Actualmente tienen en construcción un reactor del tipo PWR de la clase 1,600 MWe.

La mayor lección aprendida es que al replicar en varios sitios del territorio francés la construcción de 34 unidades iguales de la clase de 900 MWe y, luego, otra serie de 24 unidades de la clase 1,300 MWe, se logró ponerlas en operación en tiempos cortos del orden de cinco años, con costos controlados que ahora se reflejan en bajos costos de generación. Una buena práctica que se deriva de esta lección es que para construir la primera central es conveniente adoptar un diseño probado y, posteriormente, replicarlo en varias unidades a través de un programa estratégico que permita aprovechar precios accesibles por el uso de la misma tecnología.

La buena práctica de la industria nuclear francesa de observar estrictamente las regulaciones y normas de la CEA en materia de: i) seguridad nuclear, ii) manejo del combustible irradiado y iii) desechos radiactivos, ha tenido como consecuencia que los impactos al medioambiente por la operación de sus centrales y todas las instalaciones asociadas al ciclo de combustible se encuentren por debajo de los límites nacionales e internacionales. El reprocesamiento del combustible irradiado y los estudios para localizar y construir en territorio francés el depósito geológico de desechos radiactivos de alto nivel son una buena práctica y un ejemplo mundial de manejo responsable de la parte posterior del ciclo de combustible.

Por la operación de sus 58 centrales nucleoelectricas, Francia ocupa un lugar destacado entre los países avanzados con menores emisiones de CO₂ per cápita en el mundo. Sus emisiones de encuentran en el orden de 5,81 t CO₂/habitante, cuando la media de los países de la OCDE es de 10,97 t CO₂/habitante y la media mundial de 4,38 t CO₂/habitante.

Con la excepción de la central Flamanville 3 que se encuentra en construcción, Francia no tiene actualmente necesidad de ampliar su parque de centrales nucleoelectricas. El país cuenta con suficiente capacidad instalada para cubrir la demanda de la carga base del

sistema interconectado, e incluso para exportar electricidad a algunos países europeos vecinos con atractivos beneficios económicos. La buena práctica de desarrollar un exitoso programa nucleoelectrico ha resultado ser muy buen negocio para Francia.

El impacto económico de la industria nuclear en la economía francesa es indudable y el objetivo que ahora se han planteado *Areva* y EDF es exportar su tecnología nuclear de diseños avanzados, principalmente a los mercados de Asia, que son los que están mostrando más dinamismo en la construcción de nuevas centrales nucleoelectricas. Esta buena práctica de comercializar de manera competitiva su conocimiento y experiencia en materia nucleoelectrica le podrá aportar beneficios económicos a Francia, adicionales a los que ya obtiene por la exportación de electricidad generada en territorio francés.

Estados Unidos

Estados Unidos inició su programa de centrales nucleoelectricas bajo los auspicios de la antigua AEC y con la participación de empresas privadas fabricantes de equipos para la industria eléctrica. Con los años, la AEC se transformó en una de las divisiones del actual Departamento de Energía (USDOE). Entre las empresas que desarrollaron diseños de reactores comerciales se encuentran *General Electric*, con el tipo BWR; *Westinghouse*, *Combustión Engineering* y *Babcock & Wilcox*, con el diseño PWR; y *General Atomics* con el reactor del tipo de alta temperatura enfriado con gas (HTGR), además de otros prototipos que nunca alcanzaron la etapa comercial.

Con la diversidad de diseños se creó una intensa competencia entre los proveedores para obtener contratos con las empresas eléctricas públicas y privadas para la venta de sistemas nucleares de suministro de vapor. Estos sistemas se destinaron a centrales que fueron diseñadas y construidas por varias firmas de ingeniería. Dichas firmas fueron sometidas para su licenciamiento a la AEC y, luego, a la USNRC, que finalmente heredó las funciones regulatorias. Cada central era única en su tipo, por lo que el proceso para obtener primero la licencia de construcción y luego la de operación derivó en una tarea muy compleja para la USNRC y para las firmas de ingeniería y empresas constructoras.

Algunas de las empresas eléctricas eran propietarias de varias centrales nucleoelectricas y adquirieron buena experiencia en la dirección de sus proyectos. Otras

empresas eran pequeñas, sin experiencia en proyectos de este tipo y, en algunos casos, solo eran propietarias de la central nuclear. Como resultado, creció la capacidad nucleoelectrica instalada en el país. Sin embargo, después del accidente de la central de Three Mile Island en Pennsylvania en 1979, se frenaron las órdenes de nuevas centrales y algunos proyectos fueron cancelados por problemas financieros, ocasionados por retrasos en su construcción. La última central que entró en operación comercial arrancó en 1996. Hoy en día se encuentra en construcción en el mismo sitio un reactor del tipo PWR con 1,165 MWe de capacidad, que se espera que inicie su operación en 2012.

Actualmente operan en Estados Unidos 69 reactores del tipo PWR y 35 del tipo BWR. Por otro lado, hay 28 unidades fuera de servicio, entre ellas, 12 del tipo PWR, 10 del tipo BWR, dos del tipo HTGR, una del tipo FBR, una del tipo PHWR y dos de tipo experimental. Las 104 unidades en operación tienen una capacidad neta total instalada de 100,683 MWe, que en 2009 generaron 796,751 GWhe con un factor de capacidad conjunto del 90.3% (OIEA, 2009b y OIEA, 2009c). Esta flota de reactores representa actualmente el 23.7% del total mundial de unidades operativas y el 27.1% de la capacidad instalada en el mundo.

La lección aprendida por Estados Unidos es que la diversidad de diseños y la complejidad del proceso de licenciamiento representaba un serio obstáculo para continuar construyendo nuevas centrales nucleoelectricas de manera eficiente y económica. Por lo tanto, se tomó la decisión conjunta entre los industriales, las empresas eléctricas y la USNRC de simplificar el proceso de licenciamiento para otorgar una única licencia a diseños estándar de los proveedores previamente aprobados y complementar la licencia con las adecuaciones pertinentes según las características del sitio donde se construyan las centrales estandarizadas.

Después del accidente de la central de Three Mile Island, la USNRC revisó en profundidad las regulaciones y normas aplicables a los reactores del tipo PWR y también del tipo BWR. Como resultado, se mejoraron sus especificaciones técnicas de operación y mantenimiento, elevando sus índices de seguridad y confiabilidad. También se gestó un proceso de consolidación en la propiedad de las centrales nucleares, de manera que las empresas con mayor experiencia compraron las centrales de otras empresas de menor

capacidad operativa y se hicieron cargo de su gestión integral, mejorando los índices de desempeño.

Todas las centrales nucleares de Estados Unidos están almacenando temporalmente su combustible irradiado en los sitios de las mismas centrales. Se espera que el USDOE obtenga la licencia para construir y operar un depósito geológico en el país; sin embargo, se han encontrado obstáculos financieros, políticos y sociales a causa de falta de consenso en el Congreso de Estados Unidos.

Las buenas prácticas permitirán reanudar con menores dificultades el programa nucleoelectrico de Estados Unidos, las cuales son similares a las que inducen el renacimiento nucleoelectrico en el resto del mundo:

- Se cuenta con reciente y excelente experiencia en la operación de la mayoría de las unidades que hay en el mundo, altos índices de seguridad, elevada disponibilidad y bajos costos de operación, mantenimiento y combustible.
- Existen en el mundo sólidas estructuras regulatorias y normativas para usos pacíficos de la energía nuclear, así como órganos reguladores nacionales competentes. También se cuenta con el OIEA, que se encarga de divulgar la normatividad internacional de seguridad nuclear y de realizar las tareas de salvaguardias que se derivan del TNP.
- En sus ciclos de vida completos las centrales actuales y futuras emiten bajas cantidades de CO₂ a la atmósfera comparadas con otras tecnologías convencionales y renovables de generación.
- La volatilidad de los precios del gas natural y su disponibilidad mundial son un riesgo estratégico que obliga a diversificar las fuentes primarias de energía para generar electricidad.
- El costo nivelado de generación nucleoelectrica es competitivo con el de las tecnologías alternas disponibles.
- El combustible irradiado se almacena temporalmente de manera segura, económica y confiable en las centrales y se almacenará definitivamente en los depósitos geológicos cuando se construyan y empiecen a operar.

Canadá

La industria nuclear de Canadá se ubica principalmente en el sector público y, por conducto de la empresa AECL, el gobierno ha encabezado el desarrollo nucleoelectrico desde hace 60 años. Canadá es uno de los cinco países del mundo que posee las mayores reservas identificadas de uranio, que suman 423,200 toneladas y que representan el 7.7% del total mundial. En 2006 Canadá era el mayor productor de uranio, con aproximadamente 9,862 toneladas equivalentes al 25% del total mundial.

En 1967 entró en operación un prototipo PHWR de 206 MWe netos de capacidad, que ya salió de operación. La primera unidad CANDU de la clase 600 MWe inició su operación en 1971, y la unidad de la clase 900 MWe arrancó en 1977. Canadá ha exportado reactores PHWR prototipos de pequeña potencia a Pakistán (KANUPP, 1971) e India (RAPPS, 1973, 1974), así como reactores CANDU de la clase 600 MWe a Argentina (Embalse, 1983), República de Corea (Wolsong, 1982, 1997, 1998, 1999), Rumania (Cernavoda, 1996, 1997) y China (Qinshan, 2002, 2003).

Actualmente en Canadá operan 18 unidades con una capacidad neta total instalada de 12,569 MWe, que en 2009 generaron 85,315 GWhe con un factor de capacidad conjunto del 77.5% (OIEA, 2009b y OIEA, 2009c). También hay una capacidad neta instalada no operativa de 2,530 MWe en tres unidades que se encuentran indefinidamente fuera de servicio.

Existen planes para ampliar la capacidad instalada en varios sitios, ya que hacia 2020, además de la rehabilitación del complejo de *Bruce Power* y de la central de Darlington, se contempla añadir 2,000 MWe con la construcción de dos nuevas unidades y extender la vida de las unidades del sitio de Pickering.

El desarrollo del diseño propio de reactor del tipo PHWR, conocido como CANDU, se basó en una fuerte infraestructura de investigación y desarrollo de la empresa estatal AECL. Sus primeros prototipos evolucionaron hacia las centrales de la clase 600 MWe y, posteriormente, hacia las unidades de la clase 900 MWe. Ahora se trabaja en el diseño del reactor *Advanced Candu Reactor* (ACR-1000) de la generación III+, que ya ha completado la fase 2 del proceso de licenciamiento de la Comisión Canadiense de Seguridad Nuclear (CNSC). En la era del renacimiento mundial de la energía nuclear, AECL piensa competir en

los mercados internacionales durante los próximos 20 años con este reactor de 1,000 MWe de capacidad.

La primera lección aprendida por Canadá es tecnológica. Se refiere a los problemas de fragilidad encontrados en los tubos de presión horizontales de las calandrias de los reactores, que son una característica propia del diseño CANDU. Esto se resolvió con laboriosos programas de mayor mantenimiento de las centrales. La segunda lección es la relativa al manejo del D₂O (agua pesada) que sirve de moderador y refrigerante de los reactores y permite operarlos con combustible de uranio natural, sin necesidad de enriquecerlo. Se ha requerido implementar en las centrales un sistema de purificación y reposición del agua pesada, ya que durante la operación de los reactores la captura de neutrones en el agua pesada produce tritio, que es un radioisótopo del hidrógeno con vida media de 12.32 años que representa un riesgo radiológico (Murray, 2001). La buena práctica asociada a estas lecciones aprendidas es la necesidad de implementar durante toda la vida de las centrales rigurosos programas de inspección, mantenimiento y de protección radiológica de los operadores.

Finlandia

Finlandia tiene un pequeño pero exitoso programa nucleoelectrico que se inició en 1977, cuando entró en operación la primera de dos unidades del tipo PWR de diseño ruso. Casi inmediatamente se adoptó también el reactor del tipo BWR de diseño sueco que entró en operación en 1978, cuando se activó la primera de estas dos unidades. En los casi 30 años de experiencia operacional, las cuatro unidades han acumulado un excelente récord que se encuentra entre los mejores del mundo (OIEA, 2009c).

Actualmente en Finlandia operan cuatro unidades con una capacidad neta total instalada de 2,696 MWe, que en 2009 generaron 22,582 GWhe con un factor de capacidad conjunto del 95.6% (OIEA, 2009b y OIEA, 2009c). Actualmente existe un reactor de diseño francés con 1,600 MWe de capacidad en construcción, cuyo programa ha incurrido en retrasos debido a los obstáculos que ha enfrentado la gerencia del proyecto por la participación de muchos subcontratistas. Esto ha provocado un incremento en los costos de inversión. Recientemente el Parlamento finlandés aprobó la construcción de dos nuevos

reactores de energía nuclear, los cuales le permitirán a la nación nórdica ser autosuficiente en la producción de electricidad en 2020.

La lección aprendida por Finlandia con los reactores PWR de diseño ruso es que las autoridades adoptaron medidas adicionales de seguridad que no se exigían en la regulación del país de origen (como son dotar a los reactores con los edificios de contención primaria que tienen todos las centrales occidentales, pero que no tenían las ubicadas en territorio ruso), pero se hicieron obligatorias en este caso. La buena práctica es aumentar las barreras de contención para evitar la dispersión accidental de material radiactivo al medioambiente, lo que eleva considerablemente los niveles de seguridad nuclear de las unidades, a pesar de que también se eleva el costo de inversión.

La lección aprendida con el reactor de diseño francés es que, después de tantos años transcurridos desde la puesta en servicio del cuarto reactor, la construcción de la nueva unidad equivale a una primera central. La buena práctica sería planear con mucho cuidado el tipo de contrato y la organización del nuevo proyecto para asegurar que los tiempos y costos no se salgan de control.

República de Corea

República de Corea ha adoptado en paralelo dos tecnologías para su exitoso programa nucleoelectrico: la del tipo de reactor PWR y la del tipo PHWR.

La primera unidad del tipo PWR fue suministrada por *Westinghouse* de Estados Unidos e inició su operación en 1977; luego, se construyeron otras cinco unidades del mismo origen. Otras dos unidades del tipo PWR fueron contratadas con *Framatome* de Francia y entraron en operación en 1988 y 1989 respectivamente. Por último, a partir de 1994 entró en operación la primera de otras ocho unidades que, con un exitoso programa de transferencia de tecnología, fueron suministradas por un consorcio local.

El primero de los reactores tipo CANDU fue suministrado por AECL de Canadá e inició su operación en 1982. Otras tres unidades CANDU fueron suministradas por el consorcio AECL/DHI y entraron en operación sucesivamente en 1997, 1998 y 1999 (OIEA, 2009b y OIEA, 2009c).

Actualmente en República de Corea operan esas 20 unidades con una capacidad neta total instalada de 17,705 MWe, que en 2009 generaron 141,123 GWhe con un factor de capacidad conjunto del 91.0%. Además, existen seis reactores del tipo PWR en construcción, con 6,520 MWe de capacidad; de los cuales dos reactores se ubican en el mismo sitio que los reactores CANDU en operación (OIEA, 2009b y OIEA, 2009c). El programa coreano ha sido tan exitoso que recientemente los Emiratos Árabes Unidos contrataron el suministro de varios reactores del diseño coreano desarrollado durante más de 30 años de experiencia.

La lección aprendida por República de Corea es que mediante el fomento a los programas de transferencia paulatina de tecnología hacia la industria nacional se ha logrado diseñar y construir reactores con tecnología propia, lo que permitió que hoy en día el país compita con éxito en los mercados internacionales. La buena práctica que se deriva de esta lección es la conveniencia de planear en el mediano y largo plazo una estrategia para asimilar la tecnología importada de los primeros reactores que se construyan en el país.

Argentina

Cuando en 1950 se creó en Argentina la CNEA, se iniciaron en Latinoamérica las tareas de diseño y construcción de reactores de investigación. De esta manera, en 1958 se puso en operación el primero (RA-1) y, en 1967, se puso en marcha el reactor RA-3 para la producción de radioisótopos. Los reactores de investigación y de pequeña potencia de diseño argentino se han exportado a Perú, Argelia, Egipto y Australia. La CNEA tiene tres centros de investigación y desarrollo tecnológico en el ámbito nuclear: el centro atómico Bariloche, en la provincia de Río Negro; el centro atómico Constituyentes y el centro atómico Ezeiza, ambos en la provincia de Buenos Aires.

Argentina decidió adoptar la tecnología de los reactores del tipo PHWR. En 1974 se inició la operación comercial de la primera central contratada con *Siemens AG* de Alemania, con una capacidad bruta de 357 MWe. Para la segunda central se seleccionó a AECL para suministrar una unidad PHWR del tipo canadiense CANDU con una capacidad bruta de 648 MWe, que inició su operación comercial en 1984. Para obtener el combustible de uranio natural, se desarrollaron operaciones de exploración y minería, y de refinación y fabricación de ensamblajes, para lo cual se creó un complejo minero fabril en la provincia de Mendoza.

También se construyó una instalación para producir agua pesada en Arroyito, en la provincia de Neuquén. La CNEA tiene una planta de enriquecimiento de UF₆ en el complejo tecnológico Pilcaniyeu, en la provincia de Río Negro. Esta planta se utiliza para alimentar los reactores de investigación y de producción de radioisótopos, así como para operar uno de los reactores nucleoelectricos con algunos ensambles de uranio ligeramente enriquecido.

Actualmente, NASA opera dos unidades con una capacidad neta total instalada de 935 MWe, que en 2009 generaron 7,589 GWhe con un factor de capacidad conjunto del 92.7% (OIEA, 2009b y OIEA, 2009c). Además, se inició la construcción de un tercer reactor de 692 MWe de capacidad, también del tipo PHWR alemán, cuyas obras fueron suspendidas durante muchos años, pero que recientemente se reanudaron y se espera ponerlo en operación en 2012. En el programa de expansión se planea una nueva central nuclear de dos unidades de 750 MWe cada una, que podrían entrar en operación en 2016 y 2017.

Después de muchos años de negociaciones, el 18 de junio de 1991 en Guadalajara, los gobiernos de Argentina y de Brasil firmaron un acuerdo para el uso exclusivamente pacífico de la energía nuclear. En el contexto de este acuerdo se creó un organismo bilateral para implementar un sistema común de contabilidad y control de materiales nucleares (SCCC): la Agencia Brasileño-Argentina de Contabilidad y Control de Materiales Nucleares (ABACC). Además, estos países iniciaron negociaciones con el OIEA para celebrar un acuerdo cuadripartito de salvaguardias basado en el SCCC (OIEA, 1994c), que finalmente se firmó el 13 de diciembre de 1991 en la sede del OIEA en Viena, Austria.

Por otro lado, en la VIII sesión especial de la Organización para la Proscripción de las Armas Nucleares en América Latina y el Caribe (OPANAL) celebrada el 18 de enero de 1994 en la ciudad de México, el gobierno de Argentina depositó con el gobierno de México los instrumentos de ratificación y reserva del Tratado de Tlatelolco (OPANAL, 1967), con las enmiendas realizadas en 1990, 1991 y 1992. En consecuencia, a partir de esa fecha dicho tratado entra en vigor para la República Argentina que, además, se convierte en miembro pleno del OPANAL (OIEA, 1994a). Finalmente, el 10 de febrero de 1995, el gobierno de Argentina accedió al TNP (OIEA, 1970), con lo que se concluyeron las acciones diplomáticas para adherirse plenamente a los instrumentos internacionales de salvaguardias de instalaciones y materiales para prevenir la proliferación de las armas nucleares.

La lección aprendida por Argentina es que el haber iniciado su actividad hace 60 años con un programa de formación de recursos humanos de alto nivel en las tecnologías nucleares, así como la creación de centros de investigación y desarrollo tecnológico, le permitió diseñar y construir reactores de investigación y producción de radioisótopos propios que la colocaron muy pronto como líder en América Latina y como suministrador de los diseños hacia otras regiones del mundo. Esa infraestructura es la que ha apoyado desde un principio el programa de construcción y operación de las centrales nucleoelectricas de origen extranjero, con una creciente participación nacional, particularmente en el ciclo de combustible. La buena práctica que se deriva de esta lección es que los países que desean iniciar o reanudar un programa de centrales nucleares deben apoyar fuertemente con recursos humanos y financieros a sus centros de investigación y desarrollo de tecnología nuclear, así como promover la participación nacional en la fabricación de equipos y componentes, y el desarrollo de las operaciones del ciclo de combustible.

A pesar de que en materia de salvaguardias los gobiernos de Argentina y de Brasil fueron muy renuentes a adherirse al Tratado de Tlatelolco y al TNP, aprendieron la lección de que mediante prolongadas negociaciones diplomáticas se puede encontrar una salida viable para poner sus instalaciones y materiales nucleares bajo un sistema bilateral de contabilidad y control que, con la intermediación del OIEA, opera de manera similar al mecanismo europeo de la *European Atomic Energy Community* (EURATOM). Este organismo multilateral europeo tiene desde 1973 un acuerdo con el OIEA en relación con la aplicación de las salvaguardias estipuladas en el TNP (OIEA, 1973a).

En el caso de ABACC, profesionales argentinos calificados inspeccionan las instalaciones de Brasil y profesionales brasileños calificados inspeccionan las instalaciones de Argentina. La ABACC notifica al OIEA periódicamente para que este se cerciore de que las salvaguardias se aplican conforme al acuerdo cuatripartito (OIEA, 1994c). La buena práctica que se deriva de esta lección es recurrir a las negociaciones bilaterales y la intermediación del OIEA para acceder a la tecnología nuclear del exterior, que de otra manera se vería obstaculizada por falta de garantías de salvaguardias internacionales.

Brasil

La Comisión Nacional de Energía Nuclear (CNEN) fue creada en 1956 y ahora es un organismo federal autónomo vinculado al Ministerio de Ciencia y Tecnología de Brasil. La CNEN tiene tres centros de investigación y desarrollo tecnológico en el ámbito nuclear: el Centro de Desarrollo de Tecnología Nuclear, en Belo Horizonte; el Centro Regional de Ciencias Nucleares del Centro-oeste, en Abadía de Goiás; el Centro Regional de Ciencias Nucleares del Noreste, en Recife. Además, cuenta con el Instituto de Ingeniería Nuclear, en Río de Janeiro; el Instituto de Investigaciones Energéticas y Nucleares, en San Pablo; el Instituto de Radioprotección y Dosimetría, en Río de Janeiro; y un laboratorio, en Pozos de Caldas.

Brasil depende en más del 85% de la hidroelectricidad y para diversificar su matriz energética en el sector eléctrico decidió iniciar un programa de centrales nucleares y adoptar la tecnología de los reactores del tipo PWR. De esta manera, en 1985 se inició la operación comercial de la primera unidad en el sitio de Angra con una capacidad neta de 626 MWe, contratada como un proyecto llave en mano con *Westinghouse* de Estados Unidos.

Ya en el año 1975, el gobierno de Brasil había firmado un acuerdo con el gobierno de Alemania para el suministro de hasta ocho unidades de 1,300 MWe en un plazo de 15 años, de las cuales se iniciaría la construcción de las primeras dos en el mismo sitio de Angra. El acuerdo incluía un amplio capítulo de transferencia de tecnología a la empresa gubernamental Nuclebrás y sus subsidiarias, el cual fue objetado severamente por el gobierno de Estados Unidos y por otras naciones europeas con el argumento de que Brasil no había firmado el TNP.

La primera unidad del acuerdo con Alemania fue suministrada por Kraftwerk Union (KWU), con una capacidad neta de 1,245 MWe, que inició su operación comercial en 2001. Brasil tiene el 5% de las reservas mundiales de uranio (278,400 toneladas) (OCDE, 2008b), y ha realizado operaciones de exploración y minería en Pozos de Caldas, Estado de Minas Gerais; Caetité, Estado de Bahía; y Santa Quiteria, Estado de Ceará. Para fabricar el combustible de uranio enriquecido para las centrales, al amparo del acuerdo con Alemania, se desarrollaron operaciones de conversión y enriquecimiento de UF_6 y de fabricación de

ensambles en la empresa del ciclo de combustible Industrias Nucleares de Brasil, que reemplazó a las subsidiarias de Nuclebrás que realizaban estas operaciones anteriormente.

Actualmente la empresa de economía mixta Eletrobrás Termonuclear, S. A. (Eletronuclear), subsidiaria de Eletrobrás, opera dos unidades con una capacidad neta total instalada de 1,884 MWe, que en 2009 generaron 12,975 GWhe con un factor de capacidad conjunto del 78.6% (OIEA, 2009b y OIEA, 2009c). En noviembre de 2006, el gobierno de Brasil anunció que se continuaría la construcción del tercer reactor en el sitio de Angra con una capacidad de 1,405 MWe. Para dicha construcción se contrató en 2008 a la empresa *Areva*, y se espera que el reactor inicie sus operaciones en 2015. El gobierno de Brasil también anunció planes para construir a partir de 2015 cuatro reactores de 1,000 MWe en un solo sitio.

Por otro lado, el 30 de mayo de 1994 en la ciudad de México, el gobierno de Brasil depositó con el gobierno de México los instrumentos necesarios para la entrada en vigor para Brasil del Tratado de Tlatelolco (OPANAL, 1967) y, de esta manera, dicho país se convirtió en miembro pleno del OPANAL (OIEA, 1994b). Finalmente, el 18 de septiembre de 1998, el gobierno de Brasil accedió al TNP (OIEA, 1970), con lo que se concluyeron las acciones diplomáticas para la adhesión plena a los instrumentos internacionales de salvaguardias de instalaciones y materiales para prevenir la proliferación de las armas nucleares.

En forma similar al caso de Argentina, la lección aprendida por Brasil es que el haber iniciado muy temprano con el impulso a un programa de formación de recursos humanos de alto nivel en las tecnologías nucleares, así como a la creación de centros de investigación y desarrollo tecnológico, le permitió asimilar la transferencia de tecnología objeto del acuerdo con Alemania. Aunque se presentaron obstáculos para implementar ese acuerdo por motivos políticos y económicos, finalmente esa infraestructura es la que servirá de apoyo al programa futuro de construcción y operación de las centrales nucleoelectricas de origen extranjero, con una creciente participación nacional, particularmente en el ciclo de combustible. La buena práctica que se deriva de esta lección es que los países que desean iniciar o reanudar un programa de centrales nucleares deben apoyar fuertemente con recursos humanos y financieros sus centros de investigación y desarrollo de tecnología nuclear, así como promover la participación nacional en la fabricación de equipos y componentes, y el desarrollo de las operaciones del ciclo de combustible.

La lección aprendida por Brasil y Argentina en materia de salvaguardias, que en un principio fueron muy renuentes a adherirse en sus inicios al Tratado de Tlatelolco y al TNP, fue que mediante prolongadas negociaciones diplomáticas finalmente encontraron una salida viable para poner sus instalaciones y materiales nucleares bajo un sistema bilateral de contabilidad y control que, con la intermediación del OIEA, opera de manera similar al mecanismo europeo de EURATOM. Este organismo multilateral europeo tiene desde 1973 un acuerdo con el OIEA en relación con la aplicación de las salvaguardias estipuladas en el TNP (OIEA, 1973a).

La buena práctica que se deriva de esta lección es recurrir a las negociaciones bilaterales y la intermediación del OIEA para acceder a la tecnología nuclear del exterior, que de otra manera se vería obstaculizada por falta de garantías de salvaguardias internacionales, como fue el caso de Brasil por las objeciones de varios países a su acuerdo con Alemania.

India

En 1948 se creó la Comisión de Energía Atómica (AEC) y, en 1954, se incorporó al recién creado Departamento de Energía Atómica (DAE), del que dependen entre otras dependencias:

- El *Bhabha Atomic Research Centre* (BARC), que realiza investigación y desarrollo en ciencia e ingeniería nuclear avanzadas.
- El *Indira Gandhi Centre for Atomic Research* (IGCAR), que realiza investigación e ingeniería avanzadas de la tecnología de los reactores rápidos de cría con combustible MOX.
- La *National Power Corporation of India, Ltd.* (NPCIL), la cual diseña, construye, pone en servicio y opera los reactores térmicos.
- La *Uranium Corporation of India* (UCIL), que explora y produce uranio y torio.
- La empresa BHAVINI, la cual desarrolla y operará los reactores rápidos de cría.
- El *Heavy Water Board* (HWB), que produce el agua pesada para los reactores de investigación y los reactores PHWR en seis plantas.

- El *Nuclear Fuel Complex Hyderabad* (NFCH), que fabrica el combustible de los reactores PHWR con uranio natural y produce el combustible tipo BWR con uranio enriquecido en el extranjero.

La Ley de Energía Atómica de 1962 reserva en exclusiva a empresas de propiedad del gobierno de India el control de las actividades relacionadas con la energía nuclear.

En 1957 se creó el BARC y, entre otras tareas, se le ha encargado el diseño, la construcción y la operación de reactores de investigación para la producción de radioisótopos y de plutonio, así como el desarrollo del reactor avanzado de agua pesada del tipo AHWR, destinado al mercado de exportación. También realiza el reprocesamiento de los combustibles irradiados en los reactores PHWR no sujetos a salvaguardias del OIEA.

En el contexto del acuerdo bilateral entre los gobiernos de Estados Unidos y de India del 8 de agosto de 1963, la empresa *General Electric* suministró bajo un contrato llave en mano las dos primeras unidades de la central de Tarapur. Estas unidades son del tipo BWR, con una capacidad de 150 MWe netos cada una, y utilizan uranio ligeramente enriquecido bajo salvaguardias del OIEA (OIEA, 1971). La operación comercial de las dos unidades se inició en octubre de 1969 y son las únicas del tipo BWR que se han construido en India (OIEA, 2009b y OIEA, 2009c).

La India inició su extenso programa nucleoelectrico de reactores del tipo PHWR con la primera unidad de la central Rajasthán, de 90 MWe de capacidad neta. Esta primera unidad fue un proyecto conjunto de AECL con la NPCIL suministrado bajo un acuerdo de los gobiernos de Canadá y de India celebrado el 16 de diciembre de 1963. Posteriormente, en 1974 ambos gobiernos y el OIEA acordaron aplicarle a la central las salvaguardias del OIEA (OIEA, 1974b). La operación comercial de la primera unidad se inició en diciembre de 1973 y la de la segunda, en abril de 1981. Desde entonces, la NPCIL ha diseñado, suministrado, construido y, a partir de 1984, puesto en operación 14 unidades PHWR de la clase 220 MWe, que son réplicas de la tecnología de la segunda unidad CANDU de Rajasthán basada en el reactor prototipo CANDU de *Douglas Point*. También la NPCIL ha diseñado, suministrado, construido y, a partir de 2005, puesto en operación dos unidades PHWR de la clase 540 MWe en el sitio de Tarapur (OIEA, 2009b y OIEA, 2009c).

Actualmente, la NPCIL opera 19 unidades con una capacidad neta total instalada de 4,189 MWe, que en 2009 generaron 14,745 GWhe con un factor de capacidad conjunto del 40.2% (OIEA, 2009b y OIEA, 2009c). Actualmente existen cuatro unidades en construcción con 2,506 MWe de capacidad neta. De esas cuatro unidades, el Ministerio de Energía Atómica e Industria (MAEP) de Rusia ha suministrado dos reactores de 917 MWe netos cada uno del tipo PWR ruso (VVER), que se construyen en el sitio de Kundankulam y que están bajo salvaguardias del OIEA (OIEA, 1989a). El combustible irradiado se reprocesará en India para conservar el plutonio residual y fabricar combustibles MOX. Otra de las unidades es un reactor de cría FBR de 470 MWe netos, que construye y operará la empresa estatal *Bhavini*.

India depende en un 68% del carbón para su generación eléctrica y, actualmente, la energía nuclear sólo produce el 2.8% de la energía eléctrica. Las reservas de uranio de la India son modestas (77,500 toneladas), pero los recursos de torio son de 290,000 toneladas, que representan el 25% del total mundial. Por eso, un objetivo estratégico de India para alcanzar de forma creciente y autónoma su seguridad energética al mediano plazo es desarrollar reactores de cría FBR que utilicen el isótopo ${}_{90}\text{Th}^{232}$ del torio para transformarlo en ${}_{92}\text{U}^{233}$, que es otro isótopo fisible del uranio.

El gobierno de India planea instalar hacia 2018 otros 16,740 MWe netos en 20 unidades de distintos tipos: PHWR, 6,400 MWe; VVER, 4,200 MWe; PWR, 5,200 MWe; y FBR, 940 MWe. La empresa mixta Nuclear *Termal Power Corporation* (NTPC) planea participar en la construcción de una de las centrales del tipo PHWR que podría iniciarse en 2017.

El suministro de uranio extranjero lo han realizado las empresas *Rosatom* (Rusia) y *Areva* (Francia), y además hay importaciones de Kazajstán, Brasil, Sudáfrica y, a futuro, también habrá importaciones de Namibia y de Mongolia.

India puso serias objeciones y no firmó el TNP. Poco tiempo después, en 1974, detonó un artefacto de 13 kilotones en lo que denominó una “explosión nuclear pacífica”, con lo cual demostró el uso dual que había estado dando a algunas de las instalaciones y materiales que se encontraban bajo salvaguardias del OIEA y que, en gran medida, desarrolló autónomamente con la asistencia inicial de Canadá y de Estados Unidos. Esta situación condujo al aislamiento internacional de India, que se privó de la asistencia y de los suministros de equipos y materiales nucleares extranjeros durante muchos años.

En 18 de julio de 2005, el Presidente de Estados Unidos y el Primer Ministro de India hicieron una declaración conjunta acerca de un acuerdo para facilitar la cooperación de ambos países en el campo nuclear. Este acuerdo fue aprobado por el Congreso de Estados Unidos el 1º de octubre de 2008 y suspendió la moratoria del comercio nuclear de esta nación con India. Entre las provisiones del acuerdo se incluyen las siguientes:

- India permite el acceso de los inspectores del OIEA a su programa nuclear civil (pacífico), con el antecedente de que en 2006 ya había ofrecido voluntariamente colocar 14 de sus 22 centrales nucleoelectricas bajo salvaguardias permanentes del OIEA (OIEA, 1994b), incluyendo algunas de las desarrolladas con tecnología propia.
- India promete poner sus futuras centrales civiles y reactores de cría bajo salvaguardias ampliadas del OIEA, pero se reserva el derecho de designar cuáles instalaciones son de carácter civil.
- India acepta continuar con la moratoria de las pruebas de armas nucleares y se compromete a reforzar la seguridad física de sus arsenales; y Estados Unidos permite a sus empresas construir centrales nucleoelectricas en India y suministrarles combustible para su programa civil.

El 25 de julio de 2008, el gobierno de India comunicó al OIEA (OIEA, 2008) los criterios seguidos para designar cuáles instalaciones considera que son del tipo civil e identificó las 14 unidades que pondrá bajo las salvaguardias del OIEA entre 2006 y 2014, así como otras instalaciones no estratégicas. Finalmente, el 2 de febrero de 2009 el gobierno de India y el OIEA firmaron en Viena el acuerdo para la aplicación de salvaguardias a instalaciones nucleares civiles (OIEA, 2009a), con lo que el país dio un gran paso hacia adelante para incorporarse parcialmente a los mecanismos internacionales de salvaguardias de instalaciones y materiales que existen para prevenir la mayor proliferación de armas nucleares. No obstante lo significativo del paso anterior, al igual que Israel y Pakistán, India no ha firmado el TNP porque lo considera discriminatorio y ha manifestado que lo haría sólo si se le reconoce su calidad de Estado Parte del Tratado poseedor de armas nucleares, es decir, si le reconoce el estatus de potencia mundial que no tenía cuando se adoptó el TNP.

La lección aprendida por India en este largo proceso de muchos años es que con un robusto programa de formación de recursos humanos y de creación y apoyo a instituciones

de investigación y desarrollo tecnológico fue capaz de diseñar, construir y poner en operación de forma casi totalmente autónoma una importante flotilla de centrales, incluyendo casi enteramente las instalaciones para dotarlas de combustible. También aprendió la lección de que para poder acelerar la expansión de su programa de centrales con unidades de mayor tamaño tuvo que recurrir a la cooperación internacional y relajar sus objeciones a las salvaguardias internacionales del OIEA, que ha adoptado con algunas reservas. Las buenas prácticas que se desprenden de estas lecciones son, por un lado, acompañar los convenios de cooperación con los acuerdos de salvaguardias internacionales, con la participación del OIEA y, por el otro, aprovechar el talento humano de gran capacidad y las instituciones de investigación y desarrollo para utilizar los recursos naturales de energéticos primarios que se tengan disponibles.

China

Anualmente China genera 3,000,073 GWh de energía eléctrica, equivalente al 16.9% de la electricidad mundial. Sin embargo, el 80% de su electricidad la produce con centrales carboeléctricas, por lo que las emisiones totales de todos los sectores, incluido el eléctrico, suman anualmente 6,028 millones de toneladas de CO₂, que representan aproximadamente el 20.8% del total mundial (AIE, 2010a). Actualmente China sólo genera el 1.9% de su electricidad con energía nuclear, pero es el país que ahora tiene el mayor número de centrales nucleoelectricas en construcción en el mundo y planea añadir otras más.

La empresa estatal *China National Nuclear Corporation* (CNNC) realiza, a través de muchas subsidiarias, las siguientes actividades de investigación y desarrollo de ciencia y tecnología nuclear: diseño, construcción y operación de centrales nucleoelectricas; exploración y producción de uranio; todas las demás operaciones del ciclo de combustible, incluido el reprocesamiento del combustible irradiado y el reciclado del plutonio y uranio residuales; y las operaciones de manejo y almacenamiento de desechos radiactivos.

El primer reactor nucleoelectrico que suministró la CNNC fue un diseño propio de tipo PWR de 288 MWe netos de capacidad. Este prototipo entró en operación en abril de 1994 en el sitio de Qinshan, donde ahora operan otros dos reactores del mismo tipo pero de 610 MWe de capacidad cada uno. Estas unidades entraron en operación en abril de 2002 y

en mayo de 2004 respectivamente. En el mismo sitio se construyen actualmente otras dos unidades iguales, suministradas también por la CNNC.

En febrero y en mayo de 1994, casi simultáneamente con la primera unidad de Qinshan, iniciaron su operación en el sitio de Guandong dos unidades del tipo PWR suministradas por la empresa *General Electric, UK*, cada una con 944 MWe de capacidad.

La empresa francesa *Framatome*, que ahora es subsidiaria de *Areva*, suministró dos unidades del tipo PWR de la clase de los reactores medianos de 938 MWe de capacidad. Estas unidades iniciaron operación en mayo de 2002 y en enero de 2003 en el sitio de Lingao.

La empresa AECL de Canadá suministró los únicos dos reactores PHWR del tipo CANDU que operan en China, los cuales tienen una capacidad de 650 MWe cada uno. Dichos reactores entraron en operación en diciembre de 2002 y en julio de 2003 en el sitio de Qinshan.

Finalmente, en mayo de 2003 y en agosto de 2007, iniciaron su operación en el sitio de Tianwan las dos unidades del tipo VVER de 993 MWe de capacidad. Estas unidades fueron suministradas por el gobierno de la ex Unión Soviética a través de la empresa estatal *Atomstroyexport*.

Después de 16 años del arranque de las primeras centrales nucleoelectricas, actualmente operan en China 11 unidades con una capacidad neta total instalada de 8,438 MWe, que en 2009 generaron 70,100 GWhe con un factor de capacidad conjunto del 94.8% (OIEA, 2009b y OIEA, 2009c). Además, hay 23 reactores con 23,620 MWe de capacidad neta en construcción en los siguientes sitios:

- Tres unidades suministradas por la CNNC: dos de 610 MWe en Qinshan y 1 de 1,000 MWe en Changjiang.
- Diecinueve unidades suministradas por la *Dongfang Electric Corporation (DFEC)*: dos de 1,000 MWe en Lingao, dos de 1,000 MWe en Fangjiashan, dos de 1,000 MWe en Fuqing, cuatro de 1,000 MWe en Hongyanhe, tres de 1,000 MWe en Ningde, dos de 1,000 MWe en Sanmen, dos de 1,000 MWe en Yangjiang y dos de 1,700 MWe en Taishan.
- Una unidad suministrada por *Westinghouse* de 1,000 MWe en Haiyang.

También hay planeadas al menos otras siete unidades de 1,000 MWe para ampliar la capacidad instalada en diversos sitios y para abrir otros. Las centrales más recientes en construcción y las planeadas utilizarán preferentemente la tecnología avanzada francesa de los reactores del tipo PWR de la generación III+ y, a través de la CNNC, se buscará aumentar significativamente la participación nacional en el diseño, la fabricación de equipos y la administración de los proyectos, así como en todas las operaciones del ciclo de combustible. Entre los planes de expansión se incluye la construcción en Beijing de un reactor del tipo rápido de cría experimental (CFER) de 65 MWt a punto de entrar en operación en 2010 y, mediante un acuerdo con Rusia, se prevé iniciar en 2011 la construcción de un reactor rápido de la clase BN.800 de 880 MWe, en el sitio de Sanming .

Para alimentar con combustible a sus reactores, China ha dependido inicialmente del suministro extranjero de uranio enriquecido. Sin embargo, actualmente desarrolla una industria nacional en todas las etapas del ciclo de combustible para tratar de lograr la autosuficiencia energética de su ambicioso programa de expansión nucleoelectrico. No obstante, continuará importando uranio y servicios de conversión y enriquecimiento de UF₆, así como de fabricación de ensamblajes de sus suministradores extranjeros.

Las reservas identificadas de uranio de China son de 67,900 toneladas (OCDE, 2008b) y su producción anual de 760 toneladas sólo cubre la mitad de sus requerimientos actuales. El resto lo importa de Kazajstán , Namibia, Níger y Australia. La empresa *China Nuclear International Uranium Corporation* (SinoU) busca desarrollar fuentes de suministro adicionales en Uzbekistán, Mongolia, Argelia, Zimbabue y Sudáfrica, así como potencialmente en Canadá.

Como parte de un acuerdo con *Tekhsnabexport (Tenex)* de Rusia, desde 2001 China tiene en operación bajo las salvaguardias del OIEA plantas de enriquecimiento en Hanzhun, Shaanxi; con una capacidad anual de 1 millón de toneladas de trabajo separativo (t TS), que se expandirá a 1.5 millones t TS. Además, bajo el mismo acuerdo, *Tenex* suministrará 6 millones t TS en el período 2010-2021. Desde 1982 se fabrica en Yibin, Sichuán, combustible tipo PWR. Otra planta en Baotou, Mongolia Interior, fabrica combustible tipo CANDU y combustible para algunos reactores PWR. CNNC y *Areva* acordaron en 2007 estudiar la factibilidad de instalar una planta de reprocesamiento de combustible irradiado

con tecnología francesa, con una capacidad anual de 800 toneladas de metal pesado (t MP), así como una planta para fabricar combustible MOX.

China realizó el 16 de octubre de 1964 su primer ensayo de un artefacto nuclear con una explosión de 22 kilotones, con lo que se convirtió en la quinta potencia nuclear. Recién el 9 de marzo de 1992 accedió al TNP en calidad de Estado Parte poseedor de armas nucleares.

El 18 de julio de 1955, el gobierno de China celebró con el gobierno de Estados Unidos un acuerdo de cooperación para la promoción y el desarrollo de los usos pacíficos de la energía atómica y, posteriormente, en 1965 ambos gobiernos celebraron con el OIEA un acuerdo de transferencia de las salvaguardias (OIEA, 1965) relativas a dicho acuerdo bilateral. El acuerdo de salvaguardias con el OIEA se amplió en 1972 (OIEA, 1972b). Adicionalmente, en 1988 el gobierno de China y el OIEA celebraron un acuerdo de salvaguardias (OIEA, 1989b) que cubre algunas instalaciones y materiales diferentes de las que ya estaban comprendidas bajo los acuerdos anteriores. Finalmente, en 2004 el gobierno de China le comunicó al OIEA (OIEA, 2004a y OIEA, 2004b) el contenido y observaciones adicionales de un documento acerca de las políticas de no proliferación y las medidas adoptadas por China para fortalecer el régimen internacional de salvaguardias aplicado a sus exportaciones de tecnología, instalaciones y materiales nucleares a países signatarios del NPT no poseedores de armas nucleares.

La primera lección aprendida por China es que la robusta red de instituciones de investigación y desarrollo y empresas industriales que creó desde el inicio de su programa nucleoelectrico le permitió asimilar rápidamente la tecnología de los primeros reactores nucleares que fueron suministrados por Francia, Canadá y Rusia, para luego replicarlos en centrales de diseño propio que serán la base de su ambicioso plan de expansión.

La segunda lección es que a pesar de contar con insuficientes recursos de uranio ha desarrollado una extensa industria del ciclo de combustible propia que, en gran medida, le permite ser autosuficiente para abastecer de combustible a sus centrales. Para satisfacer sus carencias de uranio, China está incursionando con éxito en los mercados mundiales y ha desarrollado fuentes de abastecimiento confiables.

La tercera lección es que a pesar de ser potencia nuclear miembro del Consejo de Seguridad de la ONU ha recurrido voluntariamente a las salvaguardias del OIEA y se ha

ganado la confianza internacional de ser un país que apoya la no proliferación de las armas nucleares.

Las buenas prácticas que resultan de estas lecciones aprendidas son fortalecer las instituciones de investigación y desarrollo de la tecnología nuclear, apoyar a la industria local para hacer efectiva la transferencia de tecnología, incluyendo el ciclo de combustible, y adherirse al régimen internacional de salvaguardias del OIEA.

Principales recomendaciones

Entre las principales recomendaciones se mencionan:

Primera lección: control del tiempo de construcción y puesta en operación.

- ✓ Si se trata de la primera central nuclear que se construye en el país, lo recomendable sería contratar un proyecto llave en mano con un diseño probado y licenciado en el país de origen de la tecnología para evitar que la responsabilidad del costo de la central y la fecha de entrada en operación comercial recaiga en la empresa que emprende el proyecto. El precio alzado que ofrecerá el contratista del proyecto llave en mano se verá recompensado con la oportuna entrada en operación comercial de la central y el previsible inicio del flujo de ingresos por la venta de energía a la red eléctrica.
- ✓ Es muy recomendable diferir el inicio de la construcción hasta que la ingeniería de detalle esté totalmente terminada y se haya concluido el proceso de licenciamiento de las centrales en el país donde se van a construir. Con esta práctica se evitarían cambios en el diseño durante la construcción, que añaden horas-hombre de ingeniería y construcción y entorpecen el avance de las obras. De igual manera, generalmente surgen obstáculos e imprevistos durante el licenciamiento, ya sea por causas técnicas o por los impactos sociales y ambientales previsibles o fortuitos.
- ✓ Si se trata de reanudar un programa de construcción de centrales en países que ya tienen experiencia y se busca como objetivo estratégico incrementar la participación de la industria nacional en el suministro de materiales, equipos y componentes, la mejor práctica sería planificar con mucha anticipación y conjuntamente con los industriales las inversiones y la capacitación del personal que serían necesarias para

que las empresas eleven oportunamente la calidad de sus procesos y productos, a fin de que puedan contribuir con efectividad a los proyectos sin entorpecer su avance. Habría que fijar metas realistas de participación nacional, que pueden ser limitadas al principio pero que serían incrementadas paulatinamente con las siguientes centrales del programa.

Segunda lección: lograr elevados índices de disponibilidad y altos factores de capacidad durante la operación de las centrales nucleoelectricas a lo largo de su vida útil. De esta manera se logrará el objetivo de distribuir los costos fijos de la elevada inversión entre un mayor número de unidades de electricidad y disminuir el costo nivelado de generación de las centrales haciéndolas más competitivas. Las mejores prácticas derivadas de esa lección aprendida serían:

- ✓ Se requiere contar en el cuarto de control y en otras instalaciones del sitio con suficiente personal capacitado para observar las especificaciones técnicas de operación de las centrales en todas las circunstancias previsibles de la operación normal y en caso de transitorios y emergencias. El proceso de selección, entrenamiento y licenciamiento de los operadores debe fundamentarse en la cultura de seguridad, debe estar reglamentado por la autoridad reguladora y debe ser vigilado rigurosamente. Esta práctica contribuye a que las centrales no sólo sean operadas de forma segura sino también confiable.
- ✓ De igual manera, para lograr un elevado índice de confiabilidad es necesario contar con programas de mantenimiento preventivo y correctivo durante toda la vida de las centrales, que puedan actualizarse a medida que las instalaciones envejecen, así como adiestrar al personal que los va aplicar inculcándole desde el principio la cultura de seguridad, que debe ser parte integral de su capacitación.
- ✓ Para mantener las centrales en óptimas condiciones de operación y elevar su confiabilidad serán importantes los programas de rehabilitación de equipos y sistemas obsoletos a medida que surjan innovaciones tecnológicas. En particular, es recomendable adoptar los diseños más avanzados de combustible disponibles para las recargas periódicas o continuas de los reactores a lo largo de toda su vida útil, ya que paulatinamente evolucionan las características termohidráulicas y nucleares de los

diseños avanzados a fin de aumentar los márgenes de seguridad y disminuir las restricciones operativas.

Tercera lección: la seguridad en la operación de las centrales nucleoelectricas debe tener prioridad sobre la satisfacción de la demanda en los sistemas eléctricos, por lo que en caso de conflicto debe prevalecer la primera. Las mejores prácticas derivadas de esa lección aprendida serían:

- ✓ En todo el proceso de selección y entrenamiento se deberá adoctrinar con la cultura de la seguridad a todo el personal que participa en el diseño, la construcción, la puesta en servicio, la operación y el mantenimiento de las centrales, así como en el diseño de equipos y componentes; de manera que todas las tareas y acciones sean planeadas y ejecutadas conforme a procedimientos prescriptos según los programas de garantía de calidad aprobados por la autoridad reguladora.
- ✓ El órgano regulador deberá contar con autoridad y con suficiente personal técnico de alta capacitación para vigilar que la prioridad de la seguridad nuclear sea respetada por todas las organizaciones e instituciones que participan en el proceso diseño, construcción, puesta en servicio, operación y mantenimiento de las centrales, así como en el diseño de equipos y componentes. Dado el caso de que se ponga en riesgo la seguridad nuclear, el órgano regulador deberá suspender o cancelar la licencia, permiso o autorización de la entidad responsable, incluso suspendiendo la operación de las centrales cuando se comprometa seriamente la seguridad nuclear.

Cuarta lección: la generación nucleoelectrica es un asunto de incumbencia internacional extensamente regulado por una estructura jurídica que fija normas internacionales de seguridad nuclear y radiológica (OIEA, 2003), así como de seguridad física y de salvaguardias de las instalaciones y los materiales nucleares, para vigilar que se utilice de manera adecuada. Las mejores prácticas que se derivan de esta lección aprendida serían:

- ✓ Conocer en profundidad los tratados, las convenciones, las normas y las regulaciones internacionales para adherirse o adoptar en su caso las que respondan al interés de los países que desean iniciar un programa nucleoelectrico, a fin de lograr los mayores

niveles de seguridad nuclear y salvaguardias durante la ejecución de todas las fases de los proyectos nucleares.

- ✓ Apoyarse en los programas de asistencia que, desde su fundación, el OIEA brinda a los Estados miembros para la ejecución de proyectos nucleares, ya que se tendría acceso a los mejores expertos internacionales en las diversas fases de los proyectos.
- ✓ Buscar la intermediación del OIEA para el suministro multilateral de los equipos y materiales nucleares necesarios para la ejecución de los proyectos.

Quinta lección: uno de los mecanismos para lograr el éxito de los programas nucleares con fines pacíficos es el fomento y desarrollo oportuno de las capacidades locales. Las mejores prácticas que se derivan de esta lección aprendida serían:

- ✓ Crear y fortalecer el organismo regulador nacional.
- ✓ Crear y fortalecer las instituciones de investigación y desarrollo de la ciencia y tecnología nucleares.
- ✓ Impulsar en las instituciones educativas la formación de los recursos humanos necesarios para todas las actividades del programa nucleoelectrico.
- ✓ Fomentar la participación de la industria y de las empresas de ingeniería nacionales en las tareas de diseño, construcción, fabricación de equipos y componentes, puesta en servicio, así como en las de operación y mantenimiento de las centrales del programa nucleoelectrico.

Sexta lección: la nucleoelectricidad contribuye muy favorablemente a disminuir las emisiones totales de CO₂ a la atmósfera de los 30 países que operan las 438 unidades nucleares en operación y producen el 17.2% de su electricidad.

- ✓ La emisión total de CO₂ en el mundo es de 28,962 millones de toneladas anuales y la producción mundial de electricidad por medios nucleares genera 2,600,955 GWh anuales. Si esa electricidad se produjera con centrales que queman combustibles fósiles, se añadirían 1,898 millones de toneladas de CO₂ anuales a las emisiones globales, lo que representaría un incremento del 6.6%.

Resumen de la capacidad y generación nucleoelectrica mundial

Cuadro 3.1. Capacidad mundial instalada y generación nucleoelectrica en 2009

País	Capacidad nuclear instalada MW	Factor de planta %	Generación en 2009		
			Nuclear	Total	Porcentaje nuclear/total
			GWh		
Estados Unidos	100,683	90.3	796,751	4,044,421	19.7
Francia	63,130	70.5	390,000	511,811	76.2
Japón	46,823	64.1	263,071	1,056,510	24.9
Rusia	22,693	77.0	152,978	905,195	16.9
Alemania	20,490	71.2	127,719	451,304	28.3
República de Corea	17,705	91.0	141,123	396,413	35.6
Ucrania	13,107	67.8	77,800	164,135	47.4
Canadá	12,569	77.5	85,315	576,453	14.8
Reino Unido	10,137	70.8	62,860	469,104	13.4
Suecia	9,303	61.4	50,039	119,140	42.0
China	8,438	94.8	70,100	3,338,095	2.1
España	7,516	76.7	50,531	276,126	18.3
Bélgica	5,902	87.0	44,960	83,569	53.8
India	4,189	40.2	14,745	737,250	2.0
República Checa	3,678	79.7	25,665	78,969	32.5
Suiza	3,238	92.6	26,267	67,008	39.2
Finlandia	2,696	95.6	22,582	76,034	29.7
Bulgaria	1,906	91.4	15,256	46,371	32.9
Hungría	1,889	88.1	14,571	39,275	37.1
Brasil	1,884	78.6	12,975	418,548	3.1
Sudáfrica	1,800	73.4	11,574	218,377	5.3
Eslovaquia	1,762	84.7	13,076	23,184	56.4
México	1,365	84.5	10,108	252,700	4.0
Rumania	1,300	95.0	10,820	61,829	17.5
Argentina	935	92.7	7,589	122,403	6.2
Eslovenia	666	93.6	5,460	13,094	41.7
Holanda	487	93.7	3,999	105,237	3.8
Pakistán	425	70.8	2,637	138,789	1.9
Armenia	375	70.1	2,302	5,843	39.4
Irán	0		0		0.0
Subtotal	367,091	78.1	2,512,873	14,797,188	17.0
Taiwán*	4,980	91.5	39,917	203,657	19.6
Total	372,071	78.3	2,552,790	15,000,844	17.0

* La ONU no reconoce a Taiwán como país.

Fuente: OIEA, 2009.

En el cuadro 3.1 se desglosan las cifras de los 372,071 MWe de capacidad instalada en centrales nucleares que había en el mundo en diciembre de 2009, las cuales operaron en ese año con un factor de planta conjunto del 78.3%, generando un total de 2,552,790 GWhe de energía eléctrica que representó el 17% del total de la electricidad producida en los 31 países que contaban con capacidad nuclear (OIEA, 2009b y OIEA, 2009c).

Cabe señalar que Estados Unidos, Francia, Japón, Rusia, Alemania y República de Corea tienen la mayor capacidad nuclear instalada y, en conjunto, generaron en 2009 el 73.3% de la nucleoelectricidad mundial. La energía eléctrica generada por las centrales nucleares en esos seis países líderes representó el 25.4% de su producción total de electricidad.

El mejor desempeño de operación en 2009 lo tuvieron Finlandia, Rumania, China, Holanda, Eslovenia, Argentina, Suiza, Bulgaria, República de Corea y Estados Unidos, que superaron el factor de planta del 90%, muy por arriba del factor de planta conjunto del 78.3%. También amerita señalar que en 2009 Francia, Eslovaquia y Bélgica generaron más del 50% de su electricidad con medios nucleares y que Ucrania, Suecia y Eslovenia generaron más del 40%.

En el cuadro 3.2 se consigna que en diciembre de 2009 había 55,967 MWe de capacidad en centrales nucleares en construcción en 16 países, entre los que destacan China, Rusia y República de Corea, que en conjunto construyen el 66.1% del total.

También hay tentativamente en 13 países una capacidad estimada de 99,514 MWe programada o en diversas etapas de planeación y en estudio. De ese total, Estados Unidos, India, Japón y China concentran el 73.7%, pero, por ejemplo, en el caso de Estados Unidos la capacidad de 41,300 MWe es muy incierta y no está programada. Que los planes de las empresas privadas de Estados Unidos se lleguen a concretar depende de que la USNRC otorgue las licencias solicitadas y de que las empresas obtengan los financiamientos para la construcción.

Cuadro 3.2. Capacidad nuclear en construcción y planeación en 2009

País	Capacidad nuclear en 2009 que se encuentra		Programada o en planeación y en estudio** Principal justificación
	En construcción MW	MW	
China	23,620	7,000	diversificación de fuentes de energía
Rusia	7,131	4,255	diversificación de fuentes de energía
República de Corea	6,520	4,200	autosuficiencia en la generación
India	2,506	16,740	diversificación de fuentes de energía
Bulgaria	1,906		
Ucrania	1,900		
Francia	1,600	3,200	exportación a países de Europa
Finlandia	1,600	3,200	autosuficiencia en la generación
Brasil	1,405	4,000	diversificación de fuentes de energía
Japón	1,325	8,259	autosuficiencia en la generación
Estados Unidos	1,165	41,300	reducción de emisiones ambientales
Irán	915	2,160	diversificación de fuentes de energía
Eslovaquia	782		
Argentina	692	1,500	diversificación de fuentes de energía
Pakistán	300		
Canadá	0	2,000	reducción de emisiones ambientales
México	0	1,700	diversificación de fuentes de energía
Subtotal	53,367	99,514	
Taiwán*	2,600		
Total	55,967		

* La ONU no reconoce a Taiwán como país.
 ** Las capacidades tienen diferentes horizontes de planeación y, en algunos casos, son cifras muy tentativas.

Fuente: OIEA, 2009b.

4. Ventajas y desventajas de la generación nucleoelectrónica

La generación de energía eléctrica con centrales nucleares tiene una serie de características técnicas, económicas y ambientales que favorecen su empleo como una de las pocas alternativas para satisfacer la demanda de la carga base de los sistemas eléctricos interconectados de manera económica limpia, segura y confiable. También tiene algunas desventajas que no han favorecido su amplia difusión en el mundo.

Las principales ventajas son:

- El costo de la electricidad generada es competitivo frente a otras opciones tecnológicas para satisfacer la demanda de la carga base en los sistemas eléctricos interconectados.
- En los reactores nucleares el proceso físico de producción de energía es la fisión con neutrones del uranio y plutonio, en la cual no se producen gases de combustión y no se liberan a la atmósfera CO₂ y otros gases de efecto invernadero.
- El uranio es un elemento abundante en la naturaleza y su costo y el de las etapas del ciclo de combustible nuclear son bajos y estables.
- Los poderes caloríficos del uranio y del plutonio son muy elevados, por lo que se necesitan masas muy pequeñas para producir una gran cantidad de energía.
- El volumen de los residuos y productos de la fisión también son muy pequeños y el manejo del combustible irradiado se realiza con severas medidas de seguridad física, nuclear y radiológica, conforme a un régimen internacional de seguridad nuclear y salvaguardias.
- Los programas de garantía de calidad de la industria nucleoelectrónica permiten que las centrales alcancen una alta disponibilidad durante su operación comercial, que da lugar a factores de capacidad elevados durante toda su vida.

Las principales desventajas son:

- El costo unitario de inversión es elevado y el período de construcción es largo, lo que da lugar a acumular significativos intereses durante la etapa preoperativa de las centrales.
- El proceso de fisión del uranio y el plutonio en los reactores da lugar a la formación de radioisótopos, en algunos casos de vidas medias largas.

- El manejo del combustible irradiado está sujeto a salvaguardias internacionales para evitar que el uranio y el plutonio residuales se desvíen hacia usos no pacíficos.
- En la mayoría de los diseños de reactores se requiere que se detenga la operación para realizar el recambio de combustible y para mantenimiento, lo que reduce el factor de disponibilidad.

A continuación se discuten en detalle los aspectos positivos y negativos de la economía, la limpieza, la seguridad y la confiabilidad de la energía nucleoelectrica.

Economía

Debido a su diseño y construcción las centrales nucleoelectricas son instalaciones muy robustas y dotadas de sistemas redundantes para garantizar una operación limpia, segura y confiable. Esto implica costos de inversión por unidad de capacidad instalada muy elevados si se comparan con los costos de las unidades de ciclo combinado que usan gas natural.

Por esa razón, para la construcción de centrales nucleoelectricas las economías de escala son muy importantes. Actualmente, se construyen y operan unidades de hasta 1,650 MWe de potencia bruta instalada. Los costos unitarios con esta tecnología pueden variar entre US\$3,000 y US\$5,800 por kilowatt (US\$/KW) bruto instalado (AIE y AEN, 2010 y MIT, 2009). Para unidades de 1,350 MWe, se requiere una inversión inicial de entre US\$4.05 y US\$7.83 mil millones, que típicamente se erogan durante un período de cinco a siete años. Tales costos unitarios dependen, entre otros factores, del tipo de reactor, número de unidades a construir en cada sitio, ubicación geográfica, estudios, selección del sitio, licenciamiento, construcción, puesta en servicio y pruebas de garantía hasta llegar a la operación comercial.

Para contrastar el costo de la electricidad producida con las tecnologías y energéticos disponibles en cada país, en los cuadros 4.1, 4.2 y 4.3 con información compilada del documento de la AIE (AIE y AEN, 2010) se listan los costos de inversión y de generación en Estados Unidos, México y Brasil, que poseen centrales diseñadas con tecnología para operar en la carga base, así como otras de generación complementaria que incluyen algunas

intermitentes que usan energéticos renovables, calculados con la elevada tasa real de descuento del 10% anual típica de los países en desarrollo.

Cuadro 4.1. Costos de inversión y de generación de centrales eléctricas diseñadas para operar en Estados Unidos en la carga base y otras							
Tipo de central	Capacidad MWe	Inversión unitaria* US\$₂₀₀₈/MWe	Factor de planta %	Costo unitario nivelado de generación			
				Inversión	Operación y mantenimiento	Combustible	Total
				US\$₂₀₀₈/MWh**			
Tecnologías de generación base							
Geotérmica	50	1,752	87.0	26.17	20.58		46.75
Nucleoeléctrica	1,350	4,296	85.0	55.20	12.87	9.33	77.40
Ciclo combinado	400	1,113	85.0	15.14	3.61	64.01	82.76
Carboeléctrica	600	2,526	85.0	33.09	8.76	46.00	87.85
Tecnologías de generación complementaria							
Eoloeléctrica en tierra	150	1,973	41.0	61.84	8.63		70.47
Solar térmica	100	5,141	24.0	296.13	27.59		323.72
* Incluye intereses durante la construcción a la tasa real del 10% anual.							
** Con la tasa real de descuento del 10% anual.							
<i>Fuente: AIE y AEN, 2010.</i>							

En el cuadro 4.1 se aprecia que en Estados Unidos, a pesar de su elevado costo de inversión unitario, la electricidad para la carga base generada por la nucleoeléctrica es muy competitiva frente a la generada por las centrales de ciclo combinado y las carboeléctricas. La generación eoloeléctrica es más económica que la nuclear, pero por ser intermitente no aporta capacidad firme para la carga base y sólo aporta generación complementaria.

En el caso de México, la AIE no reporta el costo de la electricidad a ser generada en una nueva nucleoeléctrica, ni tampoco por la geotérmica, la hidroeléctrica y la eoloeléctrica de clase 7, pero en el cuadro 4.2 se incluyen los resultados de las estimaciones realizadas conforme a la metodología del documento COPAR de la CFE. En el caso de la nuclear, resulta ser US\$91.52 por megawatt-hora (US\$/MWh) para la electricidad que sería generada por una nueva nucleoeléctrica, que es competitivo y se desglosa en 76.55 US\$/MWh por concepto de la inversión, 12.87 US\$/MWh por la operación y mantenimiento y 7.08 US\$/MWh por el combustible. El costo de la generación por concepto de la inversión inicial

es del 83.6% del total, por lo que el costo total de la electricidad es muy sensible a variaciones en la inversión unitaria, pero también lo es al factor de planta.

Cuadro 4.2. Costos de inversión y de generación de centrales eléctricas diseñadas para operar en México en la carga base y otras							
Tipo de central	Capacidad MWe	Inversión unitaria* US\$ ₂₀₀₈ /MWe	Factor de planta %	Costo unitario nivelado de generación			
				Inversión	Operación y mantenimiento	Combustible	Total
				US\$ ₂₀₀₈ /MWh**			
Tecnologías de generación base							
Geotérmica***	100	2,067	85.0	33.26	41.23	7.32	81.81
Nucleoeléctrica***	1,350	5,345	85.0	76.55	7.90	7.08	91.52
Ciclo combinado	446	1,240	85.0	16.87	4.74	70.24	91.85
Carboeléctrica	1,312	2,722	85.0	35.66	6.51	50.11	92.28
Combustóleo	83	2,295	85.0	31.22	20.66	67.16	119.04
Tecnologías de generación complementaria							
Eoloeléctrica							
clase 7***	100	2,360	43.0	73.77	8.42		82.19
Hidroeléctrica***	320	3,112	25.0	151.74	0.72	2.94	155.40
* Incluye intereses durante la construcción a la tasa real del 10% anual.							
** Con la tasa real de descuento del 10% anual.							
*** Elaboración propia con datos de la CFE.							
<i>Fuente: AIE y AEN, 2010.</i>							

El costo del combustible de la geotérmica se refiere al costo imputado al vapor geotérmico y el costo del combustible de la hidroeléctrica es el derecho por el agua turbinada en las centrales que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) le cobra a la CFE.

Como se desprende del cuadro 4.3, el costo de la electricidad que va a generar la nueva nucleoeléctrica que se está construyendo en Brasil sería aproximadamente el mismo que el de la generación en una central muy pequeña de 10 MWe que usa residuos forestales como combustible, pero será más alto que el de la de un ciclo combinado y el de una carboeléctrica. Además, será considerablemente muy caro comparado con el de la generada en una hidroeléctrica que opera con un factor de planta del 55%, que es alto para este tipo de central.

Cuadro 4.3. Costos de inversión y de generación de centrales eléctricas diseñadas para operar en Brasil en la carga base y otras

Tipo de central	Capacidad MWe	Inversión unitaria* US\$ ₂₀₀₈ /MWe	Factor de planta %	Costo unitario nivelado de generación			
				Inversión	Operación y mantenimiento	Combustible	Total
				US\$ ₂₀₀₈ /MWh**			
Tecnologías de generación base							
Carboeléctrica	446	1,504	85.0	19.70	43.93	15.39	79.02
Ciclo combinado	210	1,880	85.0	31.66	5.40	57.79	94.85
Biomasa	10	3,456	85.0	51.98	31.49	19.13	102.60
Nucleoeléctrica	1,405	5,813	85.0	78.11	15.54	11.64	105.29
Tecnologías de generación complementaria							
Hidroeléctrica	800	1,595	55.0	31.88	2.42		34.30
* Incluye intereses durante la construcción a la tasa real del 10% anual.							
** Con la tasa real de descuento del 10% anual.							
<i>Fuente: AIE y AEN, 2010.</i>							

Debido al gran tamaño de las unidades, al tipo de combustible que utilizan y a sus características operativas, las centrales nucleares generalmente se operan durante su vida útil con elevados factores de planta,⁶ alrededor del 80% (OIEA, 2009c). La vida útil se diseña inicialmente para que sea de 40 años. Sin embargo, con la implementación de rigurosos programas de mantenimiento y rehabilitación se puede extender su operación a 60 años, a fin de capitalizar la gran inversión realizada.

No obstante la desventaja del elevado costo fijo de inversión y de operación y mantenimiento de las nucleoeléctricas, debido al bajo costo variable tienen la gran ventaja comparativa de que durante su operación se despachan prioritariamente en la carga base de los sistemas eléctricos interconectados.

Esa ventaja comparativa de las centrales nucleoeléctricas surge del enorme poder calorífico del uranio que se usa en los reactores nucleares, que aproximadamente entre 80 mil a 200 mil veces más grande que el típico poder calorífico por unidad de masa de los combustibles fósiles que se consumen en las centrales eléctricas (Murray, 2001; CFE, 2008; y Graves, 1979). Además, el costo variable por concepto del combustible de los ciclos

⁶ Capacidad utilizada en promedio y se expresa como un porcentaje de la capacidad instalada.

combinados es grande y depende del volátil precio del gas natural, de manera que para fines del despacho de carga tienen una desventaja comparativa respecto de las centrales nucleares.

Limpieza

Las fisiones del uranio y el plutonio en los reactores nucleares producen una gran cantidad de energía y también dan lugar a la formación de radioisótopos, algunos de los cuales tienen una vida media larga y son particularmente radiotóxicos (Murray, 2001). La generación de gases de efecto de invernadero con esta tecnología es reducida comparada con otras fuentes convencionales como el combustóleo, gas natural, carbón y diesel, entre otros combustibles fósiles usados en las centrales eléctricas.

En el cuadro 4.4 se presentan las cifras comparativas de las emisiones estimadas de CO₂ a la atmósfera en centrales eléctricas de todo el mundo que queman distintos tipos de combustibles fósiles, que representan 10,140 millones de toneladas anuales (AIE, 2010b). El promedio pesado de las emisiones unitarias en este tipo de centrales es de aproximadamente 730 toneladas de CO₂ por gigawatt-hora (t CO₂/GWhe) (AIE, 2010), pero, al incluir la generación mundial de las nucleares y las hidroeléctricas que no emiten CO₂ a la atmósfera en el proceso mismo de producción de electricidad en las centrales, el promedio pesado se reduce a alrededor de 513 t CO₂/GWhe, que es una significativa reducción del 29.7%.

En una vida útil de 40 años, un reactor típico produce 400,000 GWhe de electricidad y evita la emisión a la atmósfera de 292 millones de toneladas de CO₂ en centrales que queman combustibles fósiles. En cambio, solo genera 1,083 toneladas de combustible irradiado, cuyo volumen aproximado es de 106 m³ (Murray, 2001 y Graves, 1979), el cual se almacena temporalmente de forma económica, limpia, segura y confiable en el propio edificio del reactor.

Otra gran ventaja comparativa respecto de los combustibles fósiles es que, al final de su irradiación, el combustible nuclear descargado de los reactores contiene una cantidad apreciable de uranio y plutonio residuales, que se pueden recuperar y son muy útiles para reciclarlos en futuras recargas de combustible y generar más electricidad.

Cuadro 4.4. Estimación de las emisiones de CO₂ a la atmósfera en la generación mundial de electricidad en 2007

Energético Primario	Emisiones Mt CO₂	Generación		Emisiones unitarias t CO₂/GWhe	
		GWhe	%		
Carbón	7,504	8,228,000	41.6	912	carbón
Petróleo	833	1,114,000	5.6	748	petróleo
Gas natural	1,564	4,127,000	20.9	379	gas natural
Otros*	239	421,000	2.1	567	diesel y otros
Fósiles	10,140	13,890,000	70.3	730	Media fósiles
Nuclear	0	2,719,000	13.8	0	uranio
Agua	0	3,162,000	16.0	0	agua
Total	10,140	19,771,000	100.0	513	Media

* Principalmente diesel, geotermia, biomasa y algunos renovables.

Fuente: AIE, 2010.

El combustible irradiado se almacena durante la vida útil de la central en albercas ubicadas en el piso de recarga dentro del edificio del reactor. El agua de la alberca sirve como blindaje de la radiación que emiten los productos de fisión radiactivos, así como para enfriar los ensambles.

Después, al término de la vida útil de la central los ensambles irradiados se pueden almacenar temporalmente en estructuras blindadas ex profeso fuera del edificio del reactor, donde se continúan enfriando con circulación natural de aire. Posteriormente se depositan definitivamente a gran profundidad en formaciones geológicas estables, fuera de todo contacto con la biosfera. Esta es la vía que han elegido países como Estados Unidos, Canadá, Suecia y España, entre otros.

Alternativamente, los ensambles de combustible irradiado se pueden reprocesar en plantas radioquímicas para extraer los valiosos uranio y plutonio residuales y separar los productos de fisión radiactivos, que son los verdaderos desechos radiactivos y que constituyen sólo el 3% de la masa original del combustible cargado al reactor.

El uranio y el plutonio residuales se usan para fabricar nuevo combustible en forma de óxidos mixtos (MOX) para los reactores actuales de la generación II y III, así como para uso futuro en los reactores de la generación IV (The Generation IV International Forum,

2002). El pequeño volumen de desechos radiactivos se inmoviliza en una matriz de vidrio de borosilicato que es muy estable para almacenarlo temporalmente en las propias plantas radioquímicas y, posteriormente, depositarlo en las formaciones geológicas. Esta es la vía que han seleccionado países como Francia, Rusia, Reino Unido, Japón y China, entre otros.

Los desechos radiactivos que se generan durante la vida del reactor son 32 toneladas de productos de fisión contenidos en el combustible irradiado. Estos desechos se separan en las plantas radioquímicas de reprocesamiento y, una vez inmovilizados en vidrio, tienen un volumen de aproximadamente 116 m³. Posteriormente, se almacenan transitoriamente en las plantas radioquímicas y, luego, de forma definitiva en los depósitos geológicos.

El costo unitario del ciclo de combustible calculado en la sección 4.1 es de 7.08 US\$₂₀₀₈/MWh. Este costo incluye un cargo de 1.50 US\$₂₀₀₈/MWh para cubrir las erogaciones futuras por el manejo y almacenamiento del combustible irradiado. Durante toda la vida útil del reactor se acumula un fondo de US\$600 millones para este propósito.

Seguridad

Desde que a mediados de la década de 1950 se inició la utilización pacífica de la energía nuclear para producir electricidad, se cobró conciencia de la importancia que tendría adoptar medidas de seguridad para evitar los potenciales daños que se pudieran causar a la población y al medioambiente por la liberación accidental de material radiactivo en las zonas aledañas a las instalaciones del ciclo de combustible nuclear y a las centrales nucleares.

Se reconoció desde un principio que la responsabilidad de la seguridad de las instalaciones nucleares es de los gobiernos donde estas se ubican. Por eso, para regular el diseño, la construcción, la operación y el desmantelamiento de tales instalaciones las autoridades nacionales pioneras en el uso civil de la energía nuclear crearon órganos reguladores encargados de expedir reglamentos y normas para el uso seguro de la energía nuclear en sus respectivos territorios y vigilar su estricto cumplimiento.

En México, el órgano regulador es la CNSNS, que decidió aplicar a la central Laguna Verde las regulaciones del país de origen de la tecnología del reactor BWR que suministró *General Electric* a la CFE. Tales regulaciones son el *Code of Federal Regulations, Part 50* (CFR50), que aplica la USNRC a los reactores norteamericanos.

Poco después del inicio de la utilización de la energía nuclear para generar electricidad en la ex Unión Soviética, Reino Unido y Estados Unidos, en el ámbito de las Naciones Unidas se decidió la creación del OIEA (OIEA, 1990) en 1957. La triple finalidad del organismo, entre otras cuestiones, consiste en:

- Proveer por sí mismo o actuar como intermediario para que un Estado miembro del OIEA preste servicios o suministre los materiales, equipos e instalaciones a otro Estado miembro necesarios para la investigación, el desarrollo y la aplicación práctica de la energía atómica con fines pacíficos, inclusive la producción de energía eléctrica.
- Establecer y aplicar salvaguardias destinadas a asegurar que los materiales fisiónables especiales y otros, así como los servicios, equipos, instalaciones e información suministrados por el OIEA, o a petición suya, no sean utilizados de modo que contribuyan a fines militares.
- Establecer o adoptar en consulta y en colaboración con los órganos competentes de la ONU y organismos especializados interesados, normas de seguridad para proteger la salud y reducir al mínimo el peligro para la vida y la propiedad, y proveer la aplicación de estas normas a sus propias operaciones y aquellas en las que se utilicen los materiales, servicios, equipos e instalaciones e información suministrados por el OIEA, o a petición suya, o bajo su control o dirección.

Desde su fundación, el OIEA ha tenido la vocación de promover entre los Estados miembros la cultura de seguridad en todas las operaciones nucleares con fines pacíficos, de manera que paulatinamente ha elaborado un extenso conjunto de normas de seguridad del OIEA (OIEA, 2007), las cuales, con un amplio consenso de diversas organizaciones multilaterales, han adquirido el estatus de normas internacionales que, a pesar de no ser obligatorias más que en los casos estipulados en el Estatuto del OIEA, sirven de base a aquellos Estados miembros que así lo quieran para fundamentar sus propias normas nacionales.

Adicionalmente, en materia de tratados y convenciones internacionales relacionadas con el uso pacífico de la energía nuclear o con la seguridad nuclear, se puede mencionar, entre otros instrumentos:

- Desde abril de 1969 entró en vigor el Tratado de Tlatelolco (OPANAL, 1967).
- En el ámbito de las Naciones Unidas, en marzo de 1979 entró en vigor el TNP (OIEA, 1970).
- En noviembre de 1977 entró en vigor la Convención de Viena sobre la Responsabilidad Civil por Daños Nucleares.
- En octubre de 1986 entró en vigor la Convención sobre la Notificación Temprana de un Accidente Nuclear.
- En febrero de 1987 entró en vigor la Convención sobre la Asistencia en Caso de un Accidente Nuclear o una Emergencia Radiológica.
- En febrero de 1987 entró en vigor la Convención sobre la Protección Física de Material Nuclear.
- En octubre de 1996 entró en vigor la Convención de Seguridad Nuclear (OIEA, 1994e).
- En junio de 2001 entró en vigor la Convención Conjunta sobre Seguridad en la Gestión del Combustible Gastado y sobre Seguridad en la Gestión de Desechos Radiactivos (OIEA, 1998).

El 12 y el 13 de abril se celebró en Washington, D. C., la reunión denominada *2010 Nuclear Security Summit*, a la que el Presidente de Estados Unidos convocó a líderes de 46 países, los cuales estuvieron representados por 38 Jefes de Estado o de gobierno, así como a delegaciones de las Naciones Unidas, la Unión Europea y el OIEA. El objetivo de la reunión fue convenir acciones voluntarias para fortalecer el régimen internacional de seguridad física y de salvaguardias de los materiales nucleares con el fin de evitar que sean usados para fines terroristas y actos criminales, así como contener la proliferación de las armas nucleares.

No se adoptaron compromisos vinculatorios fuera de los que ya existen en el régimen jurídico internacional en materia nuclear, en los que el OIEA desempeña un papel fundamental. Entre otros acuerdos a nivel regional, Canadá, México y Estados Unidos convinieron convertir, bajo la supervisión del OIEA, el reactor TRIGA Mark III del ININ para utilizar solamente uranio enriquecido a un máximo del 20% en el isótopo ${}_{92}\text{U}^{235}$ (Uranio 235), que no es útil para fabricar armas nucleares. Acciones similares se están realizando en

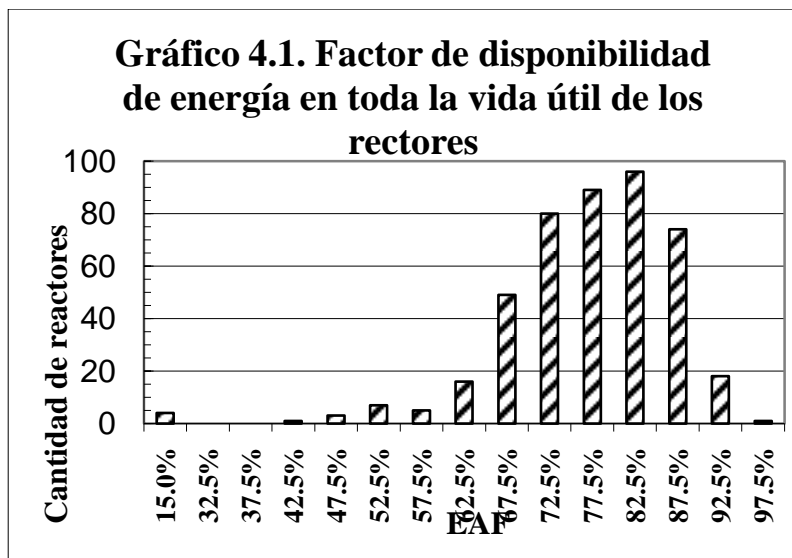
todo el mundo en otros 160 reactores de investigación y para la producción de radioisótopos, entre ellos, seis en Canadá y 32 en Estados Unidos.

Como lo demuestran todas esas acciones, hay un consenso mundial que sostiene que la seguridad nuclear es un asunto de responsabilidad nacional pero de incumbencia internacional, por lo que se ha creado una extensa estructura jurídica (OIEA, 2003) para regular el uso seguro de la energía nuclear para fines pacíficos en el mundo y, en ese contexto, los programas de asistencia técnica del OIEA son un vehículo muy útil para que los Estados miembros fortalezcan sus órganos reguladores y los procedimientos de las instituciones y empresas que diseñan, construyen y operan centrales nucleares e instalaciones del ciclo de combustible. Esta estricta regulación internacional de la industria nuclear es una ventaja muy grande de la que no gozan otras industrias energéticas globales.

Confiabilidad

Desde mediados de la década de 1950, época en la que entraron en operación las primeras centrales nucleoelectricas, se han acumulado 13,495 años-reactor de experiencia (OIEA, 2009b y OIEA, 2009c) y, desde entonces, las centrales han demostrado crecientemente una gran confiabilidad para operar con elevados factores de planta, generalmente para satisfacer la demanda de base de los sistemas eléctricos interconectados.

En las estadísticas que el OIEA publica anualmente sobre el desempeño de los reactores nucleoelectricos en operación en sus Estados miembros (OIEA, 2009c), se define el factor de disponibilidad de energía (EAF) en un período de tiempo determinado como el cociente de la energía que la capacidad disponible podría haber producido en ese período, dividida entre la energía que se podría haber producido con la capacidad nominal de la central operando continuamente durante todo el período.



Fuente: OIEA, 2009b.

En el gráfico 4.1 se muestra la distribución de los factores EAF que durante toda su operación comercial han acumulado los 443 reactores de los que tiene registro el OIEA (OIEA, 2009b) y se observa que la mayoría se agrupa en el intervalo que va entre el 65% y el 90%.

En cuanto a la disponibilidad del combustible nuclear, las reservas mundiales de uranio (OCDE, 2008b) razonablemente seguras recuperables a un precio inferior a US\$130 por kilogramo de Uranio (US\$/kg U) son de 3.34 millones de toneladas, y las reservas inferidas recuperables por debajo del mismo precio tope son de 2,13 millones de toneladas, de manera que al ritmo actual de consumo mundial estimado en 65 mil toneladas por año hay reservas por un total de 5.47 millones de toneladas suficientes para 84 años. Las mayores reservas de uranio se encuentran distribuidas equitativamente en alrededor de 13 países en los cinco continentes.

La capacidad instalada de producción de uranio en 2010 se estima en 80,685 t U/año que se distribuye en: 22% en Canadá, 12.6% en Australia, 4.5% en otros países de la OCDE y 60.9% en diversos países del mundo fuera de la OCDE. En 2008 la demanda de uranio en los países de la OCDE fue de 46,454 t U/año, que se desglosan en: 39.8% en América del Norte, 38.9% en Europa y 21.3% en el Pacífico.

En 2008 la capacidad de los servicios de enriquecimiento de UF₆ en los países de la OCDE era de 30,950 t TS/año (toneladas de trabajo separativo) distribuida en: 34.9% en

Francia, 25.8% en Estados Unidos, 16.2% en Reino Unido, 12.3% en Holanda, 7.1% en Alemania y 3.7% en Japón. En ese mismo año, la demanda de trabajo separativo de los países de la OCDE fue de 30,381 t TS/año, distribuida en: 31.9% en México y Estados Unidos, 42.2% en Europa y 25.9% en Japón y República de Corea.

Las cifras anteriores respaldan la convicción de que las centrales nucleoelectricas son confiables para operarlas en la carga base de los sistemas eléctricos interconectados debido a sus índices de disponibilidad y a la capacidad mundial que existe para el oportuno suministro de los materiales y servicios esenciales del ciclo de combustible.

5. Oportunidades y retos de un programa nucleoelectrico

La ejecución de un programa nacional de planeación, construcción, puesta en servicio, operación y desmantelamiento de centrales nucleoelectricas es una iniciativa nacional que tiene implicaciones de muy largo plazo para los gobiernos que formulan los planes, las instituciones de investigación y desarrollo, las entidades financieras que suministran los fondos, las industrias que fabrican los equipos y componentes, las firmas de ingeniería y construcción que diseñan, construyen y ponen en servicio las centrales, las empresas eléctricas que las operan y les dan mantenimiento, así como para las empresas del ciclo de combustible que suministran el energético y manejan el combustible irradiado y, finalmente, las empresas que desmantelan las centrales al final de su vida útil y almacenan los desechos radiactivos de alto, mediano y bajo nivel.

A continuación se discuten algunos de los retos y las oportunidades que se les presentan a los distintos actores que participan en la ejecución de un programa nucleoelectrico en varias esferas.

Impacto socioeconómico

Al inicio del programa el reto más grande es financiar y aplicar oportunamente la elevada inversión que se requiere para diseñar, construir, fabricar y montar los equipos y componentes, hasta llegar a poner en servicio e iniciar la operación comercial de las centrales. Este proceso puede durar al menos cinco años y puede ser mayor si se trata de la primera central que se construye en un país que no tiene experiencia previa.

Para ejemplificar la magnitud de los montos de las erogaciones típicas durante la vida útil de un proyecto nucleoelectrico, en el cuadro 5.1 se listan las estimaciones de costos de inversión inicial (Fernández de la Garza, 2009) y las estimaciones de los costos necesarios para la operación, el mantenimiento y el suministro de uranio enriquecido durante 40 años a una central de 1,350 MWe de capacidad, como la que se presentó en el cuadro 4.2 de la sección anterior.

Cuadro 5.1. Estimación del valor presente* de los costos de una central nucleoelectrica de 1,350 MWe

	Valor presente	Costo	
		Anualizado	Nivelado
		MUS\$ ₂₀₀₈ /año	US\$ ₂₀₀₈ /MWh
Porcentaje del costo de inversión	MUS\$₂₀₀₈		
31.7 obra civil	2,733.8	279.6	29.0
21.1 equipos y componentes	1,822.5	186.4	19.3
4.9 montaje y puesta en servicio	425.3	43.5	4.5
6.3 ingeniería de diseño	546.8	55.9	5.8
6.3 administración del proyecto	546.8	55.9	5.8
13.2 intereses durante la construcción	1,140.9	116.7	12.1
83.6 Subtotal	7,215.9	737.9	76.6
Porcentaje del costo de operación y mantenimiento			
3.0 Operación	260.5	26.6	2.8
5.6 Mantenimiento	483.9	49.5	5.1
8.6 Subtotal	744.4	76.1	7.9
Porcentaje del costo del ciclo de combustible			0.0
2.9 uranio natural	250.3	25.6	2.7
2.5 enriquecimiento de UF ₆	214.8	22.0	2.3
0.7 fabricación de ensamblés	61.1	6.3	0.7
1.6 manejo del combustible irradiado	141.4	14.5	1.5
7.7 Subtotal	667.6	68.3	7.1
100.0 Total	8,627.9	882.3	91.5

* Calculadas con una tasa real de descuento del 10% anual, durante una vida útil de 40 años.
Fuente: Elaboración propia con datos de la CFE.

En la primera columna se tabula el valor presente en millones de dólares de 2008 (MUS\$₂₀₀₈) del flujo de efectivo de las erogaciones por cada rubro, a fin de poder comparar significativamente las diferentes erogaciones que se realizan en diferentes momentos de la vida de la central (Young, 1993). En el caso de la inversión inicial, se valúa al inicio de la operación comercial pero, en el caso de los costos de combustible y de operación y

mantenimiento, se valúan las sumas del valor presente en MUS\$₂₀₀₈ de las erogaciones anuales a realizarse durante los 40 años de vida útil de la central.

Además, los costos por cada rubro se listan en la segunda columna de forma anualizada como MUS\$₂₀₀₈/año y también en la tercera columna como costos unitarios nivelados de la energía eléctrica generada durante toda la vida útil de la central cuando opera con un factor de capacidad del 85%, expresados en US\$₂₀₀₈/MWh.

El valor presente de todas las erogaciones del proyecto es MUS\$₂₀₀₈ 8,628, del cual la inversión inicial representa el 83.6%, que típicamente se eroga durante los cinco años previos a la operación comercial de la central. Obsérvese que los intereses acumulados durante la construcción son el 13.2% del gran total, la obra civil representa el 31.7% y la fabricación de equipos y componentes, otro 21.1%.

Estos últimos dos rubros le presentan al país que ejecuta el proyecto la oportunidad de erogarlos localmente, ya que usualmente casi la totalidad de la obra civil puede realizarse con mano de obra y materiales de origen nacional y la derrama económica en la región tiene un gran impacto socioeconómico. Algunos de los equipos y componentes también pueden fabricarse en el país que ejecuta el proyecto, dependiendo de la capacidad de la industria nacional para suministrarlos con los requisitos de garantía de calidad que se exigen para los proyectos nucleoelectrónicos.

El montaje y la puesta en servicio, la ingeniería y la administración del proyecto también ofrecen la oportunidad de realizarse localmente si las empresas y firmas nacionales se capacitan previamente para cumplir con los requisitos de calidad exigidos por la autoridad reguladora.

La magnitud de los montos de tales erogaciones justifica ampliamente que en los planes nacionales se incluyan programas para calificar a la industria, la empresas de construcción y las firmas de ingeniería para participar en la ejecución de los proyectos nucleoelectrónicos, lo que también fortalece la capacidad nacional de realizar grandes proyectos de infraestructura con un importante impacto socioeconómico (Fernández de la Garza, 2009).

El valor presente de las erogaciones por concepto de operación y mantenimiento durante los 40 años de vida útil de la central es MUS\$₂₀₀₈ 744.4, de los cuales la operación representa el 3.0% del gran total, y el mantenimiento, el 5.6%. La mayoría de las tareas de

operación las realizan técnicos e ingenieros nacionales que requieren una capacitación previa y, en algunos casos, un licenciamiento conforme a programas aprobados por la autoridad reguladora. En el caso del mantenimiento, la mano de obra es generalmente de origen nacional y las refacciones ofrecen la oportunidad de ser fabricadas localmente si la industria del país se califica previamente.

El valor presente de las erogaciones por concepto del ciclo del combustible que alimenta la central durante los 40 años de operación comercial es MUS\$₂₀₀₈ 667.6, de los cuales el uranio representa el 2.9% del gran total; los servicios de enriquecimiento, el 2.5%; la fabricación de ensambles, el 0.7%; y el manejo del combustible irradiado, el 1.6%. Si el país que ejecuta el proyecto tiene identificados recursos propios de uranio tendría la oportunidad de suministrarlo localmente, ya que la minería no presenta grandes retos técnicos, salvo las medidas de protección radiológica necesarias (OCDE, 2008b).

El enriquecimiento es una operación industrial tecnológicamente muy avanzada cuyo desarrollo representa un importante reto (Benedict, 1981). Además, las instalaciones civiles están sujetas a salvaguardias internacionales del OIEA. Usualmente, los países que se inician en un programa nucleoelectrico y que producen localmente sus concentrados de uranio optan por enviarlos a las instalaciones del extranjero para que lo conviertan a UF₆ y lo enriquezcan en el isótopo ${}_{92}\text{U}^{235}$ (OCDE, 2009).

La fabricación de ensambles puede realizarse sin dificultad en la industria nacional, generalmente bajo licencia de las empresas que diseñaron el sistema nuclear de suministro de vapor, por lo que también presentan una atractiva oportunidad al país para iniciar el desarrollo de su propia industria del ciclo de combustible nuclear (OCDE, 2009 y Vélez Ocón, 1997).

Impacto ambiental

La ejecución de un programa de centrales nucleoelectricas le plantea retos importantes al país que lo emprende, pero a la vez le brinda la oportunidad de contribuir al esfuerzo mundial para reducir la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. En 2007 se emitieron a la atmósfera 28,962 millones de toneladas de CO₂ (Mt CO₂), de las cuales la

quema de combustible fósiles en la generación de energía eléctrica contribuyó con el 35% (OIEA, 2010b).

Como se lista en el cuadro 5.2, se estima que en 2007 las emisiones del sector eléctrico fueron 10,140 Mt CO₂ y que se generaron 19,771,000 GWh, con una media ponderada de la emisión unitaria de las fuentes fósiles de 730 t CO₂/GWh (OIEA, 2010b). La quema de carbón en las centrales eléctricas contribuyó con el 74.0% de las emisiones del sector, el petróleo contribuyó con el 8.2%, y el gas natural, con el 15.4%.

Las centrales nucleoelectricas e hidroelectricas generaron el 13.8% y el 16.0% de la electricidad respectivamente, con emisiones reducidas de CO₂ a la atmósfera en el proceso de conversión de la energía a electricidad. En 2007 los 2,719,000 GWh producidos con energía nuclear evitaron la quema de combustibles fósiles que, a razón de 730 t CO₂/GWh, habrían emitido aproximadamente 1,985 Mt CO₂. En ese mismo año, a un precio estimado de 15 €/t CO₂ en los mercados europeos de bonos de carbono, estas emisiones evitadas equivalen a un beneficio ambiental y de la economía mundial valuado en € 29,773 millones (M€), aproximadamente.

Cuadro 5.2. Estimación de los factores de emisión unitaria de CO₂ a la atmósfera en la generación mundial de electricidad en 2007					
Energético primario	Emisiones Mt CO₂	Generación		Emisiones unitarias t CO₂/GWh	
		GWhe	%		
Carbón	7,504	8,228,000	41.6	912	carbón
Petróleo	833	1,114,000	5.6	748	petróleo
Gas natural	1,564	4,127,000	20.9	379	gas natural
Otros*	239	421,000	2.1	567	diesel y otros
Fósiles	10,140	13,890,000	70.3	730	Media fósiles
Nuclear	0	2,719,000	13.8	0	uranio
Agua	0	3,162,000	16.0	0	agua
Total	10,140	19,771,000	100.0	513	Media

* Principalmente diesel, geotermia, biomasa y algunos renovables.

Fuente: IAE, 2010.

La central nucleoelectrica de 1,350 MWe de capacidad que se usó como ejemplo, operando con un factor de planta del 85%, produciría cada año la cantidad de 9,640 GWhe. De tal manera que el beneficio ambiental se puede estimar en M€ 106 anuales por el CO₂ evitado durante su vida útil de 40 años, con un valor presente de M€ 1,032. Si los proyectos de generación nucleoelectrica pudieran participar en los mecanismos de desarrollo limpio y, por lo tanto, en el mercado de bonos de carbono, las emisiones evitadas de este ejemplo se traducirían en ingresos anuales de M€ 105.

Impacto en el sistema eléctrico interconectado

Debido a que el costo unitario por concepto del combustible nuclear es muy pequeño comparado con el de la energía producida con combustibles fósiles (AIE y AEN, 2010 y Graves, 1979), las centrales nucleoelectricas tienen una ventaja comparativa muy importante y a las empresas eléctricas se les presenta la oportunidad de operarlas con elevados factores de capacidad para cubrir la demanda de la carga base de los sistemas eléctricos interconectados. De esta manera, el costo fijo de la elevada inversión inicial en las centrales se puede prorratear entre una mayor cantidad de electricidad generada, disminuyendo con esto el costo unitario nivelado total. Esto se convierte en una ventaja de competitividad frente a otras centrales del sistema, por ejemplo las carboeléctricas o las de ciclos combinados, que son desplazadas en el orden del despacho de la carga base.

Para aprovechar esta oportunidad y lograr los elevados factores de capacidad deseados, las empresas eléctricas se enfrentan al reto de instaurar eficientes programas de trabajo y capacitar intensivamente al personal de operación y mantenimiento para que, sin menoscabo de los índices de seguridad exigidos por la autoridad reguladora, las centrales puedan operar a plena potencia durante todo el tiempo que estén disponibles. Lo anterior también implica reducir los tiempos de paro programado para realizar con eficacia las recargas de combustible y las tareas de mantenimiento previstas.

En el documento del OIEA que recopila la experiencia de las 438 unidades nucleoelectricas de los Estados miembros que operan en la actualidad se pueden consultar en detalle las causas que inciden en los indicadores que miden el desempeño de las centrales (OIEA, 2009c).

Cuadro 5.3. Beneficios y costos del sistema eléctrico interconectado por el desempeño una central nucleoelectrica de 1.350 MWe con una vida útil de 40 años

Concepto	Desempeño		
	Mediocre	Nominal	Excelente
Factor de planta anual (%)	76.5	85.0	93.5
Generación anual (GWhe)	8,676	9,640	10,604
Emisiones evitadas anuales (Mt CO ₂)	6.33	7.04	7.74
Costo nivelado total (US\$ ₂₀₁₀ /MWh)	100.86	91.52	83.88
Variación del costo nivelado (%)	10.2	0.0	-8.3
Generación total en la vida útil (GWhe)	347,039	385,599	424,158
Emisiones evitadas totales (Mt CO ₂)	253	281	310
Valor presente del beneficio ambiental (M€)	929	1,032	1,136
Variación del beneficio ambiental (%)	-10.0	0.0	10.0

Fuente: Elaboración propia con la metodología de D. Young, (Young, 1993).

Para ejemplificar los beneficios y los costos marginales del sistema eléctrico por el desempeño excelente o mediocre de las centrales nucleoelectricas, en el cuadro 5.3 se presentan los resultados de un breve análisis de sensibilidad (Young, 1993) que permite evaluar los efectos marginales que tendría una variación del $\pm 10\%$ del factor de capacidad anual de la central de referencia de 1,350 MWe. El rango de desempeño se mide desde el 93.5% (excelente) hasta el 76.5% (mediocre), a partir del valor nominal del 85% anual.

En el primer caso, la excelente operación tendría como resultado que la central aumenta su generación anual a 10,604 GWh y que el costo unitario nivelado total disminuya en un 8.3% al valor de 83.88 US\$₂₀₁₀/MWh. Durante la vida útil de 40 años, la excelente operación de la central lograría una reducción marginal de 29 Mt CO₂ en las emisiones a la atmósfera, en relación a la operación de las centrales del sistema que queman combustibles fósiles. El valor presente del beneficio ambiental marginal logrado sería de + M€ 104 (1,136-1,032).

En contraste, una mediocre operación tendría como resultado que la central disminuya su generación anual a 8.676 GWh y que el costo unitario total nivelado aumente en un 10.2% al valor de 100.86 US\$₂₀₁₀/MWh. Durante la vida útil de 40 años, la mediocre operación de la central provocaría que aumentaran en alrededor de 28 Mt CO₂ las emisiones a la atmósfera, generadas en su caso por las centrales del sistema que queman combustibles fósiles. El valor presente del perjuicio ambiental marginal sería - M€ 103 (929-1,032).

Seguridad física de las instalaciones y materiales nucleares

El tema de la seguridad física de las instalaciones y los materiales nucleares está íntimamente ligado con el de las salvaguardias y la no proliferación de armas nucleares. La seguridad física tiene por objeto evitar daños a las instalaciones de la industria nuclear o robos de materiales nucleares o radiactivos que puedan ser usados para causar daño a la salud de la población o para cometer actos criminales, incluyendo la fabricación de artefactos explosivos, o para dispersarlos en el medioambiente. Las salvaguardias tienen por objetivo asegurar que las instalaciones y los materiales nucleares sean usados exclusivamente para fines pacíficos; para lo cual es necesario implantar en las centrales nucleoelectricas instalaciones del ciclo de combustible, reactores de investigación y laboratorios de investigación y desarrollo, sistemas de vigilancia y contabilidad de los materiales nucleares, además de instalar y operar sistemas de seguridad física para evitar que sean sustraídos de las instalaciones o desviados hacia usos no autorizados.

Los retos que se le plantean a las autoridades nacionales y a las entidades involucradas en la industria nuclear son, por un lado, adecuar la legislación para reglamentar específicamente el uso pacífico de las instalaciones y los materiales nucleares y, por otro, penalizar los usos ilegítimos o no autorizados. Además, los sistemas y mecanismos de seguridad que hay que adoptar tienen que ser eficaces para detectar y evitar oportunamente tales usos ilegítimos o no autorizados de las instalaciones y los materiales y, dado el caso, deben tomarse medidas efectivas para perseguir y castigar a los delincuentes.

Otro reto es armonizar las regulaciones y la legislación nacional con las recomendaciones (OIEA, 1975) y el instrumento internacional (OIEA, 1980) que se han adoptado en la materia, que buscan estrechar la colaboración entre los gobiernos y las

instituciones multilaterales para perseguir y castigar el tráfico transfronterizo ilegal de materiales nucleares y los delitos que se cometan con ellos, entre otros objetivos.

Una vez que el país haya puesto en funcionamiento los mecanismos legales, diplomáticos y técnicos para garantizar la seguridad física de las instalaciones y los materiales nucleares, las autoridades nacionales tendrían la oportunidad de replicarlos en el ámbito relevante de las instalaciones estratégicas de las industrias petrolera, eléctrica, de telecomunicaciones, de transportes y otras similares y conexas.

Salvaguardias y no proliferación

Pocos años después de la fundación del OIEA, el 31 de enero de 1961 la Junta de Gobernadores aprobó el sistema de salvaguardias del Organismo ^(OIEA, 1961), que se especifica en el Artículo XII del Estatuto (OIEA, 1990), y que fue ampliado en 1964 para extenderlo a los reactores de gran potencia y a sus instalaciones auxiliares (OIEA, 1964). Posteriormente, el sistema se revisó en 1965 y fue ampliado provisionalmente en 1966 para extenderlo a las plantas de reprocesamiento de combustible irradiado y, luego, fue revisado nuevamente en 1968 para extenderlo a los materiales nucleares sometidos a salvaguardias en plantas de transformación o de fabricación de combustible (OIEA, 1968).

Finalmente, después de la adopción del TNP (OIEA, 1970), que en su Artículo III.1 estipula el compromiso de los Estados no poseedores de armas nucleares que son Partes del Tratado para aceptar salvaguardias de los materiales fuente o materiales fisionables especiales usados en sus territorios para usos pacíficos, el OIEA dio a conocer un documento en el que se describe la estructura y el contenido de los acuerdos que serán firmados entre el OIEA y los Estados para tal propósito (OIEA, 1972a). Adicionalmente, en 1997 el OIEA publicó el modelo del protocolo de los acuerdos de salvaguardias del Organismo con los Estados (OIEA, 1997), solicitado por la Junta de Gobernadores con el fin de reforzar la efectividad e incrementar la eficiencia del sistema de salvaguardias para contribuir con los objetivos globales de no proliferación de armas nucleares.

En el contexto de este esquema internacional jurídico, administrativo y técnico de salvaguardias, el reto al que se enfrentan los gobiernos de los países que emprenden programas nucleoelectrónicos son, en primer lugar, acceder a los instrumentos internacionales

de no proliferación como son el Tratado de Tlatelolco para los países de América Latina y el Caribe (OPANAL, 1967), y también el TNP en el ámbito global (OIEA, 1970) y, en segundo lugar, celebrar con el OIEA los acuerdos de salvaguardias correspondientes (OIEA, 1972a).

Lo anterior implica adquirir voluntariamente compromisos que obligan a los firmantes a instaurar sistemas nacionales de contabilidad y control de los materiales nucleares, así como de protección física de los mismos. A cambio de tales obligaciones, los países tendrán la oportunidad de facilitar el suministro de los reactores y su combustible, además de la negociación para la transferencia de tecnología para la fabricación nacional de equipos y componentes, así como para el diseño, la construcción, la puesta en servicio y la operación de las centrales, además de la tecnología para las operaciones del ciclo de combustible.

Manejo de residuos radiactivos y contaminación

Después del financiamiento del programa nacional de planeación, construcción, puesta en servicio, operación y desmantelamiento de centrales nucleoelectricas, el reto de más largo plazo para los gobiernos, las instituciones de investigación y desarrollo y para las empresas que desmantelan las centrales al final de su vida útil y manejan los desechos radiactivos es elaborar una política nacional para las etapas posteriores del ciclo de combustible. Después de decidir el destino final de los residuos nucleares y los desechos radiactivos, diseñar, construir, poner en servicio y operar durante de forma segura y durante largos periodos, las instalaciones relevantes.

La principal decisión que tienen que tomar los gobiernos es si almacenarán el combustible irradiado de forma definitiva o si lo reprocesarán para recuperar el uranio y el plutonio residuales y separar los productos de fisión radiactivos para almacenarlos definitivamente como desechos en formaciones geológicas estables, fuera de todo contacto con la biosfera. Este es un mecanismo para resolver de manera firme y anticipada el problema del manejo del combustible irradiado y de la contaminación nuclear.

El enfrentar este reto también les presenta a los gobiernos la oportunidad de adoptar para sus programas nucleoelectricos de largo plazo los diseños de reactores avanzados que mejor se adapten al tipo de ciclo de combustible abierto o cerrado que desean emprender.

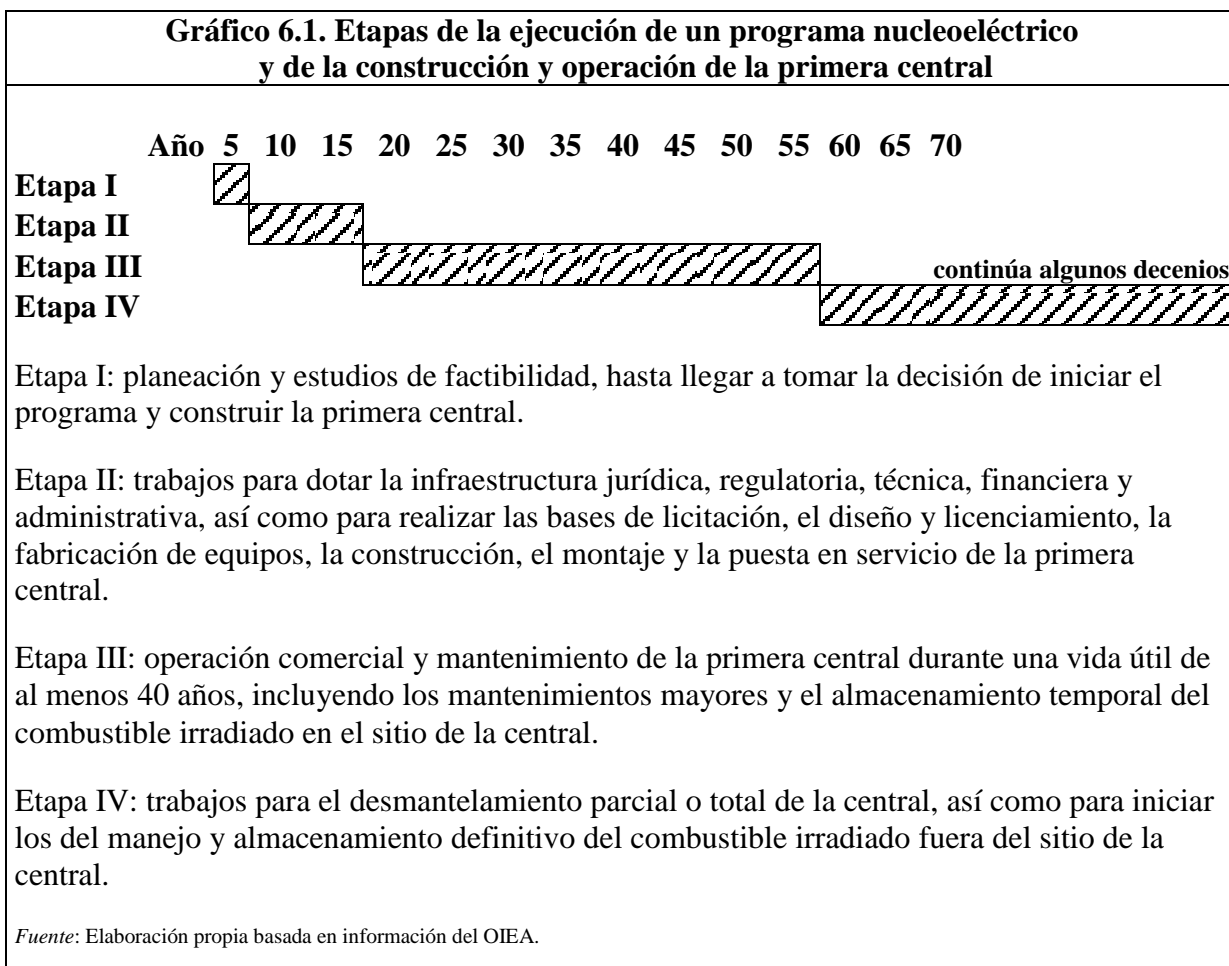
Cabe señalar que los reactores rápidos de cría de la generación IV implican necesariamente un ciclo de combustible cerrado con reprocesamiento del combustible irradiado, que, además de recuperar y reciclar el uranio y el plutonio residuales, son resistentes a la proliferación de armas nucleares.

En el ámbito internacional, se ha adoptado el instrumento jurídico ^(OIEA, 1998) que obliga a los Estados parte a hacerse responsables de la definición de una política del ciclo de combustible compatible con sus intereses nacionales y adoptar las medidas necesarias para ponerla en práctica en el ámbito de su jurisdicción. De esta manera, el manejo y destino final del combustible irradiado y los desechos radiactivos son una obligación nacional ineludible de los países que emprenden programas nucleoelectricos.

6. Hitos en el desarrollo de un programa nucleoelectrico

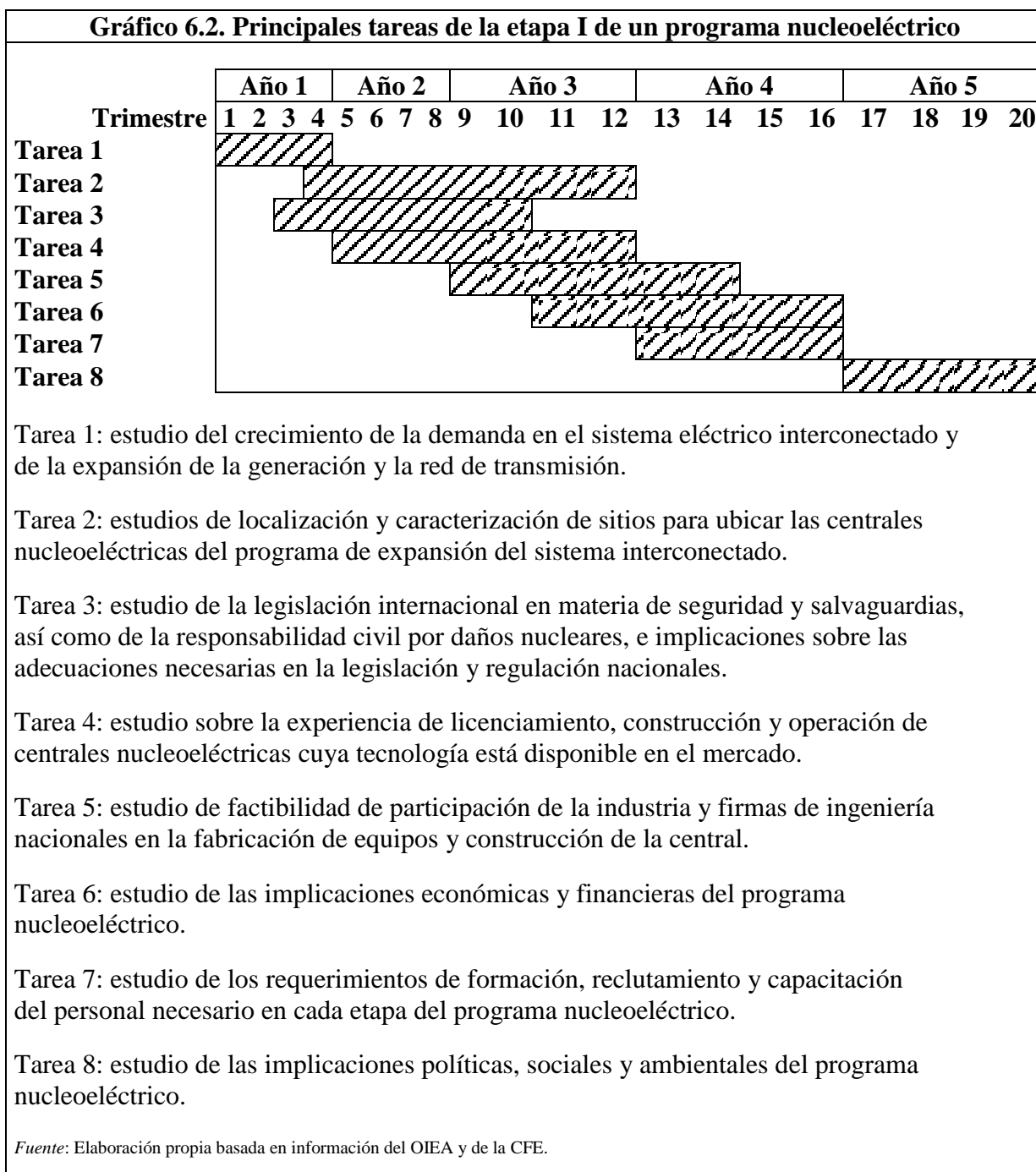
El desarrollo de un programa de centrales nucleoelectricas es un compromiso nacional de muy largo plazo que, a nivel internacional y nacional, tiene implicaciones jurídicas, regulatorias, tecnológicas, económicas y financieras, políticas, sociales y ambientales que se retroalimentan y se extienden durante varias décadas, como se muestra en el gráfico 6.1.

La ejecución del programa se divide en cuatro etapas de distinta duración y complejidad. Cada etapa se detalla en los diagramas de las páginas siguientes. El término de cada una de las etapas y el inicio de la siguiente se identifica por un hito importante en la ejecución del programa nucleoelectrico.



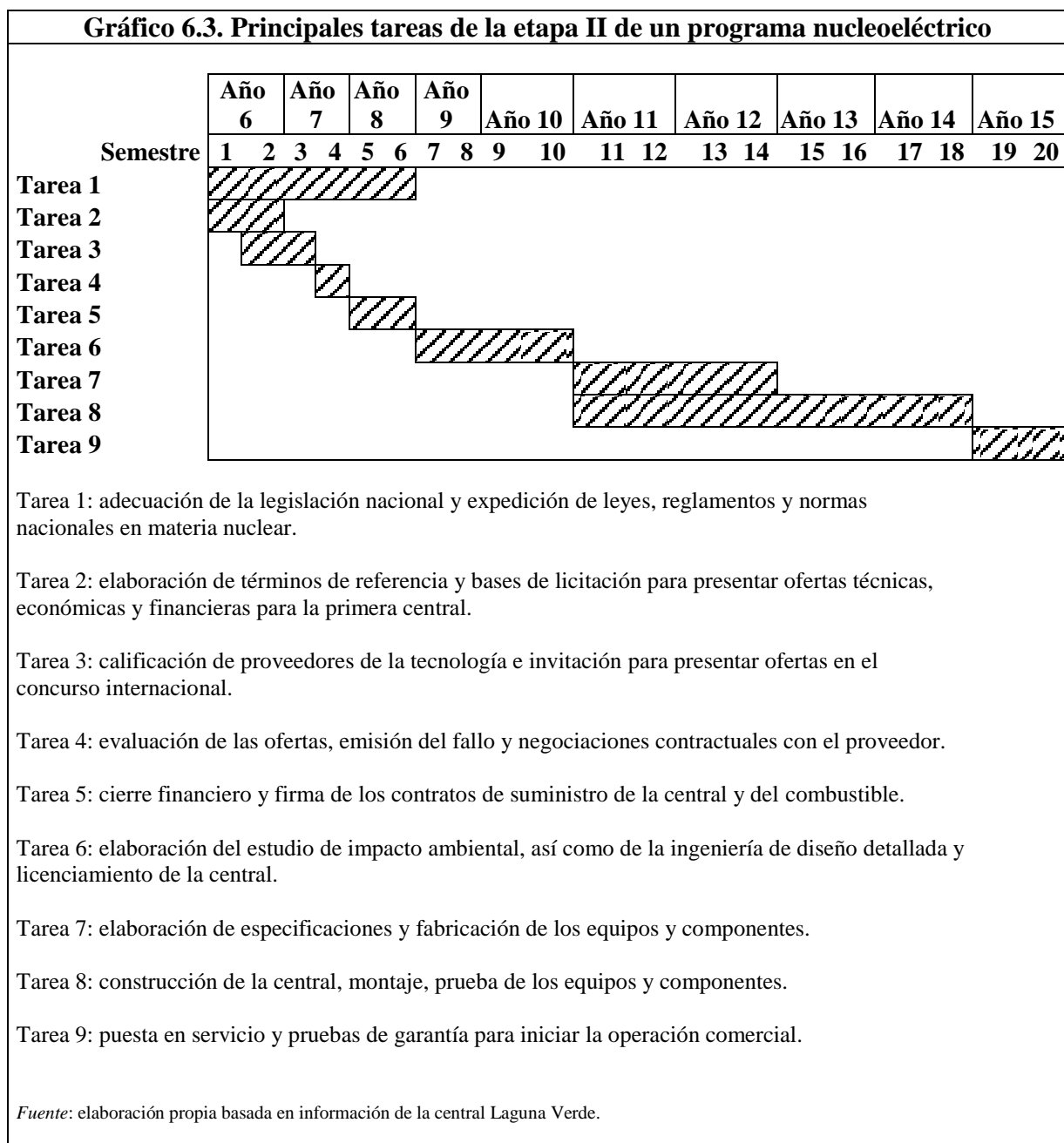
Etapa I: Planeación y estudios de factibilidad

Al final de la etapa I, de aproximadamente cinco años de duración y que involucra ocho tareas principales (véase el gráfico 6.2), el hito consiste en la **decisión oficial para emprender el programa nucleoelectrico** e iniciar el proyecto de la primera central.



Etapa II: Licitación, construcción y puesta en servicio

Al final de la etapa II, que para la primera central del programa dura unos 10 años y consta de nueve tareas principales (véase el gráfico 6.3), el hito es que **la empresa suministradora de la tecnología concluye las pruebas de puesta en servicio y garantía** de manera satisfactoria, a fin de que la empresa eléctrica inicie la operación comercial de la primera central.

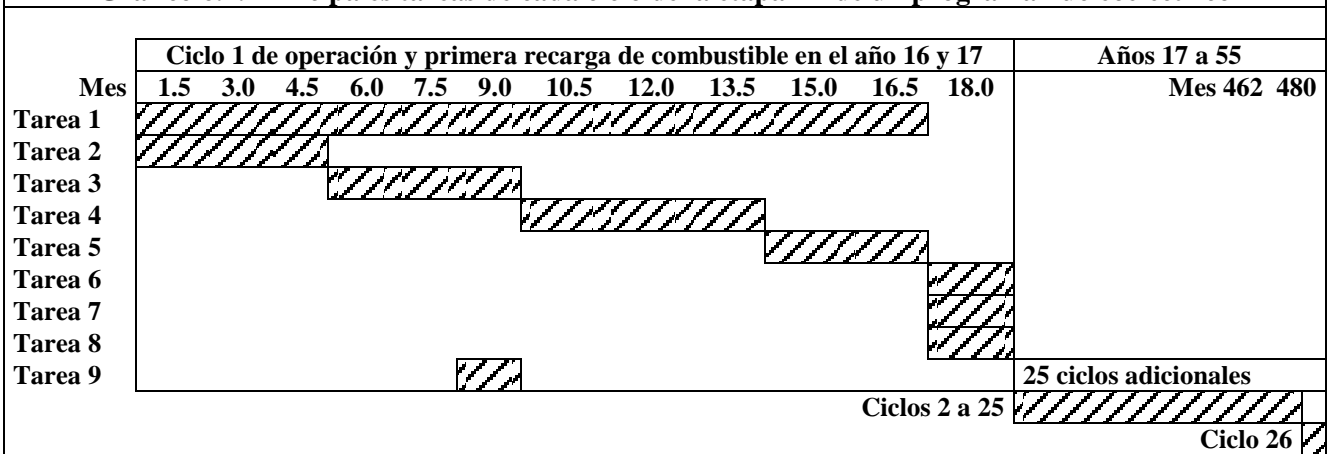


Etapas III: Operación comercial y mantenimiento

La etapa III consiste en 26 ciclos de operación y mantenimiento programado, diseño, licenciamiento y fabricación de las recargas de combustible, así como inspecciones de salvaguardias y de seguridad nuclear a cargo del OIEA y de WANO, respectivamente. Cada ocho años se requiere un mantenimiento mayor para poner al día la tecnología de algunos equipos y componentes de la central con fines de seguridad nuclear y confiabilidad. Las tareas periódicas en cada uno de estos ciclos de 18 meses se repiten durante al menos 40 años; tal como que se muestran cronológicamente en el gráfico 6.4.

Al final de la etapa III, el hito identificado es la **decisión oficial para concluir la operación comercial de la primera central e iniciar su desmantelamiento, así como para el almacenamiento temporal de todo el combustible irradiado.**

Gráfico 6.4. Principales tareas de cada ciclo de la etapa III de un programa nucleoelectrico



Tarea 1: operación comercial de la central durante 16.5 meses.

Tarea 2: diseño nuclear y licenciamiento de la recarga; si fuera necesario, adquisición en el mercado del UF₆ natural.

Tarea 3: enriquecimiento del UF₆ para la recarga o adquisición en el mercado del UF₆ ya enriquecido.

Tarea 4: fabricación de los ensambles conforme al diseño y la licencia otorgada por la CNSNS.

Tarea 5: transporte de la recarga al sitio de la central y almacenamiento bajo salvaguardias en el edificio del reactor.

Tarea 6: paro programado para la recarga y el almacenamiento del combustible irradiado en la alberca del edificio del reactor.

Tarea 7: inspección de salvaguardias durante la recarga de combustible, a cargo del OIEA.

Tarea 8: mantenimiento regular durante el período de recarga de combustible.

Tarea 9: cada dos ciclos, visita de los inspectores de WANO.

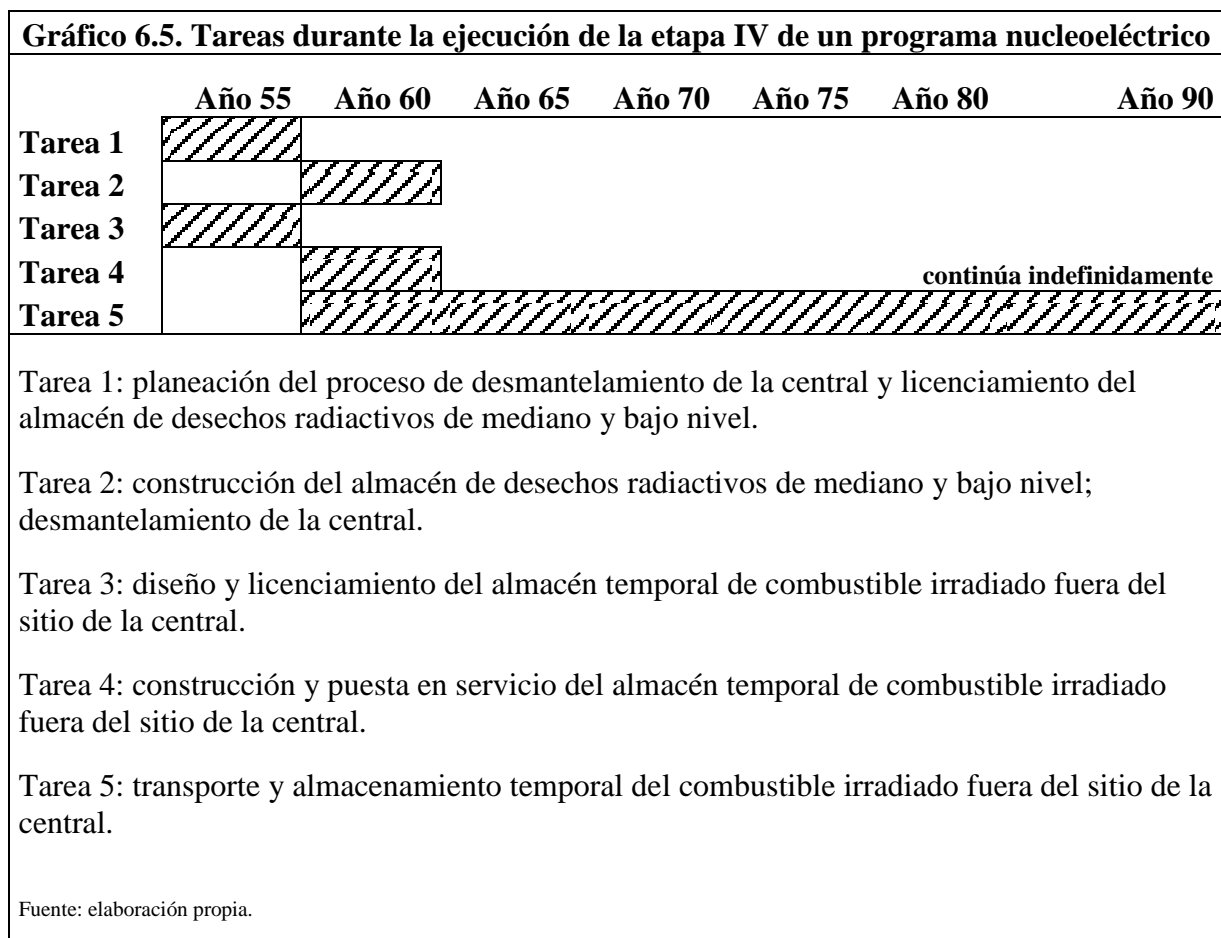
Ciclos 2 a 25: ciclos subsecuentes de operación, recargas de combustible y mantenimiento de la central; cada ocho años, un mantenimiento mayor para actualización de equipos y componentes.

Ciclo 26: último ciclo de operación y descarga total del combustible irradiado para almacenarlo temporalmente fuera del edificio del reactor.

Fuente: Elaboración propia a partir de información de la central Laguna Verde.

Etapa IV: Desmantelamiento de la central y manejo del combustible irradiado

La duración de la etapa IV, que consiste en el desmantelamiento de la central y el manejo del combustible irradiado fuera del sitio, puede ser muy larga y extenderse por varios decenios hasta que el gobierno adopte una política para el manejo del combustible irradiado y el destino final de los desechos radiactivos de alto nivel. El hito al final de la misma es que **el Gobierno decide reprocesar el combustible irradiado, reciclar el uranio y el plutonio residuales y almacenar definitivamente los desechos radiactivos en un depósito geológico fuera de todo contacto con la biosfera.** Las principales tareas en las que podría consistir la etapa IV se muestran en el gráfico 6.5.



En la ejecución de los proyectos posteriores a la primera central nucleoelectrica, la duración de la etapa I de planeación y estudios de factibilidad y de la etapa II de licitación, construcción y puesta en servicio podrían ser menores en la medida que la experiencia adquirida y las lecciones aprendidas se retroalimenten como mejores prácticas para la construcción de futuras centrales del programa. El OIEA presta asistencia técnica a sus Estados miembros para realizar las tareas de las etapas I y II y ha publicado una serie de documentos sobre esos temas (OIEA, 2003; OIEA, 2007b; y OIEA, 2007c).

El OIEA también presta asistencia técnica a sus Estados miembros en la ejecución de las tareas de las etapas III y IV. En el futuro, la duración de la etapa III de operación comercial y mantenimiento podría ser mayor si la tecnología de las nuevas centrales permite diseñarlas y operarlas para una vida útil más extensa. La duración de la etapa IV de desmantelamiento de la central y manejo del combustible irradiado podría reducirse si hay consenso internacional acerca del reprocesamiento y reciclado expedito del combustible irradiado.

Anexo

Notas periodísticas

REFORMA viernes 14 de mayo de 2010

Analizan diferentes escenarios sobre el programa nuclear

Planea CFE tener 10 reactores

Sumarían un total del 12 mil megawatts; tendría la SENER que autorizarlos

Alma Hernández

En caso de que México decida implementar un programa nuclear se tendrían que construir 10 reactores en 30 años, el primero de los cuales debería entrar en operación en 2018, según estimaciones de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Al participar en el Seminario “La Nucleoelectricidad en México y en el Mundo”, Eugenio Laris Alanís, director de Proyectos de Inversión Financiada de la CFE, planteó que éste es uno de los escenarios que se analiza, aunque requeriría fuertes inversiones. Precisó que actualmente la Secretaría de Energía (SENER) estudia el nuevo Programa de Obras de la CFE para los próximos 15 años, en el que ya se incluyen proyectos actuales de generación nuclear, pero que deben autorizarse por la dependencia.

Construir 10 reactores equivale a agregar unos 12 mil megawatts de electricidad a un costo de aproximado de entre 3 mil y 3 mil 500 dólares por kilowatt instalado, estimó Pablo Mulás, del Instituto de Investigaciones Eléctricas. Actualmente, la capacidad instalada de la CFE es de 50 mil 403 megawatts.

Al respecto, Georgina Kessel, titular de la SENER, mencionó que se analiza un programa nuclear para México con el fin de cumplir con la meta de la Estrategia Nacional de Energía (ENE) para generar 35% de la electricidad a partir de fuentes limpias. “¿Cuál va a ser la mezcla de tecnologías hacia el futuro? Es algo que deberá ser determinado en el proceso de planeación de la CFE”, abundó la funcionaria. En su participación, durante la inauguración del Seminario, planteó que aún existen temas a resolver, el principal de ellos es contar con más recursos humanos especializados y altamente calificados, así como el asunto del confinamiento de desechos.

Kessel afirmó que la industria nuclear presenta características propias, a partir de las cuales se deben establecer líneas de acción para un manejo responsable de cada una de las etapas de su desarrollo. De optar por un proyecto nuclear, reconoció, sería posible diversificar la matriz energética, además de que en el mundo hay un resurgimiento a partir de reactores de última generación mucho más seguros, eficientes, y con nuevas técnicas de confinamiento de residuos. Destacó que Estados Unidos cuenta con el mayor número de reactores nucleares comerciales en operación; que Canadá fue el mayor

productor de Uranio en 2007 y 2008; y Francia genera 75% de su electricidad a partir de fuentes nucleares. También resaltó el caso de China, que tiene el mayor número de reactores en construcción.

Experiencia previa

A la fecha México cuenta con una central nucleoelectrica que tiene dos reactores nucleares: 683 megawatts de capacidad de generación de cada una de sus unidades; 30 años tiene en operación; 300 kilómetros es la distancia entre la Ciudad de México y la planta; 9,000 megawatts de capacidad adicionales buscará inicialmente la CFE desarrollar en la ENE.

Ubican focos rojos

Para desarrollar un programa nuclear de largo plazo se identifican áreas que deben fortalecerse, según la SENER: contar con más recursos humanos; actualización de regulación y homologación de normas de seguridad nuclear; fortalecer la investigación y el desarrollo; almacenamiento de los desechos nucleares.

REFORMA viernes 14 de mayo de 2010

Faltan nuevos profesionales

Alma Hernández

El programa de energía nuclear que planea la Comisión Federal de Electricidad (CFE) dependerá de profesionales con edades de hasta 70 años, y no se cuenta con un plan de reemplazo. Juan Luis Francois, presidente de la Comisión de Especialidad de Ingeniería Nuclear de la Academia de Ingeniería, dijo que en las universidades públicas continúan formándose, pero la mayoría encuentra oportunidades laborales fuera del País. “Debido a que todavía no hay un programa nuclear como tal en el País, si no consiguen lugar en los sitios ya conocidos como son la planta de Laguna Verde o el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) se van del país”, destacó.

Actualmente, se elabora un estudio sobre la disponibilidad de recursos humanos existentes y los que se requerirán a futuro, en el que participa la Universidad de Zacatecas. De acuerdo con la Estrategia Nacional de Energía, el personal dedicado a la investigación en materia nuclear está próximo a terminar su vida productiva por contar con más de 50 años de edad.

Rafael Fernández de la Garza, director de Laguna Verde, mencionó que en la única planta nuclear del País la edad promedio es de 40 años, pero que está incorporando a personal especializado de la Universidad Veracruzana. Preciso que la CFE ya trabaja con un grupo de 60 personas, de los cuales 20 son jóvenes que están iniciando su capacitación. Como base para la construcción de una planta

nuclear, refirió Fernández, se requieren ingenieros mecánicos y civiles; en el nivel medio se buscan liderazgos nucleares, y en el alto, especialistas más calificados.

Gustavo Alonso, integrante del ININ, explicó que para cada planta nuclear se requieren al menos 350 ingenieros, 20% con alta especialización. Duncan Hawthorne, presidente de la empresa canadiense Bruce Power, precisó que para incentivar el interés por carreras vinculadas a la energía nuclear es necesario presentar primero planes de largo alcance. En este sentido, Alexey Lokhov, funcionario de la Agencia de Energía Nuclear de la OCDE, ofreció a México apoyo en capacitación de recursos humanos.

El jefe de la división de Infraestructura del Banco Interamericano de Desarrollo, Leandro Alves, señaló que México, América Latina y el Caribe requerirán mil 300 millones de dólares de financiamiento, de los cuales 324 mil serán para producir energía.

En las últimas

El personal vinculado con investigación nuclear ya está próximo a concluir su vida productiva, de acuerdo con la Estrategia Nacional de Energía, elaborado por la SENER.

En la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, 83 personas en total de las cuales: el 35% con más de 50 años; el 29% entre 40 y 50 años; y el 36% con menos de 40 años.

En el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, 735 personas en total de las cuales: el 53% con más de 50 años; el 33% entre 40 y 50 años; y el 14% con menos de 40 años.

Fuente: SENER

REFORMA sábado 15 de mayo de 2010

Prevén costo de nucleoelectrica

FUERTE INVERSION. Cintia Angulo, presidenta del World Energy Council

Capítulo México, estimó que para una nueva central nuclear se requerirán 4 mil 500 millones de dólares.

Alma Hernández

El costo de una nueva central nucleoelectrica se estima en 4 mil 500 millones de dólares, de los cuales 2 mil 500 corresponden a compras nacionales, estimó Cintia Angulo, presidenta del World Energy Council Capítulo México. Comentó que estudios realizados recientemente, a partir del proceso de repotenciación en Laguna Verde, refieren que los proveedores nacionales podrían aportar 55% de los componentes requeridos en la construcción de una nueva planta. Durante su participación en el seminario “La Nucleoelectricidad en México y el Mundo”, declaró que dada la experiencia de Alstom en el contrato de repotenciación de Laguna Verde, se han encontrado altos porcentajes de la red de

proveedores nacionales. Manufacturas nacionales como cables, accesorios eléctricos, diafragmas para rotores, turbinas de vapor, equipos especializados, y hasta cemento tienen un nivel de participación entre 50 y 80%.

“La experiencia reciente para el incremento de potencia de las unidades uno y dos de Laguna Verde muestra que, al término de los trabajos, se tendrá una participación nacional de 22%”, precisó. En este proceso, agregó, es necesario certificar y recertificar a empresa nacionales, además de implementar políticas públicas que permitan que el potencial nuclear sea visto como una mayor oportunidad de desarrollo económico. Para dicho proyecto, de los 25 pedidos de componentes, se tuvo suministro nacional completo en 10 y parcial, México-Estados Unidos y México-Francia, en dos.

El tema toma relevancia después de que el director de la CFE, Alfredo Elías Ayub, anunció la implementación de un programa nuclear. La oportunidad para las empresa, a diferencia de cuando se construyó Laguna Verde, recordó Angulo, es la de ofrecer una planta llave en mano.

Al respecto, Rafael Fernández de la Garza, gerente de Centrales Nucleoeléctricas de la CFE, coincidió que en este momento 22% de los equipos y componentes son de fabricación nacional, principalmente en Morelia, Michoacán. Sobre los trabajos de repotenciación en Laguna Verde mencionó que ahora están en fase de pruebas de la unidad uno, para llegar a los 817 megawatts de capacidad y el 31 de agosto se detendrá las unidad dos para recarga.

REFORMA martes 18 de mayo de 2010

Buscarán reutilizar desechos nucleares

Alma Hernández

El 95% de los desechos nucleares de la central nucleoelectrica Laguna Verde, junto con los que se pudieran presentar en nuevas plantas podrían ser reutilizados, según uno de los primeros planes de confinamiento nuclear que analiza la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Rafael Fernández de la Garza, gerente de Centrales Nucleoeléctricas de la CFE, dijo en entrevista que este proyecto deberá desarrollarse una vez que se tenga un programa que incluya más centrales nucleoelectricas.

Precisó que países como Francia, China y Rusia ya reutilizan sus radiactivos para elaborar un nuevo combustible llamado MOX (mezcla de óxidos) y que puede ser cargado como combustible nuevamente en sus reactores de fisión. “El combustible gastado que anteriormente se consideraba como un desecho a disponer, o ciclo abierto, se ha revaluado a un activo energético que debe ser recuperado por la gran cantidad de energía que contiene”, dijo Fernández de la Garza.

Recordó que del combustible total gastado en una planta nuclear, sólo 5% (productos de fisión) pueden ser considerados como desecho. El restante 95% es Uranio y Plutonio, los cuales se recuperan en una planta para su reprocesamiento y producir el llamado MOX y que puede ser utilizado en los nuevos reactores, precisó.

Con el aprovechamiento de estas nuevas tecnologías, los desechos nucleares de un programa podrían reutilizarse como sucede en otros países, y comenzar a hablar de un ciclo cerrado de combustible, dijo. Fernández de la Garza agregó que si se consideran estos nuevos procesos, el volumen de los desechos de Laguna Verde equivaldría a una alberca olímpica con un metro de profundidad, que almacenados en sitios adecuados garantizan su utilidad para los próximos cien años.

EXCELSIOR viernes 14 de mayo de 2010

Georgina Kessel, titular de la SENER, señaló que el futuro de del país se definirá por la forma en que produzcamos energía.

La marea negra impulsa plan nuclear, dice Kessel

Se requieren alternativas “limpias”, afirma

Por Jaime Contreras

jaime.contreras@nuevoexcelsior.com.mx

Ante el severo derrame petrolero que se presenta en el Golfo de México, cinco mil barriles diarios, es hora de que nuestro país retome con responsabilidad la generación de energía nuclear. Hay que remediar el daño ecológico, sí, pero al mismo tiempo “buscar alternativas energéticas limpias, que no profundicen el deterioro ambiental”. De esta manera lo propuso el coordinador del PRI en el Senado, Manlio Fabio Beltrones, mientras que la titular de la Secretaría de Energía, Georgina Kessel, advirtió que el futuro nacional se determinará por las formas en que produzcamos y consumamos energía, sin afectar los ecosistemas ni la generación de riqueza.

Eso sí, Beltrones indicó que derivado de lo que ocurre hoy en el Golfo de México, PEMEX “debe poner mucha atención para el futuro –al utilizar este nuevo régimen de contratos que el hemos dado en la reforma petrolera-, las convocatorias o licitaciones para incursionar en aguas profundas, con los contratos incentivados, se especifique perfectamente en el clausulado que se debe prever cualquier accidente de esta naturaleza, a fin de evitar que a nosotros (eso) nos pase en el futuro”. Kessel estableció que la utilización de energías limpias renovables y amigables con el ambiente, son el reto del futuro y el camino adecuado.

El senador Francisco Labastida, en nombre de la Comisión de Energía, destacó que la marea negra genera un nuevo problema: se elevará el costo de los seguros y de la inversión. “Tengan ustedes por seguro que los costos de los seguros para la perforación van a subir, y las medidas de prevención van a elevar los costos también. Va a ser más difícil la explotación del petróleo en el mar, en aguas profundas y ultraprofundas”, alertó.

Beltrones expresó que ante el agotamiento del petróleo, así como su contribución al calentamiento global, “es indispensable voltear la mirada hacia la energía nuclear, que puede manejarse sin afectar el

ambiente y aportar una proporción importante de la oferta energética”. El legislador señaló que este tipo de energía puede ser una alternativa para reducir significativamente la dependencia de los hidrocarburos; empero, agregó, “se ha preferido el camino fácil de aprovechar las reservas de hidrocarburos y se han eludido los esfuerzos de inversión que demanda la energía nuclear”.

EXCELSIOR sábado 15 de mayo de 2010

Cintia Angulo, presidenta del Consejo Mundial de Energía, Capítulo México, dijo que se deben buscar los recursos en el país.

Impulsan la energía nuclear

Una planta costaría cuatro mil 500 millones de dólares

Por Atzayaelh Torres y Jaime Contreras
dinero@nuevoexcelsior.com.mx

“Es importante promover políticas que permitan que el potencial nuclear sea visto como una oportunidad para una mayor participación de la industria mexicana”. CINTIA ANGULO

La construcción de una planta nuclear en México requeriría una inversión de de cuatro mil 500 millones de dólares, estimó Cintia Angulo, presidenta del Consejo Mundial de Energía, Capítulo México. De esta cantidad, el 57.4%, alrededor de dos mil 500 millones de dólares podrían ser destinados a proveedores nacionales que, en palabras de la ejecutiva, cuentan con la capacidad tecnológica suficiente para suministrar un proyecto de este tipo. Otra parte, mil 870 millones de dólares serían de importaciones, el 42.7% restante. Aseguró que para hacer atractiva una opción nuclear en México es necesario certificar y recertificar a las empresas mexicanas en cuanto a sus capacidades actuales.

Ante senadores y expertos en el tema la ejecutiva aseguró que es necesario un posicionamiento voluntarista del estado y de los tres poderes de gobierno para lanzar un programa nuclear a largo plazo. Según el organismo internacional existen empresas como Suecomex, Conдумex, Cemex, Cementos Veracruz, Apasco, IEM Transformadores, US Motors Altos Hornos e ICA en conjunto con Carso, las que tendrían mayor oportunidad. Detalló que los estados en los cuales se encuentran asentadas las facilidades industriales para este tipo de manufacturas son Querétaro, Nuevo León, Veracruz y Michoacán.

En su participación dentro del seminario *La nucleoelectricidad en México y el mundo*, aseguró que México cuenta con un potencial de generación de este tipo de 1.4 gigawatts, que aportaría a los 30 gigawatts que para 2025 generaría la región Norteamérica. Actualmente existen en construcción 56

unidades nucleares en el mundo en países como China, India, Japón, Francia, Bulgaria, Rusia y Francia, principalmente. Estas estaciones se sumarán a los 436 reactores que existen en el mundo y que generan el 17% de la electricidad, mientras que en México es tan solo del 3%.

La también presidenta para México y Mesoamérica de Alstom detalló que la repotenciación de Laguna Verde cuenta con la participación de GE en la construcción de un reactor, así como Bechtel con la ingeniería llave en mano, Ebasco e ICA, con ingeniería especializada y básica, respectivamente.

EL UNIVERSAL viernes 14 de mayo de 2010

SEMINARIO. Francisco Labastida, Gustavo Madero, Manlio Fabio Beltrones y Georgina Kessel, en el Senado de la República

SENER analiza uso de energía nuclear

En generación eléctrica es la opción, pero el carbón seguirá

Ricardo Gómez y Elena Michel
política@eluniversal.com.mx

La secretaria de Energía, Georgina Kessel, confirmó que el gobierno federal apuesta a reducir la dependencia de combustibles fósiles como el carbón, para la generación de energías más limpias. Reveló que hoy día se analiza incrementar el uso de la energía nuclear en la matriz energética nacional, como una alternativa para generar energía limpia y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. EL UNIVERSAL publicó a principios de esta semana que México retomó el uso del carbón, uno de los combustibles más contaminantes para la generación de electricidad. Reveló que el año pasado murieron un total de 7 mil personas por el contacto directo con partículas de carbón negro.

Al respecto, Kessel dijo en conferencia de prensa que la alternativa es diversificar las fuentes primarias de energía, para lo que en la Estrategia Nacional de Energía se plantea que 35% de la capacidad instalada de generación hacia el año 2024 provenga de energías limpias, aunque aceptó que continuará el uso del carbón. “¿Qué significa esto? Que podamos reducir nuestra dependencia de combustibles fósiles, pero vamos igualito que en el resto del mundo, vamos a tener que seguir usando los combustibles fósiles, aunque lo debemos de hacer de manera mucho más limpia”, dijo la funcionaria.

Combustibles fósiles. Kessel participó en el inicio del seminario *La nucleoelectricidad en México y el mundo*, cuyos trabajos hoy concluyen. Recordó que el mundo seguirá consumiendo combustibles fósiles, tanto hidrocarburos como carbón en 70% en las próximas décadas. “Esa va a ser nuestra dependencia”, dijo, pero indicó que apuestan a avanzar en energías limpias.

El coordinador del PRI en el Senado, Manlio Fabio Beltrones, dijo en la inauguración que una solución importante es el desarrollo de la energía nuclear, por lo que es necesario analizar esa opción

con profundidad y responsabilidad para México. El petróleo –recordó- está en franca declinación, su ritmo de descubrimiento tiende a bajar y los costos de extracción son cada vez más elevados, además de que los riesgos son mayores. Coincidió en buscar alternativas energéticas limpias.

Kessel también fue interrogada por la construcción de la nueva refinería en Tula. Dijo que están en tiempo y se han dedicado a una planificación a fondo para evitar pérdidas económicas.

MILENIO jueves 13 de mayo de 2010

Comienza seminario internacional

Buscará el Senado apoyo para nueva nucleoelectrica

México> Angélica Mercado

El Senado arrancará hoy el cabildeo para avanzar en un proyecto que permita a mediano plazo construir en México una nueva nucleoelectrica, anunció el secretario de la Comisión de Energía, Rubén Camarillo, al reconocer que es un tema tabú que será difícil de procesar con el antecedente de la tragedia de Chernobyl, pero necesario para contar con fuentes alternas de producción de electricidad. El Senado realizará hoy el Seminario Internacional “La Nucleoelectricidad en México y el mundo”, con la participación del Banco Interamericano de Desarrollo y el Consejo Mundial de Energía, en el que participarán expertos de varios países.

En entrevista, Camarillo detalló que la intención es ir generando las condiciones que permitan construir la segunda nucleoelectrica del país, ya que Laguna Verde ha demostrado que se pueden operar instalaciones de este tipo con seguridad y generar hasta 4.8% de la luz que se consume en el país. Aunque señaló que la construcción será un plan a mediano plazo, el Senado ha valorado que se requiere diversificar la matriz energética del país ante una eventual escasez de hidrocarburos para su producción.

“Las fuentes de energías primarias es uno de los temas que nos debe ocupar a los mexicanos, son proyectos a mediano plazo, pero el debate debe empezar hoy”, dijo Camarillo. El legislador refirió que el seminario tiene por objeto colocar el tema a discusión, aunque se advierte que es un tema tabú por la tragedia de Chernobyl hace 30 años. ■ **M**

MILENIO viernes 14 de mayo de 2010

Programa de la CFE incluye una planta de ese tipo

México debe apostar por la energía nuclear

En nuestro país representa sólo 2%; el promedio mundial es de 6%; Beltrones

México> Luis Carriles

México debe apostar a la energía nuclear y reducir su dependencia de los hidrocarburos, que están en franca declinación, se han encarecido y dañan el ambiente, dijo el senador Manlio Fabio Beltrones. “La energía nuclear representa apenas 2% de la energía total consumida en México. En contraste con la enorme dependencia de los hidrocarburos, que representa el 84% de la energía primaria, mientras que a escala mundial estas cifras son de 6 y 60%, respectivamente”, dijo.

Ante el reto, la secretaria de Energía, Georgina Kessel, señaló que para poder cumplir con los compromisos de energías limpias planteados en la Estrategia Nacional de Energía (ENE) se necesita desarrollar un plan nuclear de mediano plazo. Por lo pronto, la Comisión Federal de Electricidad prepara su Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico para los próximos 10 años, donde se prevé al menos la construcción de dos centrales eléctricas de más de mil megawatts cada una. En ambas centrales aún no se define que tipo de energía utilizarán por lo que la opción podría ser construir al menos una nueva central nucleoelectrica. Al respecto, la opinión del Organismo Internacional de Energía Atómica es que los proyectos nucleares requieren procesos de maduración muy extensos, de por lo menos cuatro a cinco años.

Crítica senatorial. Beltrones dijo que tanto el agotamiento de las fuentes energéticas tradicionales, particularmente el petróleo, y el calentamiento global hacen indispensable usar la energía nuclear, sin efectos en el medio ambiente y con una buena oferta energética. No sólo por el petróleo que está en franca declinación, con menos descubrimientos y altos costos de extracción, sino porque es necesario actuar simultáneamente en la remediación del daño ecológico y con alternativas energéticas limpias.

Kessel dijo que México está involucrado en una transición energética y es necesario evaluar las opciones para poner al sector a la vanguardia. ■ M

EL SOL DE MEXICO viernes 14 de mayo de 2010

Consideran intensificar uso de energía nuclear en México

Por Jorge Olmedo

La secretaria de Energía, Georgina Kessel, reconoció ayer que la viabilidad y conveniencia de intensificar el uso de la energía nuclear en México está siendo considerada en función de sus costos de oportunidad y los precios a futuro, para garantizar que sea la opción de menor costo y que ofrezca

óptima estabilidad, calidad y seguridad en el servicio. Reconoció que con una experiencia de más de tres décadas en el uso de energía nuclear para generar electricidad, con la Central Laguna Verde, en Veracruz, se analiza incrementar el uso de la energía nuclear en la matriz energética nacional, como una alternativa para generar energía limpia y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles.

Al poner en marcha los trabajos del Seminario Internacional “La Nucleoelectricidad en México y en el Mundo”, organizado por el Senado de la República, señaló que con ello se podrá obtener la meta establecida en la Estrategia Nacional de Energía, ratificada recientemente por el Congreso de la Unión, de que las energías limpias representen el 35% de la capacidad de generación eléctrica en el año 2024. Kessel en su mensaje señaló que en el análisis sobre la viabilidad y conveniencia de intensificar el uso de la energía nuclear, están siendo considerados los costos de oportunidad y los precios a futuro, para garantizar que sea la opción de menor costo y que ofrezca óptima estabilidad, calidad y seguridad en el servicio. Esta será una decisión que deberán tomar todos los mexicanos en el mediano plazo para garantizar el desarrollo de las futuras generaciones.

Bibliografía

AIE Y AEN (Agencia Internacional de Energía y Organismo de Energía Nuclear). 2010. *Projected Costs of Generating Electricity, 2010 edition*. París, OCDE.

AIE (Agencia Internacional de Energía). 2010. *CO₂ Emisissions by Fuel*. Key World Energy Statistics 2010. París, AIE.

———. 2010b. *Key World Energy Statistics 2010*. París, AIE.

BENEDICT, Mason, et al. 1981. *Nuclear Chemical Engineering*. Nueva York, McGraw-Hill.

BID (Banco Interamericano de Desarrollo). 2010. *CA-0035: SIEPAC Interconexión Eléctrica de Centro América*. Washington D.C., BID. Disponible: <<http://www.iadb.org/projects>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

CFE (Comisión Federal de Electricidad). 2008. *Informe de Operación 2008*. México D.F., CFE.

CNE (Comisión Nacional de Energía). 2008. *Política Energética: Nuevos lineamientos*. Santiago de Chile, CNE. Disponible: <http://www.cne.cl/archivos_bajar/Politica_Energetica_Nuevos_Lineamientos_08.pdf>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN. 1985. *Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear*. México D.F., Diario Oficial de la Federación. Disponible: <<http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/207.pdf>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

FERNÁNDEZ DE LA GARZA, Rafael, et al. 2009. *La nucleoelectricidad, una oportunidad para México*. México D.F., Academia de Ingeniería de México. Disponible: <<http://www.ai.org.mx/archivos/publicaciones/nucleoelectricidad/La%20Nucleoelectricidad-Reporte%20Corto.pdf>>. Fecha de acceso. 24/10/2010.

GRAVES, Harvey W. 1979. *Nuclear Fuel Management*. John Wiley & Sons.

GREÑO VELASCO, José Enrique. “El acuerdo Brasil-RFA y el principio de No Proliferación Nuclear”. En: *Revista de Política Internacional*, 154-8.

MIT (Massachusetts Institute of Technology). 2009. *Update of the MIT 2003 Future of Nuclear Power Study*. Cambridge, MIT. Disponible: <<http://web.mit.edu/nuclearpower/pdf/nuclear>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

MURRAY, Raymond L. 2001. *Nuclear Energy*. Butterworth-Heinemann.

OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). 2010. *Energy Technology Perspectives 2010: Scenarios & Strategies to 2050*. París, OCDE. Documento mimeografiado.

———. 2009. *Nuclear Energy Data 2009*. París, OCDE.

———. 2008a. *Perspectivas sobre energía nuclear 2008. Sumario*. París, NEA/OCDE.

———. 2008b. *Uranium 2007, Resources, Production and Demand*. París, NEA/OECD y IAEA.

———. 1995. *Statute of the OECD Nuclear Energy Agency, as amended on July 13, 1995*. París, OCDE. Disponible: <<http://www.nea.fr/nea>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica). 2009a. *INFCIRC/754. Agreement between the Government of India and the International Atomic Energy Agency for the Application of Safeguards to Civilian Nuclear Facilities*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 2009b. *Nuclear Power Reactors in the World*. Viena, OIEA. Disponible: <http://www.eletronuclear.gov.br/pdf/nuclear_power.pdf>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 2009c. *Operating Experience with Nuclear Power Stations in member States in 2008*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/programmes/a2/>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 2009d. *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2030. RDS-1/29, 2009 Edition*. Viena, OIEA. Disponible: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/RDS1-29_web.pdf>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 2008. *INFCIRC/731. Communication dated 25 July 2008 received from the Permanent Mission of India concerning a document entitled 'Implementation of the India-United States Joint Statement of July 18, 2005: India's Separation Plan'*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 2007a. *Principios Fundamentales de Seguridad*. Viena, OIEA. Disponible: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1273_S_web.pdf>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 2007b. *Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power*. Viena, OIEA. Disponible: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1305_web.pdf>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 2007c. *Considerations to Launch a Nuclear Power Programme*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Downloads/files/Considerations.pdf>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 2004a. *INFCIRC/623. Communication of 10 December 2003 from the Permanent Mission of the People's Republic of China to the International Atomic Energy Agency regarding China's Nuclear Policies and Practices*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 2004b. *INFCIRC/627. Communication of 26 January 2004 from the Permanent Mission of the People's Republic of China to the International Atomic Energy Agency regarding China's Nuclear Policies and Practices*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 2003. *Handbook of Nuclear Law*. Viena, OIEA. Disponible: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1160_web.pdf>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1998. *INFCIRC/546. Convención Conjunta sobre Seguridad en la Gestión del Combustible Gastado y sobre Seguridad en la Gestión de Desechos Nucleares*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1997. *INFCIRC/540. Model Protocol Additional to the Agreement(s) Between State(s) and the International Atomic Energy Agency for the Application of Safeguards*. Viena, OIEA.

———. 1994a. *INFCIRC/428. Entrada en vigor para Argentina del Tratado para la Prohibición de las Armas Nucleares en la América Latina y el Caribe*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1994b. *INFCIRC/433. Agreement with the Government of India for the Application of Safeguards to all Nuclear Material Subject to Agency Safeguards under INFCIRC/154, Part 1, and under the Agreement between India and the IAEA contained in Exchanges of Letters dated 1 October and 1 December 1993*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1994c. *INFCIRC/435. Acuerdo del 13 de diciembre de 1991 concertado entre la República Argentina, la República Federativa del Brasil, la Agencia Brasileño-Argentina de Contabilidad y Control de Materiales Nucleares y el Organismo Internacional de Energía Atómica para la aplicación de salvaguardias*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1994d. *INFCIRC/448. Entrada en vigor para Brasil del Tratado para la Prohibición de las Armas Nucleares en la América Latina y el Caribe*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1994e. *INFCIRC/449. Convención sobre Seguridad Nuclear*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1990. *Estatuto del Organismo Internacional de Energía Atómica, con las enmiendas introducidas hasta el 28 de diciembre de 1989*. Viena, OIEA.

———. 1989a. *INFCIRC/360. Agreement of 27 September 1988 between the International Atomic Energy Agency and the Government of India for the Application of Safeguards in Connection with the Supply of a Nuclear Power Station from the Union of Soviet Socialist Republics*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1989b. *INFCIRC/369. Agreement of 20 September 1988 between the People's Republic of China and the International Atomic Energy Agency for the Application of*

Safeguards in China. Viena, OIEA. Disponible:

<<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1980. *INFCIRC/274/Rev.1. Convención sobre la protección física de los materiales nucleares*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1975. *INFCIRC/225. The Physical Protection of Nuclear Material*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1974a. *INFCIRC/203. Texto de los instrumentos relacionados con la prestación de asistencia del Organismo a México para ejecutar un proyecto relativo a una central nuclear*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1974b. *INFCIRC/211. The Text of a Safeguards Agreement between the Agency, Canada and India*. Viena, OIEA. Disponible:

<<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1973a. *INFCIRC/193. Texto del acuerdo concertado entre Bélgica, Dinamarca, la República Federal de Alemania, Irlanda, Italia Luxemburgo, los Países Bajos, la Comunidad Europea de Energía Atómica y el Organismo en relación con el Tratado sobre la No proliferación de las Armas Nucleares*. Viena, OIEA. Disponible:

<<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1973b. *INFCIRC/197. Texto del acuerdo concertado entre México y el Organismo para la aplicación de salvaguardias en relación con el Tratado para la Proscripción de las Armas Nucleares en la América Latina y con el Tratado sobre la No Proliferación de las Armas Nucleares*. Viena, OIEA. Disponible:

<<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1972a. *INFCIRC/153. The Structure and Content of Agreements between the Agency and States required in connection with the Treaty on the Non-Proliferation of Nuclear Weapons*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1972b. *INFCIRC/158. The Text of a Safeguards Transfer Agreement relating to the bilateral Agreement between the Republic of China and the United States of America*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1971. *INFCIRC/154. The Text of the Safeguards Agreement relating to the bilateral Agreement between India and the United States of America*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1970. *INFCIRC/140. Tratado sobre la No Proliferación de las Armas Nucleares*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1968. *INFCIRC/66/Rev.2. Sistema de salvaguardias del Organismo (1965, ampliado provisionalmente en 1966 y 1968)*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1967. *INFCIRC/118. Texto del acuerdo concertado entre el Organismo Internacional de Energía Atómica y México relativo a la aplicación de salvaguardias según el Tratado para la proscripción de las Armas Nucleares en la América Latina*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1965. *INFCIRC/72. The Text of a Safeguards Transfer Agreement relating to the bilateral Agreement between China and the United States of America*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1964. *INFCIRC/26/Add.1. The Agency's Safeguards*. Viena, OIEA. Disponible: <<http://www.iaea.org/Publications/Documents>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 1961. *INFCIRC/26. The Agency's Safeguards*. Viena, OIEA.

OPANAL (Organismo para la proscripción de las armas nucleares en la América Latina y el Caribe). 1967. *Tratado para la Prohibición de las Armas Nucleares en la América Latina y el Caribe*. OPANAL. Disponible: <<http://www.opanal.org/TT/tt/tt-e.html>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

SENER (Secretaría de Energía). 2009a. *Estrategia Nacional de Energía*. México D.F., SENER. Disponible: <<http://www.energia.gob.mx>>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

———. 2009b. *Prospectiva del Sector Eléctrico 2009-2024*. México D.F., SENER. Disponible: <http://www.sener.gob.mx/webSener/res/PE_y_DT/pub/Prospectiva_electricidad%20_2009-2024.pdf>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

THE GENERATION IV INTERNATIONAL FORUM. 2002. *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*. Disponible: <http://gif.inel.gov/roadmap/pdfs/gen_iv_roadmap.pdf>. Fecha de acceso: 24/10/2010.

VÉLEZ OCÓN, Carlos. 1997. *Cincuenta años de energía nuclear en México 1945-1995. Programa Universitario de Energía*. México D.F., UNAM.

YOUNG, Donovan. 1993. *Modern Engineering Economy*. John Wiley & Sons, Inc.

Lista de sitios de web de empresas y organismos

ACR-1000 Advanced CANDU Reactor. AECL, Canadá. <http://www.aecl.ca/Reactors/ACR-1000.htm>

Agencia Brasileño-Argentina de Contabilidad y Materiales Nucleares (ABACC).
<http://www.abacc.org/espn/abacc/index.htm>

ASEA-Brown Boveri Group (ABB). <http://www.abb.com/>

Atomenergoexport (AEE). <http://www.atomenergoexport.com>

Atomic Energy of Canada, Ltd. (AECL). <http://www.aecl.ca>

Atomstroyexport. <http://www.atomstroyexport.com>

Baratiya Nabhibiya Vidyut Nigam, Ltd. (BHAVINI). <http://www.bhavini.nic.in>

Bhabha Atomic Research Centre (BARC). <http://www.barc.gov.in/>

Bruce Power. Ontario, Canadá. <http://www.brucepower.com>

Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC). <http://www.cnsccsn.gc.ca/eng/>

Centro Atómico Bariloche. <http://www.cab.cnea.gov.ar>

Centro Atómico Constituyentes. <http://www.cnea.gov.ar/cac>

Centro Atómico Ezeiza. <http://caebis.cnea.gov.ar>

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN). <http://www.cdtm.br/>

Centro Regional de Ciencias Nucleares do Centro-Oeste (CRCN-CO). <http://www.crcn-co.cnen.gov.br>

Centro Regional de Ciencias Nucleares (CRCN-NE). <http://www.crcn.gov.br>

China National Nuclear Corporation (CNNC).
<http://www.cnncc.com.cn/english/about/brief.htm>

China Nuclear International Uranium Corporation. SinoU. <http://sinouranium.cnncc.com.cn>

China's Nuclear Fuel Cycle. WNA. http://www.world-nuclear.org/info/inf63b_china_nuclearfuelcycle.html

CN Atucha II. NASA, Argentina. <http://www.na-sa.com.ar>

Comisión Federal de Electricidad (CFE), México. <http://www.cfe.gob.mx>

Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Argentina. <http://www.cnea.gov.ar>

Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS).
<http://www.cnsns.gob.mx>

Comissao Nacional de Energia Nuclear (CNEN). <http://www.cnen.gov.br>

Department of Atomic Energy (DAE). <http://www.dae.gov.in/>

Doosan Heavy Industries & Construction (DHIC).
<http://www.doosanheavy.com/eng/index.asp>

Eletronuclear, S. A. Eletronuclear.

<http://www.eletronuclear.gov.br/español/inicio/index.php>

Escuela Superior de Física y Matemáticas (IPN). <http://www.esfm.ipn.mx>

Facultad de Ingeniería (UNAM).

<http://www.fib.unam.mx/SistemasEnergeticos/PosgradoEnEnergia.aspx>

General Electric.

http://www.gepower.com/prod_serv/products/nuclear_energy/en/index.htm

Heavy Water Board (HWB). <http://www.heavywaterboard.org>

Indira Gandhi Centre for Atomic Research (IGCAR). <http://www.igcar.gov.in/>

Industrias Nucleares do Brasil (INB).

http://www.inb.gov.br/inb_eng/WebForms/default.aspx

Institute of Nuclear Power Operations (INPO). <http://www.inpo.info>

Instituto de Engenharia Nuclear (IEN). www.ien.gov.br

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN). <http://www.ipen.br/sitio/>

Instituto de Radioprotecao e Dosimetria (IRD). <http://www.ird.gov.br>

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ). <http://www.inin.mx>

Korea Power Engineering Company (KOPEC). <http://www.kopec.co.kr/eng/main.asp>

Kraftwerk Union/Siemens AG (KWU). <http://www.siemens.com>

Laboratorio de Pocos de Caldas (LAPOC). <http://www.cnen.gov.br/lapoc/Default.asp>

Natural gas. US Energy Information Administration.

http://www.eia.doe.gov/oil_gas/natural_gas/info_glance/natural_gas.html

Nuclear Fuel Complex Hyderabad (NFCH). <http://www.nfc.gov.in/default.htm>

Nuclear Power Corporation of India, Ltd. (NPCIL). <http://www.npcil.in/>

Nuclear Power in Brazil. WNA. <http://www.world-nuclear.org/info/inf95.html>

Nuclear Power in China. WNA. <http://www.world-nuclear.org/info/inf63.htm>

Nuclear Power in India. WNA. <http://www.world-nuclear.org/info/inf53.html>

Nuclebrás Equipamentos Pesados, S. A. (Nuclep). <http://www.nuclep.gov.br>

Olkiluoto 3, 1.600 MW Nuclear Power Plant. <http://www.power-technology.com/projects/Olkiluoto>

Siemens AG. <http://www.siemens.com>

Tekhsnabexport (Tenex). <http://www.tenex.ru/en/>

The European Atomic Energy Community (EURATOM).

<http://ec.europa.eu/energy/nuclear/euratom>

United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC). <http://www.nrc.gov>

Unites States Department of Energy (USDOE).

<http://www.energy.gov/energysources/nuclear.htm>

Uranium Corporation of India, Ltd. (UCIL). <http://www.ucil.gov.in/web/index.asp>

WANO Performance Indicator Tri-fold report (WANO). <http://www.wano.org.uk>

Westinghouse. <http://www.westinghousenuclear.com>