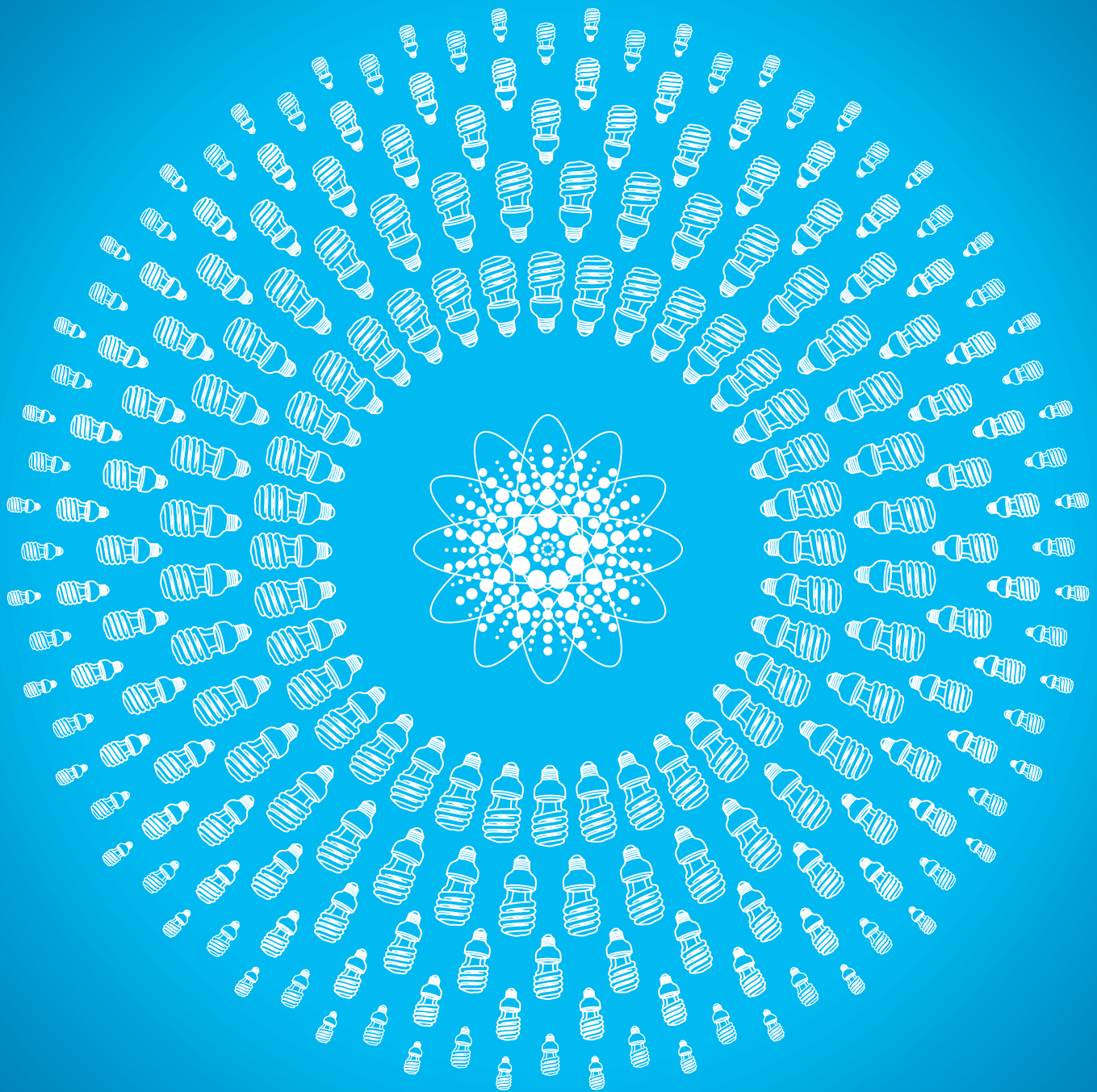


LA NUCLEOELECTRICIDAD

UNA OPORTUNIDAD PARA MÉXICO



Academia de Ingeniería de México



La Academia de Ingeniería de México

Presenta:

La nucleoelectricidad una oportunidad para México

Resumen Ejecutivo

Autores

Rafael Fernández de la Garza
César F. García
Saúl Trejo Reyes
Tiburcio Zazueta Ramos
Miguel Ángel Castañeda Galván
Héctor Jacobo Cruz Báez
Juan José Mercado Vargas

México, D. F., México, Octubre 2009

Nota

La información así como las opiniones y propuestas vertidas en esta publicación son responsabilidad exclusiva de los autores

Academia de Ingeniería de México

Consejo Directivo (2008-2010)

Presidente	Dr. Octavio Agustín Rascón Chávez
Vicepresidente	Ing. José Antonio Ceballos Soberanis
Secretario	Ing. José Luis Antón Macín
Prosecretario	Dr. Jesús Arnoldo Bautista Corral
Tesorera	Ing. Ma. Del Carmen Padilla Longoria
Protesorero	Ing. Rubén Barocio Ramírez

Comité Editorial (2008-2010)

Presidente	Dr. Oscar M. Gonzáles Cuevas
Secretario	Ing. José Luis Antón Macín
Vocales	Dra. Cecilia Martín del Campo Márquez
	Ing. Salvador Vélez García
	Dr. Felipe Rolando Menchaca García
	Ing. Alejandro Vázquez Vera

Diseño de Portada: Enrique Patiño Madrigal

PREFACIO

La **Academia de Ingeniería de México** tiene la función de impulsar la formación y el desarrollo de ingenieros de alto nivel, con gran sentido ético y comprometidos con la sociedad; asimismo, propicia el ejercicio profesional de excelencia, la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación adecuados para mejorar de manera sustentable la competitividad internacional de México e incrementar su mercado interno.

La Academia de Ingeniería de México colabora con los Centros de Investigación, para lograr una mejor vinculación de éstos con los sectores productivos y gubernamentales, con el fin de que puedan incidir con más eficiencia y efectividad en la generación de conocimientos, métodos, tecnologías e innovaciones útiles, que tiendan a crear empleos y riqueza, así como a reducir la dependencia del extranjero y los gastos por transferencia de tecnologías.

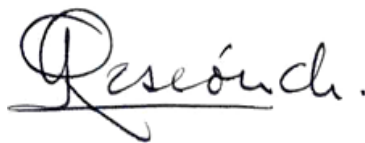
También colabora con las universidades y los tecnológicos para mejorar la calidad y pertinencia de la educación en Ingeniería, aportando ideas sobre los programas de licenciatura, posgrado y actualización profesional, a fin de elevar las condiciones de competencia de los ingenieros a niveles de clase mundial; como parte de su labor, explora mecanismos conducentes a fomentar la creatividad de los estudiantes para estimular su capacidad de innovar.

Para cumplir sus objetivos, la Academia de Ingeniería realiza estudios que coadyuvan a resolver los grandes problemas nacionales en que participan las diferentes ramas de la ingeniería, difunde los resultados y promueve su análisis y aplicación; como parte de esto, fomenta el desarrollo y la incorporación de nuevas concepciones, tecnologías y conocimientos adecuados para México. También promueve la realización de los proyectos de infraestructura, con los cuales se impulsen el desarrollo humano y la industria nacional.

El tema de la energía que se aborda en este documento es, sin lugar a dudas, uno de los grandes temas nacionales y globales, ya que ésta es de vital importancia para el desarrollo de los países. El crecimiento económico de México será posible si la demanda de energía que ello conlleva, es satisfecha de una manera técnicamente confiable y segura, económicamente viable y ambientalmente responsable. La energía nuclear es hoy en día una tecnología madura que satisface estos requisitos, por lo cual es utilizada en muchos países, y cuya implementación a mediano y largo plazos en México puede ser un detonador del crecimiento industrial del país.

La exitosa experiencia operativa de la planta nuclear de Laguna Verde, apoyada por los ingenieros mexicanos, es un elemento más que demuestra la factibilidad de la utilización segura de la energía nuclear en México. Por lo tanto, es importante analizar los aspectos técnicos, financieros, ambientales y sociales involucrados en la instalación de nuevas nucleoelectricas en México, con el fin de tomar las mejores decisiones en la planeación energética de México.

El documento que aquí se presenta ofrece este análisis de una manera profesional, objetiva y precisa, y abre un panorama realista de la necesaria participación futura de la energía nuclear en el sistema eléctrico mexicano, y de las oportunidades de desarrollo económico y social que se desprenden; asimismo, es el resultado de una excelente labor realizada por un equipo de miembros de la Academia de Ingeniería de México de la Comisión de Especialidad de Ingeniería Nuclear, a quienes se les reconoce y agradece su trabajo. También se aprecian los apoyos otorgados por la Comisión Federal de Electricidad y por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.



Dr. Octavio A. Rascón Chávez
Presidente de la Academia de Ingeniería de México
Noviembre de 2009

PRESENTACIÓN

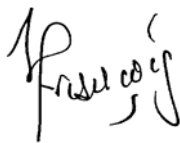
El de la energía es, sin lugar a dudas, uno de los temas de vital importancia para el desarrollo de la humanidad. El grado de avance de una sociedad está estrechamente ligado al consumo de energía en general, y a la electricidad en particular. La industria, el transporte, el comercio, el sector residencial, en fin, toda la actividad humana requiere de energía. Actualmente, la mayor parte de la energía eléctrica, térmica y motriz que se consume a nivel mundial se genera quemando combustibles fósiles: carbón, gas natural y petróleo. El resultado del uso dominante de estos combustibles ha traído como consecuencia el incremento desmedido de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), y con ello un aumento de la temperatura de la atmósfera; hecho que está afectando el clima de la Tierra. Las proyecciones de emisiones de GEI pueden cambiar dependiendo de las políticas energéticas y leyes que se apliquen. Es, por lo tanto, imperante, definir un plan energético nacional, el cual debe prever, por un lado, la intensificación de las medidas de ahorro y de uso eficiente de la energía, y por otro lado, promover la reducción de la dependencia de los hidrocarburos buscando la participación de fuentes alternas como la solar, la biomasa, la hidráulica, la geotermia, la eólica y la nuclear en la proporción más adecuada para obtener un desarrollo sustentable, y es aquí en donde la energía nuclear tiene un papel fundamental.

Entre las distintas fuentes de energía primaria disponibles en la actualidad, la energía nuclear representa una de las opciones que permite producir energía en condiciones ambientalmente satisfactorias. De hecho, si se considera únicamente la etapa de generación eléctrica, la emisión de gases de efecto invernadero es nula. Tomando en cuenta toda su cadena energética, es decir, considerando no sólo la etapa de generación eléctrica, sino también las etapas asociadas al ciclo de combustible, la energía nuclear tiene una emisión muy baja de GEI. Además, en un aspecto mucho más amplio de evaluación de costos externos asociados a daños ambientales y a la salud, la energía nuclear se posiciona dentro de las mejores alternativas de generación eléctrica.

La seguridad en el suministro y la diversificación del portafolio energético deben ser una parte importante de la política del sector. Algunas fuentes de energía se encuentran en un estado de madurez mayor que otras y pueden tener una participación primordial en reducir la dependencia de los hidrocarburos. En particular, la energía nuclear es una fuente de alta densidad energética, tecnológicamente madura, con altos factores de disponibilidad, y con combustibles abundantes que han tenido relativamente baja volatilidad de precios. Además, es importante mencionarlo, en México, la energía nuclear ha demostrado un magnífico desempeño, mediante la operación de las unidades 1 y 2 de la Central Nuclear de Laguna Verde, desde 1990 y 1995 respectivamente.

Hoy en día es impostergable, para el sistema eléctrico nacional, planear la incorporación de nuevas unidades nucleoelectricas, con el objetivo de tener un parque de generación más diversificado, lo cual reduciría la actual dependencia de los combustibles fósiles y el riesgo asociado a su volatilidad de precios o a la falta de suministro, además de que se producirían cantidades significativas de electricidad con los costos de producción de los más bajos de la Comisión Federal de Electricidad, y con la consecuente reducción de gases de efecto invernadero.

La Academia de Ingeniería de México tiene el agrado de presentar este estudio, elaborado por destacados ingenieros mexicanos, que analiza, de manera detallada, los aspectos técnicos, financieros, ambientales y sociales a considerar para la incorporación de una nueva planta nucleoelectrica al Sistema Interconectado Nacional. Seguramente, que al término de la lectura y del análisis cuidadoso de este documento, el lector contará con información objetiva, amplia y bien documentada para poder formar su propia opinión acerca de la conclusión de los autores: "la energía nuclear merece ser incluida en el portafolio de tecnologías de generación en los años por venir".



Juan Luis François Lacouture

Presidente de la Comisión de Especialidad de Ingeniería Nuclear

RESUMEN EJECUTIVO

PANORAMA GLOBAL

A nivel mundial, se vive un resurgimiento de la nucleoelectricidad. Los principales motivos son dos. Primero, la seguridad inherente a los diseños avanzados y las técnicas constructivas resultantes en tiempos de construcción cortos han avanzado considerablemente en la última década. Segundo, la estabilidad y nivel de los costos de producción de la nucleoelectricidad han mejorado consistentemente. El costo de producción en EUA en 2008 fue 18.7 USD/MWh. En una unidad nuclear, el uranio representa del orden del 9% del costo de producción, mientras que en unidades con base a gas y carbón representa el 93% y 80%, con un alto grado de volatilidad y enfrentando una tendencia de largo plazo a un incremento real, como todos los hidrocarburos. La nucleoelectricidad no contribuye al calentamiento global, ni a la contaminación atmosférica; es una forma limpia de energía.

La experiencia operacional específica de la nucleoelectricidad en México ha sido sujeta de reconocimientos nacionales e internacionales. Las unidades 1 y 2 de Laguna Verde iniciaron su operación comercial en julio de 1990 y abril de 1995, respectivamente. Estas unidades operan de acuerdo a parámetros operativos internacionales establecidos por la Asociación Mundial de Operadores Nucleares (WANO). Hasta el tercer trimestre del 2008 el Índice General de WANO para Laguna Verde arrojaba un mejor resultado que la media de las unidades nucleoelectricas que reportan al Centro de WANO en Atlanta, EUA.

Actualmente operan en el mundo 436 unidades nucleoelectricas, mientras que 47 unidades nuevas están en proceso de ser construidas en 14 países. La Agencia de Energía Nuclear de la OCDE proyecta en un escenario alto un incremento en la capacidad nuclear de 1 000 GWe para el año 2050, y para un escenario bajo un incremento de 200 GWe. Aún cumpliendo las proyecciones de construcción de nuevas unidades nucleoelectricas, la participación de éstas en la generación de electricidad representa tan solo una pequeña parte del total. La demanda adicional deberá ser cubierta mediante otras tecnologías, satisfaciendo criterios tales como seguridad, diversidad energética, y protección al medio ambiente.

Las percepciones respecto a la nucleoelectricidad son fundamentales. Los resultados de la encuesta realizada en varios países del mundo, publicados por el World Nuclear News en marzo del 2009, indican que cada vez existe más apoyo a la energía nuclear por parte de la sociedad cuando existe información suficiente. Por supuesto, no se ignoran los problemas percibidos al respecto. Las tres preocupaciones principales de los encuestados que se opusieron al uso de la nucleoelectricidad, fueron la eliminación de desechos radioactivos, la seguridad y el desmantelamiento, mismos que son tratados en este Reporte.

El Reporte trata los temas motivo de preocupación del público en general relacionados con la nucleoelectricidad. Además aborda los aspectos inherentes a la mitigación de los gases de efecto invernadero, la competitividad de la nucleoelectricidad, su financiamiento y el impacto socioeconómico, con el propósito de proponer el inicio de los trabajos para contar con una nucleoelectrica nueva en operación a partir del año 2019.

SEGURIDAD, COMBUSTIBLE, DESECHOS RADIOACTIVOS Y DESMANTELAMIENTO

La energía nuclear ha sido la fuente más segura de generación de energía eléctrica. Adicionalmente las unidades nucleoelectricas son resguardadas mediante un sistema de Seguridad Física centrado en evitar el uso indebido de materiales nucleares u otros materiales radioactivos con el objetivo de causar daño intencional. Para garantizar la No Proliferación de armas nucleares en el mundo, México ha suscrito numerosos acuerdos y tratados internacionales en materia de la No Proliferación.

La percepción de riesgo en las instalaciones nucleares es producto de la historia, pero también de la falta de información. La posibilidad de un accidente nuclear que ocasione fatalidades es entre 100 y 1000 veces menor que otras tecnologías. Acorde a las estadísticas, la nucleoelectricidad tiene índices de seguridad mejores que otras tecnologías; 8 muertes/TWañ, en comparación con 883 para la hidroelectricidad, 85 para el gas natural y 342 para el carbón.

Debe subrayarse que la administración del combustible nuclear es un tema resuelto técnicamente, inmerso en un proceso de innovación tecnológica. Existen dos tipos de ciclos de combustible: ciclo abierto y ciclo cerrado. En un ciclo abierto el combustible gastado no se reprocesa, es un desecho radiactivo. En contraste, en un ciclo cerrado se reprocesa el combustible, para recuperar el uranio remanente y el plutonio producido, separándolos de los desechos radiactivos de actividad alta que hay que almacenar de manera definitiva. En el combustible irradiado en un reactor para la generación de energía eléctrica el uranio remanente representa el 96%, el plutonio el 1% y los desechos radioactivos el 3%, razón por la cual el reprocesamiento reduce drásticamente el volumen de desechos radioactivos de actividad alta por almacenar.

El combustible irradiado se almacena inicialmente en albercas llenas de agua dentro de los edificios de la unidad nucleoelectrica y posteriormente se pueden confinar en contenedores resguardados a cielo abierto en el área protegida de la unidad. Este combustible se traslada posteriormente a un repositorio geológico para su disposición final, tal como el repositorio que se está habilitando en Forsmark, Suecia. A diferencia de lo anterior, en Francia por ejemplo, se reprocesa el combustible irradiado para utilizarlo nuevamente en reactores que operan comercialmente en Francia y otros países.

Actualmente el combustible irradiado resultante de la operación de Laguna Verde se almacena en albercas de agua ubicadas en la parte superior del edificio del reactor de cada unidad. Se prevé que para principios del año 2020 la alberca de combustible gastado de la Unidad 1 alcance la capacidad disponible de almacenamiento, por lo que se analizan opciones para la disposición de dicho combustible.

En cuanto a otros desechos radioactivos de actividad media y baja, la tecnología para el tratamiento de este tipo de desechos y su disposición definitiva está ampliamente demostrada y en uso en diversos países. El confinamiento definitivo es la etapa posterior a la aplicación de las técnicas de reducción de volumen de los desechos de actividad media y baja de Laguna Verde lo que resulta en que el volumen final de desechos radioactivos a disponer (tambores blindados producto de la reducción de volumen, y desechos inmovilizados con concreto o asfalto en tambores) se ha reducido considerablemente.

En lo que se refiere al Desmantelamiento, a finales de 2005 el Organismo Internacional de Energía Atómica informó que ocho unidades nucleoelectricas han sido completamente descontaminadas y desmanteladas, con sus terrenos liberados sin

restricciones para otros usos. Otras 17 han sido parcialmente desmanteladas y cerradas con seguridad, 31 están siendo desmanteladas para su liberación posterior y 30 fueron sometidas a un mínimo desmantelamiento para entrega del recinto a largo plazo. Se estima por cada unidad nucleoelectrica un costo de desmantelamiento entre 300 y 500 millones de dólares, capital que es obtenido de los ingresos generados durante la operación de la unidad. Este monto incluye costos estimados para cumplir con normas radiológicas, manejo de combustible gastado y actividades para restauración del sitio. Laguna Verde, al igual que el resto de las Centrales Nucleares, al final de su vida útil tendrá que ser desmantelada siguiendo uno de los métodos que han sido utilizados para este propósito en otros países.

OPCIONES Y CONSIDERACIONES TECNOLÓGICAS

El resurgimiento de la nucleoelectricidad trae consigo retos nuevos; se requiere la fabricación de vasijas para los nuevos reactores. La mayor capacidad de forja actualmente en operación se encuentra en Japón (Japan Steel Works), China (China First Heavy Industries) y Rusia (OMX Izhora). Se está instalando capacidad adicional en Japón (JSW), Corea del Sur (Doosan), Francia (Le Creusot) y se planea también en el Reino Unido (Sheffield Forgemasters) y la India (Larsen & Toubro) con el propósito de satisfacer la demanda esperada de manufactura de equipos pesados nucleares.

Para resolver el problema de licenciamiento y control de costos que enfrentaron los proyectos nucleoelectricos en el pasado, la Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos (NRC) ha modificado sus procedimientos; ahora garantiza al licenciatario que una vez terminada la construcción, la unidad podrá operar. Los asuntos de seguridad y diseño se resuelven antes de iniciar la construcción. Partiendo de un emplazamiento conocido como Laguna Verde y exigiendo que todos los Licitantes ofrezcan diseños certificados, México puede seguir un proceso de licenciamiento simplificado para una nucleoelectrica nueva.

La experiencia reciente de reactores avanzados puestos en operación en Asia, muestra que un factor clave de éxito es el tiempo de construcción, tan corto como 38 meses en Japón, aplicando exitosamente técnicas avanzadas para la ingeniería y construcción. Para la construcción de una nueva unidad nucleoelectrica en México, se debe considerar un tiempo más largo, del orden de cinco años, para tomar en cuenta la curva de aprendizaje en las nuevas técnicas.

En el mundo actual, otras consideraciones han resultado en esfuerzos y presiones justificadas a nivel internacional para forzar la adopción de tecnologías limpias para sustituir las tecnologías de generación contaminantes. Actualmente todas las tecnologías de generación eléctrica causan algún impacto ambiental; la generación basada en combustibles fósiles, como las termoeléctricas convencionales, las carboeléctricas y los ciclos combinados son fuentes importantes de emisiones atmosféricas que pueden afectar la calidad del aire en el área local, regional o global. En cambio, la nucleoelectricidad tiene impactos ambientales comparables a las fuentes renovables, los cuales son significativamente menores que las tecnologías convencionales.

Laguna Verde ha realizado evaluaciones y monitoreo ambientales en su zona de influencia, desde su etapa preoperacional (1980-88) hasta la fecha. Los niveles de radiación se han mantenido dentro de las variaciones naturales, debajo de los límites normativos; no se han detectado cambios significativos o peligro para los ecosistemas aledaños ni para los habitantes de la región circunvecina. De igual manera, los análisis sobre la productividad marina, los parámetros fisicoquímicos, y las comunidades de

fitoplancton (las plantas más pequeñas en el medio acuático) y zooplancton (los animales más pequeños de la cadena alimenticia en el medio acuático) en la zona de descarga, muestran sólo variaciones naturales a lo largo de 24 años. Ello indica que el impacto de la descarga del agua de enfriamiento es menor que el calculado por los modelos de difusión de la pluma térmica.

Por otra parte, el problema de los gases de efecto invernadero es global y no tiene fronteras, razón por la cual se han preparado diversas propuestas de mitigación a nivel global, regional y nacional. En el caso mexicano la propuesta está basada en complementar las energías renovables de manera significativa mediante nucleoelectricas, o bien carboelectricas o ciclos combinados con gasificación integrada, siempre y cuando integren captura y secuestro de carbono.

La incorporación de captura y secuestro de carbono en unidades de generación basadas en combustibles fósiles reduce las emisiones de gases de efecto invernadero en un 90%, pero incrementa los costos de manera significativa por la inclusión de instalaciones adicionales, la pérdida de eficiencia y el incremento en la energía necesaria para servicios propios. Si se considera un precio de 25 USD/ton CO₂ emitida, el costo de la electricidad con base a gas aumentaría 13% y con base a carbón 26%. Por lo anterior, es importante que al momento de comparar los costos de generar electricidad con diversas tecnologías, se consideren estos costos para que la comparación sea equitativa.

Los reactores a considerar para unidades nucleoelectricas nuevas en México serían los de Generación III+ desarrollados recientemente y con características más avanzadas. Sólo un número reducido de reactores Generación III/III+ han sido construidos y ya están en funcionamiento. Se espera que estos sean la piedra angular de la energía nuclear para la producción de electricidad en los próximos 50 años.

Las grandes empresas que han desarrollado los diseños nuevos, se han asociado para competir en el mercado mundial comercializando reactores nucleares con tecnologías innovadoras, como es el caso de los proveedores de reactores de agua ligera AREVA NP, General Electric (GE) Energy y Westinghouse, asociados básicamente con las compañías japonesas Hitachi, Toshiba y Mitsubishi.

En principio se considerarían reactores de agua ligera con diseños certificados en EUA, por la familiaridad que tiene el sector eléctrico en México con este tipo de reactores y con las normas, estándares y prácticas de ingeniería y construcción americanas. Estos reactores son:

- Reactor de Agua Hirviente (ABWR), Hitachi/General Electric
- Reactor de Agua Hirviente (ABWR), Toshiba
- Reactor Presurizado Europeo (EPR), AREVA
- Reactor de Agua Presurizada Avanzado (APWR), Mitsubishi
- Reactor de Agua Presurizada Avanzado (AP1000), Westinghouse/Toshiba
- Reactor Simplificado de Agua Hirviente (ESBWR), General Electric.

DEMANDA, COSTOS Y FINANCIAMIENTO

En México, se estima que la generación eléctrica deberá incrementarse en 42% del 2007 al 2018. El POISE 2009, atendiendo a una estrategia de diversificación de las fuentes de generación, indica que: *“En los últimos años el avance de la tecnología nuclear ha permitido un incremento importante en la seguridad de su operación, sin embargo sus costos nivelados de generación aún son altos, por lo que su utilización se prevé en el largo plazo. Tiene el atractivo de reducir la emisión de gases de efecto invernadero, lo que las hace competitivas en escenarios con restricciones en el suministro y altos precios del gas natural”*. Dichos señalamientos del POISE deben ser validados debido a que la nucleoelectricidad resulta más barata que otras tecnologías de generación limpias de carga base y a que el costo de generación nuclear es prácticamente insensible a cambios en el precio del uranio, lo cual no sucede en el caso del gas natural, como se expone en secciones posteriores de este Reporte.

Entre otros criterios, la selección de una tecnología versus otras tecnologías está basada en el costo de inversión y en el costo nivelado de generación de la energía eléctrica. Al respecto es muy importante homologar los supuestos para que estos costos sean comparables. Así por ejemplo, el costo instantáneo (overnight cost) puede o no considerar intereses durante la construcción y escalación. De manera similar, el costo del proyecto se puede expresar considerando además costos de financiamiento o ninguno de los factores mencionados.

Con base en consultas recientes a empresas de ingeniería y tecnólogos internacionales involucrados en los diseños nuevos de unidades nucleoelectricas, un valor razonable del costo instantáneo de inversión de una unidad nucleoelectrica avanzada de 1400 MWe en USD 2009 es de 4,390 Millones USD. Este estimado incluye los equipos, materiales, mano de obra, ingeniería de diseño, administración de la construcción, ingeniería de soporte a construcción, servicios de arranque de la unidad, ingeniería para preparación del sitio, determinación de parámetros específicos del sitio, licitación del proyecto, manifiesto de impacto ambiental, preparación de documentos de licencia y supervisión de CFE de las actividades de contratistas. En suma, se incluyen todos los costos de administración, ingeniería y construcción, pero no los intereses durante la construcción. La inversión requiere de flujo de efectivo durante los 9 años de duración del proyecto, 5 de los cuales corresponden al período de construcción.

Con este costo instantáneo y su flujo de efectivo correspondiente y adoptando los procedimientos del documento Costos y Parámetros de Referencia (COPAR) de CFE se calculó el costo nivelado de generación nuclear, considerando además fondos nucleares para manejo de combustible irradiado, administración de desechos radioactivos de actividad media y baja y desmantelamiento. Para las otras tecnologías se consideraron los costos del COPAR 2008 y se adicionaron los costos de emisiones (25 USD/ton CO₂) resultando en lo siguiente:

**Costo Nivelado de Generación sin Costo de Emisiones y
sin Fondos de Reserva Nuclear**

Conceptos	CC	CC + CCS	IGCC	IGCC + CCS	SCPC	SCPC + CCS	Nuclear
Costo Nivelado de Generación (USD/MWh)	74.68	103.13	93.78	144.70	76.26	150.23	89.86

**Costo Nivelado de Generación sin Costo de Emisiones y
con Fondos de Reserva Nuclear**

Conceptos	CC	CC + CCS	IGCC	IGCC + CCS	SCPC	SCPC + CCS	Nuclear
Costo Nivelado de Generación (USD/MWh)	74.68	103.13	93.78	144.70	76.26	150.23	95.54

**Costo Nivelado de Generación con Costo de Emisiones y
sin Fondos de Reserva Nuclear**

Conceptos	CC	CC + CCS	IGCC	IGCC + CCS	SCPC	SCPC + CCS	Nuclear
Costo Nivelado de Generación (USD/MWh)	84.34	104.38	112.71	147.53	96.02	153.13	89.86

**Costo Nivelado de Generación con Costo de Emisiones y
con Fondos de Reserva Nuclear**

Conceptos	CC	CC + CCS	IGCC	IGCC + CCS	SCPC	SCPC + CCS	Nuclear
Costo Nivelado de Generación (USD/MWh)	84.34	104.38	112.71	147.53	96.02	153.13	95.54

CCS: Captura y secuestro de carbono; CC Ciclo Combinado; IGCC: Ciclo Combinado con Gasificación Integrada; SCPCs: Supercrítica con Carbón Pulverizado.

De los valores anteriores con un precio del gas natural importado de 8.34 USD/MMBTU se concluye que la nucleoelectricidad proporciona la energía eléctrica limpia de carga base al menor costo, excepto el ciclo combinado que solo resulta más económico si no se considera la captura y almacenamiento de carbón.

No solo es necesario contar con una estimación equitativa de costos sino concebir opciones financieras viables para financiar proyectos nucleoelectricos nuevos, debido a que los cambios en el contexto financiero internacional obligan a buscar nuevas soluciones para satisfacer la demanda de electricidad. Por la magnitud de la inversión, el financiamiento de una nueva unidad nucleoelectrica debe plantearse en el contexto de las políticas económicas nacionales. Se propone considerar varios principios: el componente nacional debe financiarse en pesos, de manera que se disminuya el riesgo cambiario, y a fin de utilizar las líneas de crédito disponibles para contratistas y proveedores a través de instituciones como BANOBRAS; debe buscarse el máximo aprovechamiento de las líneas de crédito disponibles a través de las instituciones de apoyo a las exportaciones en los países de origen de los componentes, equipo e ingeniería que se deberán adquirir en el exterior; deben plantearse las distintas etapas en la realización de un proyecto de este tipo de manera que se minimice el riesgo financiero en todo momento, al mismo tiempo, debe examinarse la conveniencia de aprovechar el mayor impulso posible a la economía nacional a partir de este proyecto; deben aprovecharse las experiencias internacionales en la búsqueda de los mejores esquemas de financiamiento.

Una opción viable de financiamiento para una unidad nucleoelectrica nueva podría realizarse bajo los supuestos siguientes: costo instantáneo de 4,390 Millones USD, estructura deuda/capital de 80/20; plazo de pago de aportaciones anuales a capital de 9 años, a razón de 97.6 Millones USD por año; plazo de amortización de la deuda de 20 años; tasa de interés promedio de 7.5% anual. También se supone el pago de intereses durante la construcción y amortización de capital constante. Bajo un esquema de este tipo se tiene una tasa interna de retorno (TIR) de 11.9% para la nucleoelectrica.

Para propósitos de comparación se puede aplicar el mismo esquema para un ciclo combinado de la misma capacidad, con las diferencias siguientes: costo instantáneo de 1,177 Millones USD; plazo de pago de aportaciones anuales a capital de 3 años, a razón de 78.5 Millones USD por año. La TIR para este ciclo combinado es 31%.

Sin embargo, al analizar los esquemas con mayor profundidad se concluye que el ciclo combinado es una opción más favorable que la nuclear siempre que no existan cambios en el costo de combustible. Como es de esperarse la TIR en una unidad nucleoelectrica es prácticamente insensible al incremento en el costo del combustible nuclear, pero un incremento de 20.3% en el costo del combustible iguala la TIR de ambas opciones. Adicionalmente, un incremento en el precio del gas natural de 30 % para el ciclo combinado resulta en una TIR de cero para esta tecnología. Lo anterior hace evidente la sensibilidad tan alta de los ciclos combinados a la volatilidad en los precios del gas, aún sin considerar variaciones en el tipo de cambio peso-dólar, volatilidad que es inexistente en el caso de la nucleoelectricidad y que asegura un flujo de efectivo estable y positivo durante la operación de la misma, lo que resulta en el riesgo financiero más bajo de todas las opciones, una vez que se ha iniciado su operación comercial.

La inversión requerida para una nueva nucleoelectrica es un detonador potencial de gran importancia para la actividad económica no sólo por el gasto directo que implica, sino adicionalmente por los efectos indirectos de la demanda por bienes y servicios nacionales sobre la producción de otros sectores y empresas proveedoras pueden ser muy elevados, dada la composición del gasto. Estos efectos indirectos dependen en un alto grado de la estructura de la actividad económica, así como de las acciones gubernamentales.

En estas circunstancias y para este tipo de inversiones, no es opción simplemente recurrir a las importaciones de equipos industriales, o servicios de ingeniería y construcción; esto sería mucho más costoso y generaría beneficios nacionales considerablemente menores. Dado el carácter especializado la industria nucleoelectrica y dado el bajo ritmo de construcción nuclear en los últimos 25 años a nivel internacional, tampoco existe capacidad de ingeniería, manufactura y construcción suficiente en los países desarrollados.

OPORTUNIDADES NACIONALES Y REGIONALES

Los efectos de la construcción nuclear sobre el desarrollo nacional son de enorme importancia potencial. Se considera que de una erogación inicial para una unidad nucleoelectrica de 4,390 Millones USD, 2,520 Millones USD pueden ser gasto nacional. La diferencia, 1,870 Millones USD, probablemente debe importarse.

La producción de una unidad de valor genera requerimientos *directos e indirectos* por 1.74 unidades de valor. El gasto por 2,520 Millones USD, genera requerimientos de insumos y componentes por un total de 4,173 Millones USD en la economía

nacional, o sea un factor de 1.66 veces. Dada la magnitud de este factor multiplicador, es de la mayor importancia definir un conjunto de acciones que aseguren los máximos efectos sobre la producción nacional.

El estado de Veracruz tiene enormes riquezas naturales. Sin embargo, su nivel de desarrollo lo ubica considerablemente por debajo de la media nacional. Tiene sectores desarrollados, en la producción de petróleo y energía eléctrica. Sin embargo, no tiene una infraestructura industrial que le permita aprovechar plenamente los impulsos derivados de la producción de estos sectores. De tal manera, en términos económicos estos sectores tienen características de “enclaves”. Es decir, obtienen un elevado porcentaje de sus insumos, componentes y servicios de alto nivel fuera de la entidad, cuando no en el extranjero. Y la mayor parte de la producción igualmente va hacia fuera de la entidad. Los encadenamientos productivos con el resto de la entidad son limitados, sobre todo en términos de empleo productivo. Ello genera problemas importantes que es necesario enfocar directamente. En el contexto social del país, es necesario desarrollar políticas públicas para transformar la percepción de que Laguna Verde no genera beneficios para la región donde se ubica. Ello coadyuvaría a evitar problemas al iniciar trabajos para una unidad nucleoelectrónica nueva en la zona.

En resumen:

- La energía nuclear utilizada para la generación de energía eléctrica ha sido históricamente más segura que cualquier otra tecnología de generación de carga base;
- Sus desechos radioactivos han sido tratados y confinados con soluciones tecnológicas disponibles y aceptadas en esta industria;
- La nucleoelectricidad es benigna con el medio ambiente y con la salud del público en general, como lo son las fuentes renovables de energía;
- La CFE ha administrado exitosamente la nucleoelectricidad por más de 18 años en Laguna Verde, logrando niveles de desempeño superiores a la media de la Asociación Mundial de Operadores Nucleares;
- Las unidades nucleoelectrónicas nuevas, mediante el uso de tecnología de punta, resultan en costos nivelados de generación competitivos o inferiores que otras tecnologías de generación;
- La generación eléctrica por medios nucleares no es sensible a las oscilaciones en los precios de combustibles;
- La energía nuclear proporciona seguridad en el abasto de combustible y por tanto en la generación de electricidad;
- La nucleoelectricidad puede ser utilizada como motor de desarrollo industrial y de recursos humanos de alto nivel;
- La construcción de una nueva unidad, representa beneficios considerables en la economía regional y nacional por el efecto multiplicador que resulta;
- La opinión pública a nivel internacional es cada vez más favorable a la nucleoelectricidad.

¿Merece entonces ser incluida en el portafolio de tecnologías de generación limpias?