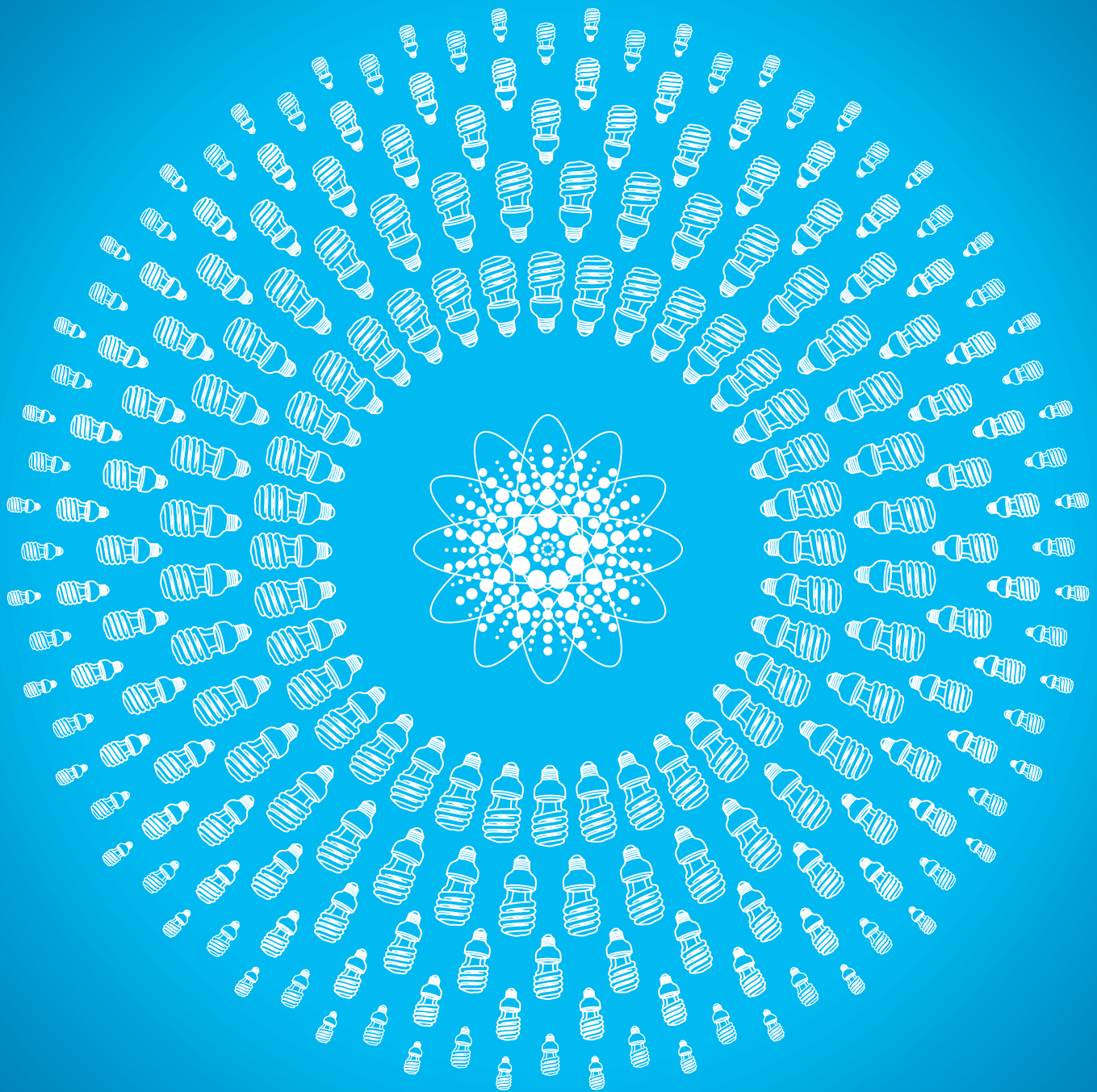


LA NUCLEOELECTRICIDAD

UNA OPORTUNIDAD PARA MÉXICO



Academia de Ingeniería de México



La Academia de Ingeniería de México

Presenta:

**La nucleoelectricidad
una oportunidad para México**

Reporte Corto

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.

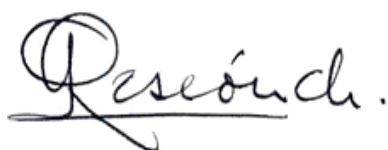
Para cumplir sus objetivos, la Academia de Ingeniería realiza estudios que coadyuvan a resolver los grandes problemas nacionales en que participan las diferentes ramas de la ingeniería, difunde los resultados y promueve su análisis y aplicación; como parte de esto, fomenta el desarrollo y la incorporación 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.

A handwritten signature in black ink, reading "Rascón Ch." with a stylized flourish at the end.

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.

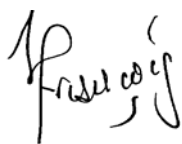
Entre las distintas fuentes de energía primaria disponibles en la actualidad, la energía nuclear representa una de las opciones que permite producir energía en condiciones ambientalmente satisfactorias. De hecho, si se considera únicamente la etapa de generación eléctrica, la emisión de gases de efecto 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

Rafael Fernández de la Garza

Ingeniero Mecánico Electricista egresado de la Universidad Nacional Autónoma de México, con especialidad en Diseño de Plantas Generadoras por la Universidad de California en los Ángeles, USA. Durante sus 39 años de experiencia profesional ha trabajado en el diseño de plantas generadoras geotérmicas de combustóleo, gas, carbón y centrales nucleoelectricas, así como en áreas relacionadas con Seguridad Industrial y Protección Ambiental.

Dentro de éstas, destaca su participación, de 1980 a 1996, como responsable del diseño, construcción, puesta en marcha y operación de las dos Unidades de Laguna Verde, la primera Central Nucleoelectrica en México.

En 1994 - 1995 fue Chairman del International Participant Advisory Committee del Institute for Nuclear Operations (INPO) y Gobernador del Consejo de Gobierno de la World Association for Nuclear Operators (WANO). Durante su carrera ha sido distinguido con varios premios a la excelencia en la Ingeniería además de pertenecer a diversas asociaciones profesionales. Es miembro y académico de número de la Academia Mexicana de Ingeniería.

De 1997 al 2004 funge como Director Corporativo de Seguridad Industrial y Protección Ambiental en Petróleos Mexicanos.

En el 2004 es designado, nuevamente, Gerente de Centrales Nucleoelectricas de la Comisión Federal de Electricidad, función que desempeña hasta la fecha.

César F. García

Ingeniero Mecánico Electricista egresado del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, con Postgrados en Ingeniería Mecánica, Ingeniería Nuclear, Administración de Empresas y Finanzas e Impuestos Internacionales de varias universidades norteamericanas y nacionales. Trabajó durante 27 años en Comisión Federal de Electricidad iniciando con la ingeniería de proyectos termoeléctricos, posteriormente participó en la ingeniería del Proyecto Laguna Verde de 1975 a 1980 con las empresas Burns & Roe y Ebasco Services en Nueva York, fungió como Jefe de Ingeniería en Laguna Verde de 1985 hasta 1995, cuando se le designó como responsable de dirigir a CFE Internacional.

A partir de 1998 colaboró en Petróleos Mexicanos como asesor del Director Corporativo de Seguridad industrial y Protección Ambiental, desarrollando, implantando y validando Sistemas de Información relacionados con Seguridad Industrial, Protección Ambiental y Calidad que fueron implantados en el Corporativo y sus cuatro Subsidiarias.

En 2006 inició actividades como Consultor Independiente en Energía y Medio Ambiente, habiendo realizado estudios y proyectos relacionados con el sector eléctrico nacional.

Ha publicado diversos artículos tanto en México como en el extranjero y ha sido distinguido con reconocimientos académicos y profesionales. Es miembro y académico de número de la Academia de Ingeniería desde 1990.

Saúl Trejo Reyes

Doctorado en economía por la Universidad de Yale. Ha sido profesor en la UNAM y el Colegio de México. Ha sido economista del Banco de México, asesor del Presidente de la República, Director General interino de CONASUPO y Director General del Banco Nacional de Comercio Interior, entre otros encargos. Es Director General de Grupo Acex, S. A., empresa de consultoría económica y desarrollo de vivienda.

Autor de varios libros: *Industrialización y Empleo en México*, (FCE, 1973), *El Futuro de la Política Industrial en México*, (El Colegio de México, 1987), *Empleo para Todos: El Reto y los Caminos*, (FCE, 1988).

Editor:

- (1) *Obra Económica de Víctor L. Urquidi*, (El Colegio de México, 2008).
- (2) Con Víctor L. Urquidi, *Human Resources, Employment and Development in Latin America*, (Londres, 1983).
- (3) Con Alejandro Mungaray Lagarda, *Keynes Frente a la Crisis de los Ochenta*

Director del Estudio: *El Empleo en México: Magnitud y Recomendaciones*, (1973).

Ha publicado más de cincuenta artículos en revistas profesionales y en diversos periódicos. Ha participado como comentarista en diversos programas de radio y TV.

Tiburcio Zazueta Ramos.

Ingeniero Civil egresado de la Universidad Autónoma de Sinaloa; con Estudios de Post-Grado sobre Análisis Matricial de Estructuras en la Universidad Federal de Rio de Janeiro y la Universidad de Sao Paulo en Brasil; Maestría en Ingeniería-Estructuras de la Universidad Nacional Autónoma de México; y Especialidad en el Diseño de Concreto Reforzado en Hofstra University, New York, EUA. Durante sus 37 años de experiencia profesional ha trabajado en el diseño de plantas nucleoelectricas así como en áreas relacionadas con Seguridad Industrial y Protección Ambiental.

Dentro de las actividades desarrolladas en la Central Nucleoelectrica de Laguna Verde, destaca su participación en el análisis y diseño de las estructuras principales del Edificio del Reactor (1972-1977); representante de CFE ante el Grupo de Propietarios de Plantas Mark II en los Estados Unidos de Norteamérica (1977-1984); participación en el diseño dinámico de equipos y componentes del edificio del Reactor (1984-1988); y como Jefe de Ingeniería de Sitio, participó en la construcción y pruebas de arranque de la Unidad 2 y operación de ambas unidades (1988-1997).

De 1997 a 2005 funge como Gerente Corporativo de Normatividad y Planes de Emergencia dentro de la Dirección Corporativa de Seguridad Industrial y Protección Ambiental en Petróleos Mexicanos.

De 2005 a la fecha, ha realizado trabajos de asesoría a la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde en temas relacionados con el diseño de equipos y componentes para el Proyecto de Aumento de Potencia.

Miguel Ángel Castañeda Galván

Ingeniero Mecánico Electricista egresado de la Universidad Veracruzana, cursando actualmente la Maestría en Sistemas Energéticos en la Universidad Nacional Autónoma de México.

Desde el 2005 a la fecha es parte del grupo de Ingeniería de Diseño de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde de la Comisión Federal de Electricidad, participando activamente en el proyecto de Aumento de Potencia Extendida en el departamento de Análisis de Ingeniería, enfocado a los temas de análisis de transitorios, análisis termohidráulicos y desempeño térmico del reactor BWR.

Héctor Jacobo Cruz Báez

Ingeniero Mecánico egresado del Instituto Tecnológico de Veracruz, cursando actualmente la Maestría en Sistemas Energéticos en la Universidad Nacional Autónoma de México. Desde el 2005 a la fecha, ha desempeñado actividades en el departamento de Ingeniería de Diseño de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde de la Comisión Federal de Electricidad.

Destacando su participación durante el proceso de diseño, construcción y puesta en servicio después de la implementación del proyecto de Rehabilitación y Modernización (Aumento de Potencia) en las dos unidades de la Central Laguna Verde, trabajando en el diseño de sistemas y componentes mecánicos, modelado de sistemas termohidráulicos y soporte técnico a la operación de la Central.

Juan José Mercado Vargas

Ingeniero Mecánico Electricista egresado de la Universidad Veracruzana. En enero del 2004 ingresó a la Comisión Federal de Electricidad, desempeñando hasta la fecha actividades en el área de ingeniería de diseño de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde.

Dentro de las principales actividades desarrolladas en la Subgerencia de Ingeniería, destaca su participación en el Proyecto de Rehabilitación y Modernización (Aumento de Potencia) de las dos unidades que conforman a la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde. Las actividades desarrolladas dentro del grupo de ingenieros del proyecto, comprenden principalmente desde el estudio de factibilidad y Bases de Licitación, hasta el diseño, construcción, pruebas de arranque, puesta en marcha y soporte técnico durante la operación de ambas unidades.

REPORTE RESUMIDO SOBRE ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE UNA NUEVA PLANTA NUCLEOELÉCTRICA.

ÍNDICE

CAPÍTULO	TÍTULO	PÁGINA
	INTRODUCCIÓN	3
1	LA NUCLEOELECTRICIDAD	
1.1	Situación Actual y Prospectiva	5
1.2	Costos de Combustible, Operación y Mantenimiento y Producción.	5
1.3	Ciclo de Combustible Nuclear	6
1.4	Desmantelamiento	8
1.5	Administración de Residuos Radiactivos de Medio y Bajo Nivel.	9
1.6	Seguridad Nuclear	10
1.7	La Seguridad Física	11
1.8	No Proliferación	12
1.9	Licenciamiento	12
1.10	Capacidad de la Industria Nucleoeléctrica	13
1.11	La Energía Nuclear y la Sociedad	14
2	LA EXPERIENCIA DE LAGUNA VERDE	
2.1	Laguna Verde 1 vs Laguna Verde 2	17
2.2	Índices de WANO e Indicadores de Comportamiento en la CLV.	17
2.3	Costos de Combustible, Operación y Mantenimiento y Producción en la CLV.	18
2.4	El Ciclo de Combustible Nuclear en Laguna Verde 1 y 2.	18
2.5	Experiencia en Desmantelamiento en la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde.	18
2.6	Tratamiento de Desechos Radiactivos de Nivel Bajo y Medio en la CLV.	19
3	REACTORES AVANZADOS A CONSIDERAR PARA UNA NUEVA NUCLEOELÉCTRICA	
3.1	Diseños Disponibles en el Mercado	21
3.2	Comparativa de Diseños de Reactores Avanzados.	23
3.3	Diseños Certificados (Estandarizados Bajo Normas Americanas) e Ingeniería de Detalle	25
3.4	Nuevos Métodos Constructivos	26
3.5	Programa de Ejecución de un Nuevo Proyecto Nuclear	27
3.6	Sitios Disponibles Para la Ejecución del Proyecto	30
3.7	Infraestructura Requerida	31
4	ASPECTOS AMBIENTALES	
4.1	El Impacto Ambiental en la Generación de Energía	33

	Eléctrica	
4.2	El Entorno Ecológico de la Central Laguna Verde.	35
4.3	Gases de Efecto Invernadero	35
4.4	Propuesta de Mitigación de Gases de Efecto Invernadero.	36
4.5	Costos Marginales de Mitigación de Gases de Efecto Invernadero de las Diversas Tecnologías.	37
4.6	Emisiones Evitadas.	39
5	COSTOS DE UNA NUEVA NUCLEOELÉCTRICA.	
5.1	Entendiendo Costos. Su Integración y Suposiciones.	41
5.2	Estimaciones Recientes del Costo de Nuevas Unidades Nucleoeléctricas.	43
5.3	Información de Costos Aportada a CFE por Empresas Eléctricas y Tecnólogos y Estrategia de Reducción de Costos	47
5.4	Cálculo del Costo Nivelado.	49
5.5	Flujo de Efectivo Durante la Construcción de una Unidad Nucleoeléctrica Nueva.	50
5.6	Análisis de Sensibilidad.	52
6	FINANCIAMIENTO	
6.1	Contexto General del Financiamiento.	55
6.2	Experiencias Internacionales	56
6.3	Contexto Nacional de la Energía Nuclear	58
6.4	Opciones Financieras a Explorar	61
6.5	Conclusiones	67
7	ESTUDIO SOCIOECONÓMICO	
7.1	Introducción	67
7.2	Contexto de los Resultados	67
7.3	Matriz Insumo-Producto	68
7.4	Cuantificación de Efectos Económicos	68
7.5	Impactos Regionales Directos	69
7.6	La Región Inmediata a Laguna Verde	69
7.7	El Proceso Constructivo: Principales Efectos	69
7.8	Acciones Propuestas	69
7.9	Conclusiones	70
	CONCLUSIONES GENERALES	71

INTRODUCCIÓN.

En este documento se presenta la información relevante incluida en el “REPORTE QUE DESARROLLA LOS ASPECTOS TÉCNICOS, FINANCIEROS, AMBIENTALES Y SOCIALES A CONSIDERAR PARA LA INCORPORACIÓN DE UNA NUEVA PLANTA NUCLEOELÉCTRICA AL SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL”, el cual fue desarrollado y presentado a la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde en agosto de 2009. Los Temas tratados son:

1. LA NUCLEOELECTRICIDAD.
2. LA EXPERIENCIA DE LAGUNA VERDE.
3. REACTORES AVANZADOS A CONSIDERAR PARA UNA NUEVA NUCLEOELÉCTRICA.
4. ASPECTOS AMBIENTALES.
5. COSTOS DE UNA NUEVA NUCLEOELÉCTRICA.
6. FINANCIAMIENTO.
7. IMPACTO SOCIOECONÓMICO.

Este trabajo fue preparado para evaluar la factibilidad de construir una nueva unidad nucleoelectrica en México ante el evidente resurgimiento a nivel mundial del uso de la energía nuclear para generar electricidad. Como se indica en el Reporte, **este resurgimiento de la energía nuclear a nivel mundial se debe a múltiples factores, siendo de los más importantes: la incertidumbre en la disponibilidad y el comportamiento de los precios de los combustibles fósiles; la preocupación por el medio ambiente debido a los gases de efecto invernadero; mejoras en los diseños y procesos constructivos de las nuevas plantas que permiten tiempos de construcción menores; competitividad de la nucleoelectricidad con otras tecnologías en igualdad de condiciones y la experiencia de la operación de nucleoelectricas que ha mostrado indicadores operativos superiores a los de otras tecnologías. Además se demuestra la competitividad de la nucleoelectricidad como carga base para satisfacer la demanda de electricidad.**

Es importante que México mantenga dentro de sus programas de desarrollo y construcción, a la nucleoelectricidad como una alternativa viable y segura de generar electricidad, logrando aprovechar la experiencia ganada con la operación de Laguna Verde, permitiendo que el País disponga de diversas tecnologías para la generación de electricidad y cuente con la capacidad técnica de manejar la tecnología de punta.

1.- LA NUCLEOELECTRICIDAD.

1.1.- SITUACIÓN ACTUAL

Aun cuando en muchos países, incluyendo México, se tiene una suspensión temporal en la construcción de nuevas plantas nucleoelectricas, esto mismo no sucede a nivel mundial como lo observamos en la Tabla siguiente, donde se muestra que se encuentran en construcción 47 unidades nucleoelectricas en diferentes países.

GENERACIÓN DE NUCLEOELECTRICIDAD 2007		REACTORES OPERABLES 31-ENE-2009		REACTORES EN CONSTRUCCION 31-ENE-2009		REACTORES PLANEADOS 31-ENE-2009		REACTORES PROPUESTOS 31-ENE-2009		URANIO REQUERIDO 2009
Billones Wh	% e	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	Ton. de U
2600	15	436	372,533	47	42,128	133	145,025	282	295,205	65,505

Panorama mundial de plantas nucleoelectricas en operación, construcción o planeadas, incluyendo requerimientos de Uranio.

Por otra parte, la generación de electricidad a nivel mundial casi se duplicará de 2004 al 2030 al pasar de 16,424 MMWh a 30,364 MMWh, mientras que la nucleoelectricidad, en este mismo período, se incrementará en un 40% al pasar de 2,619 TWh en 2004 a 3,619 TWh en 2030.

Es obvio que aún cumpliéndose las proyecciones de construcción de nuevas centrales nucleoelectricas, la participación de éstas en la generación de electricidad representa tan sólo una pequeña parte del total. La demanda adicional deberá ser cubierta mediante otras tecnologías, tomando las medidas correspondientes para evitar daños al medio ambiente (i.e. emisiones de gases de efecto invernadero).

1.2.- COSTOS DE COMBUSTIBLE, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO Y PRODUCCIÓN.

El costo de combustible es el costo total anual asociado con el quemado de combustible nuclear como resultado de la operación de la unidad de generación.

En el 2007, el costo de combustible fue alrededor de 0.47 centavos USD/kWh. Por información proporcionada por el Nuclear Energy Institute (NEI), la variación del precio de combustible nuclear de 1995 a 2008 es prácticamente nula. En este mismo período, el carbón ha experimentado variaciones bajas con un ligero incremento en el precio, mientras que el gas y el petróleo han tenido variaciones importantes en sus precios con clara tendencia a la alza.

El costo de operación y mantenimiento es el costo anual asociado con la operación, mantenimiento y administración de una unidad nucleoelectrica, incluyendo para este tipo de centrales electricas, los costos de inspección de seguridad y salvaguardias además de los costos relacionados con mano de obra, seguros, seguridad física y costos administrativos. El promedio del costo

para estas actividades durante 2008 fue de 1.37 centavos USD/kWh, en las unidades nucleoelectricas de los Estados Unidos.

El costo de producción es la suma de los costos del combustible más los de operación y mantenimiento de una unidad de generación.

Información de Global Energy Decisions actualizada al 2008, para el período de 1995 al 2008 en los Estados Unidos de Norteamérica, los costos de producción de unidades Nucleoelectricas se han venido reduciendo continuamente al pasar de \$0.027 a \$0.0187 USD/kWh. El carbón ha presentado una variación de \$0.0257 a \$0.0275 USD/kWh. Con relación al gas y combustóleo, los incrementos han sido importantes al pasar de \$0.0374 a \$0.0809 USD/kWh el primero y de \$0.0585 a \$0.1726 USD/kWh el segundo.

1.3.-CICLO DE COMBUSTIBLE NUCLEAR.

El ciclo de combustible es todo el proceso que se realiza para obtener el combustible nuclear que será usado para la generación de electricidad (extracción de las minas, conversión, enriquecimiento y fabricación, conocido como etapa de pre-irradiación) y, una vez usado para ese propósito (generación de electricidad), la disposición que se dé al combustible gastado (etapa post-irradiación). El ciclo de combustible incluye el tiempo que éste permanece en el reactor para extraerle la energía.

La etapa de pre-irradiación comprende los procesos de extracción del uranio de las minas, la conversión, el enriquecimiento y la fabricación de ensamblajes para su uso en unidades de generación eléctricas.

1.- Extracción del uranio. Al 2007, las reservas probadas de uranio en el mundo ascendían a 6,469,000 toneladas. **El 70% de estas reservas se encuentran en Australia (23%), Kazajstán (15%), Rusia (10%), Sudáfrica (8%), Canadá (8%) y Estados Unidos (6%).**

2.- La conversión es el proceso químico que transforma el uranio natural en un componente llamado "hexafluoruro de uranio (UF_6). **A nivel mundial, Canadá, el Reino Unido, Francia, Estados Unidos, Rusia y China tienen la mayor capacidad para realizar este proceso y pueden satisfacer ampliamente la demanda mundial.**

3.- El enriquecimiento del uranio natural (como UF_6) consiste en el incremento del porcentaje en peso contenido de uranio 235; de tal forma que tenga una concentración mayor (entre el 4 y 5%) a la que tenía en forma natural (0.711%). (Nota: para fabricar una bomba atómica es necesario tener un compuesto con un contenido de uranio 235 muy alto, aproximadamente un enriquecimiento por encima del 90%). **Los países que cuentan con capacidad para enriquecer uranio son: Francia, Alemania, Reino Unido, Holanda, Japón, Estados Unidos, Rusia y China. En 2006 se tenía una capacidad global para producir 54,150 miles de SWU por año y la demanda en ese año fue de 48,428 SWU (SWU: Unidades de trabajo separativo, magnitud usada para cuantificar el proceso de enriquecimiento).**

4.- Fabricación de combustible. Para fabricar el combustible, el hexafluoruro de uranio enriquecido es convertido a polvo de bióxido de uranio el cual es prensado y calentado para formar pastillas de combustible de forma cilíndrica. Estas pastillas se introducen en tubos de metal (normalmente aleaciones de zirconio) para posteriormente formar un ensamble de combustible.

La etapa de post-irradiación inicia cuando el combustible irradiado ó “gastado” es descargado del reactor y almacenado de forma inicial. Después de dos años de almacenamiento, se puede considerar como desecho radiactivo (ciclo abierto) en cuyo caso se puede proceder a su disposición final. Si se considera como un producto del cual se puede recuperar el uranio y el plutonio que contienen (ciclo cerrado), entonces se tendrá un aprovechamiento energético posterior.

Ciclo de combustible abierto. Después de su almacenamiento inicial, el combustible gastado es almacenado temporalmente (hasta por 50 años) con el fin de determinar la forma de almacenamiento definitivo y su disposición final. Este almacenamiento temporal puede ser húmedo (alberca) o seco (silos herméticos a cielo abierto).

En el ciclo de combustible abierto, la disposición final del combustible gastado es el último paso. Hay una opinión a nivel mundial la cual establece que los repositorios geológicos profundos para almacenamiento de combustible gastado son el medio más efectivo para proteger la salud pública y el medio ambiente.

Ciclo de combustible cerrado es cuando se toma la decisión de reprocesar el combustible gastado, proceso mediante el cual se separa el uranio y el plutonio, que no fueron quemados, de los productos de fisión y los actínidos generados en el núcleo de reactor.

El uranio y el plutonio son reprocesados para crear nuevo combustible llamado MOX (mezcla de óxidos) que puede ser usado en reactores de agua ligera, como Laguna Verde. De hecho, más de 30 reactores en Europa quema este tipo de combustible y otros 20 se han licenciado para usarlo.

Francia y Rusia son los países que cuentan con la capacidad de reprocesar combustible. La compañía estatal francesa de energía eléctrica espera llegar a tener todos sus reactores de 900 MWe funcionando con al menos una tercera parte de MOX. Japón espera que la tercera parte de sus reactores utilicen el MOX en 2010, y ha aprobado la construcción de un nuevo reactor que utilizará un núcleo formado completamente por combustible MOX.

Finalmente, los otros residuos (productos de fisión) son vitrificados y encapsulados constituyendo así los únicos residuos radiactivos que se generan.

Con relación a la seguridad en el abasto de uranio, información de la Nuclear Energy Association (NEA) muestran que los recursos de uranio reconocidos son suficientes para alimentar la expansión de la capacidad mundial de energía

nuclear, sin reprocesamiento, al menos hasta el 2050. Además, los datos geológicos regionales indican que puede haber reservas para garantizar el abastecimiento de uranio durante cientos de años.

El Organismo Internacional de Energía Atómica ha establecido normas, reglamentos y estándares para el **transporte de material radiactivo**. Dentro de la clasificación que se tiene de estos materiales, el combustible gastado, desechos vitrificados y combustible MOX caen dentro de la categoría de paquetes tipo B, los cuales deben ser sometidos a una serie de pruebas para demostrar lo adecuado y resistencia de los contenedores donde serán transportados. El transporte puede realizarse vía terrestre o marítima.

Legislación. Como se puede observar con lo indicado anteriormente, el Ciclo de Combustible Nuclear genera un intercambio, en principio, comercial y económico a nivel mundial, muy intenso. Es preocupación de todos los países el uso pacífico de la energía nuclear, es por ello que desde agosto de 1955 (Primera Conferencia de Ginebra), se han ido creando instituciones para la cooperación e intercambio de información. **A la fecha se tienen al menos 15 instituciones relacionadas con este tema, en los que México participa de manera importante.**

1.4.- DESMANTELAMIENTO.

Desmantelamiento es el proceso mediante el cual una unidad nucleoelectrónica (al igual que cualquier otra instalación industrial), al final de su vida útil, es desmantelada, descontaminada y demolida para que el sitio donde se ubica quede disponible para otros usos, sin restricciones.

Durante el proceso de desmantelamiento se pueden identificar tres etapas: Actividades iniciales; Actividades mayores de desmantelamiento; y Actividades para el finiquito de licencia. Los alcances y los tiempos para cada una de estas etapas van a depender en gran medida de la opción de desmantelamiento que se siga. En general, podemos decir que la actividad principal en la primera etapa es el retiro permanente del combustible del núcleo del reactor; en la segunda etapa se lleva a cabo el proceso de descontaminación y desmantelamiento de las instalaciones; y en la tercera etapa, el evento principal es la liberación del sitio para otros usos.

Las actividades de desmantelamiento pueden llevar desde 5 años hasta 60 años, dependiendo de la opción tomada y del programa de trabajo acordado con el Organismo Regulador.

Las opciones de desmantelamiento son:

- i. **DECON** (descontaminación). En esta opción, todas las componentes y estructuras son descontaminadas, desmontadas, empaquetadas y almacenadas (en sitio temporalmente o en almacén de desechos de bajo y medio nivel para disposición final). Esta opción lleva como mínimo, 5 años. Tiene la desventaja de que, en el tiempo que se realiza, la radiactividad no decaído lo suficiente y esto se refleja en los costos de descontaminación.

- ii. **SAFSTOR** (almacenamiento seguro). En esta opción, la unidad nucleoelectrónica se mantiene intacta y protegida hasta por 60 años para luego proceder de manera similar a la opción DECON, con la ventaja de que por el tiempo transcurrido, la radiactividad se ha reducido de manera importante.
- iii. **ENTOMB** (enterrar). Esta alternativa requiere del retiro inmediato del combustible gastado y los internos del reactor. El resto del material contaminado es concentrado en el edificio del reactor, el cual es sellado con el fin de que con el transcurso del tiempo, la radiactividad decaiga a niveles que permita el finiquito de la licencia de operación y la liberación del sitio. Esta opción no es viable ya que la normatividad actual estipula un tiempo máximo de 60 años para realizar el desmantelamiento.

Cualquier actividad de descontaminación es realizada por trabajadores usando procesos químicos, físicos, eléctricos y de ultrasonido, tal como se realizan en actividades de mantenimiento o en los trabajos de reparación en condiciones operativas de la unidad.

Los costos de las actividades de desmantelamiento son cubiertos mediante fondos que se van acumulando durante la vida útil de la unidad nucleoelectrónica. Estos fondos deben ser suficientes para cubrir los costos de mano de obra, consumo de energía y el transporte y disposición de los desechos. Se estima que una unidad nucleoelectrónica requiere acumular un fondo durante su vida útil, entre 300 y 500 millones de dólares 2009.

Durante los últimos 40 años se ha adquirido mucha experiencia en el desmantelamiento de instalaciones nucleares, ya que se han retirado del servicio alrededor de 100 reactores comerciales, más de 250 reactores de investigación y varias instalaciones relacionadas con el ciclo de combustible. Los países que más experiencia han adquirido en este campo, son: Estados Unidos, Francia, Reino Unido, España, Alemania y Japón. La planta Maine Yankee en los Estados Unidos fue de los primeros reactores comerciales grandes que ha realizado recientemente un proceso de descontaminación y desmantelamiento. Se redujo el predio con licencia de 72 hectáreas a 5 hectáreas, estas últimas para el almacenamiento temporal independiente del combustible gastado.

1.5.- ADMINISTRACIÓN DE RESIDUOS RADIATIVOS DE MEDIO Y BAJO NIVEL.

La radiactividad y por tanto, la radiotoxicidad de los desechos radiactivos, disminuye exponencialmente con el tiempo y depende del período de desintegración de cada uno de los radionúclidos. Por ello, la protección radiológica frente a las radiaciones debe permanecer durante esos períodos.

Un desecho radiactivo se define como aquel material que contiene o esté contaminado por radionúclidos cuyas concentraciones o niveles de radiación supera los fijados por las autoridades competentes y para el que no se prevé aplicación alguna.

En general, los niveles de radiación pueden ir desde muy altos como los contenidos en el combustible gastado, hasta muy bajos como los materiales usados en investigación o medicina. En esta parte nos estaremos refiriendo a materiales con actividad radiológica media y baja, en los que ésta se reduce a menos de una milésima parte en unos 300 años. El almacenamiento para este tipo de material debe garantizar por todo ese tiempo la seguridad para las personas y el medio ambiente.

Los residuos de baja y media actividad pueden ser líquidos o sólidos. En ambos casos los materiales deben ser acondicionados para su almacenamiento y disposición final. Las etapas principales del acondicionamiento son:

- **Pretratamiento.** El material se segrega de acuerdo a su estado físico y nivel de actividad.
- **Tratamiento Principal.** Se concentra la actividad que contiene el material, tanto como sea posible. Para el caso de desechos líquidos se utilizan métodos químicos y físicos. Para el caso de desechos sólidos se utilizan técnicas mecánicas o químicas.
- **Inmovilización y envasado.** El desecho se deja en una forma sólida y estable para su posterior confinamiento y disposición definitiva.

Para el confinamiento definitivo de los desechos de baja y media actividad, existen dos métodos actualmente en uso y aceptados a nivel internacional:

- Repositorio Subterráneo.
- Repositorio Superficial, con o sin barreras de ingeniería.

En el caso del primer método, normalmente son cavernas o cuevas, existentes de manera natural o construida para ese efecto. En el caso del repositorio superficial, el “almacén” es construido especialmente para el caso. **El proceso de selección de un sitio para la disposición de desechos radiactivos, tiene como objetivo básico determinar un sitio adecuado para la disposición y demostrar que este sitio en conjunto con el diseño del repositorio y envasado-empaquetado de los desechos, tienen en su conjunto las características que garantizan el aislamiento adecuado entre los radionúclidos y el ambiente durante el tiempo requerido.**

1.6.- SEGURIDAD NUCLEAR.

Con relación a la generación nucleoelectrónica, hay tres conceptos íntimamente relacionados por lo que, para evitar confusiones, se definen a continuación:

- **La Seguridad Nuclear se enfoca hacia condiciones anormales o eventos que puedan resultar en la liberación de materiales radiactivos que provengan de actividades autorizadas que se ejecutan en las unidades nucleoelectrónicas.**

- **La Seguridad Física** se enfoca al uso indebido e intencional de material nuclear u otras sustancias radiactivas por grupos terroristas o de sabotaje con el propósito de causar daños.
- **Las Salvaguardias** se enfocan a restringir a las naciones, las actividades que puedan llevar a la adquisición o manufactura de armamento nuclear.

Para lograr una **Seguridad Nuclear** óptima, los diseños de las unidades nucleoelectricas utilizan el concepto de “defensa a profundidad”. Algunos aspectos clave son: **Programas de Garantía de Calidad, equipos para evitar que operaciones anormales se conviertan en problemas, sistemas redundantes, barreras de ingeniería para contener dentro de las instalaciones los efectos de un daño al núcleo.**

En el caso particular de Laguna Verde, existen cinco barreras de ingeniería para contener los efectos de un daño al núcleo o al combustible nuclear. Estas barreras son: el propio combustible, la cubierta de las barras de combustible, la vasija del reactor, contenedor primario y contenedor secundario.

Durante la operación, la Seguridad Nuclear se proporciona mediante varios sistemas y actividades. De los más importantes, se cuenta con los sistemas de instrumentación y control del reactor; sistemas de protección del reactor; inspección, vigilancia y comprobación periódica de los equipos, sistemas y componentes. Además, se cuenta con un plan de vigilancia radiológica ambiental, tanto en el sitio como en los alrededores.

Todo lo anterior ha demostrado su efectividad ya que en los 51 años de generación nucleoelectrica, sólo han ocurrido dos accidentes: Isla de las Tres Millas (Estados Unidos de Norteamérica-1979) y Chernobyl (Ucrania-1986). En el primer caso, no hubo afectación a personas ni al medio ambiente. En el segundo caso, hubo 31 muertes inmediatas y 25 posterior al accidente además de liberación radiactiva significativa. Los datos estadísticos con que se cuenta en relación a accidentes industriales a nivel mundial, muestran que la nucleoelectricidad es una de las tecnologías de generación eléctrica más segura

1.7.- LA SEGURIDAD FÍSICA.

La Seguridad Física se relaciona directamente con amenazas externas a materiales o instalaciones nucleares. La estrategia para la Seguridad Física se basa en dos aspectos:

- **Amenaza Base de Diseño, la cual define las especificaciones de diseño con lo cual deben cumplir los sistemas de protección física. Representar la amenaza mayor contra la cual la instalación pueda defenderse.**
- **Control de acceso a las instalaciones. Se cuenta con tres zonas de control de acceso con diferentes grados de control. Estas zonas son: Zona Controlada (comprende todo el predio), Zona Protegida**

(comprende la zona dentro de la doble cerca) y Zona Vital (comprende áreas vitales dentro de los edificios).

Existen Convenciones e Instrumentos internacionales relacionados con la Seguridad Física, el primero de los cuales es la Convención sobre la Protección Física de Materiales Nucleares (CPFMN, 1980). Por otro lado, existe un instrumento multilateral en el campo de la seguridad física que es la Convención Nuclear de Terrorismo de la ONU (2005), que entró en vigor en Julio del 2007. La convención también contiene obligaciones relacionadas con las medidas contra el terrorismo, intercambio de información, así como detección, prevención y respuesta a los actos terroristas a instalaciones y materiales nucleares.

1.8.- NO PROLIFERACIÓN.

Como se indicó anteriormente, el objetivo de las salvaguardias es evitar la proliferación de armas nucleares. Para lograr este objetivo, las acciones realizadas por la Comunidad Internacional se encuentran reflejadas en una serie de acuerdos y tratados internacionales para la No Proliferación.

El Organismo Internacional de Energía Atómica, dependiente de las Naciones Unidas, fue creado en 1957 con el objetivo principal de ayudar a que las naciones desarrollen el uso de la energía nuclear para fines pacíficos, cumpliendo con la función de administrar todas las salvaguardias y está honrando al Tratado de No Proliferación (TNP).

1.9.- LICENCIAMIENTO.

El proceso de Licenciamiento que se está proponiendo para las nuevas unidades nucleoelectricas en los Estados Unidos de Norteamérica, es diferente al utilizado en los años 60s y 70s cuando fueron licenciadas las plantas que actualmente están en operación en ese País. Este nuevo proceso es con el propósito de evitar los retrasos que se presentaron en la construcción de las plantas nucleoelectricas en esa época, y dar certeza a la empresa eléctrica de que podrá iniciar operaciones una vez terminada la construcción.

El proceso original de licenciamiento está reflejado en el 10CFR50 emitido por la Comisión Reguladora Nuclear (Nuclear Regulatory Commission-NRC) de los Estados Unidos. En 1989 se emitió por dicho Organismo el 10CFR52 donde se establece el nuevo procedimiento. En este documento se identifican principalmente los siguientes tres procesos a ser realizados ante el Organismo Regulador:

- **Proceso de Certificación del Diseño de Planta Estándar. Este proceso lo realiza el tecnólogo del reactor.**
- **Proceso de Permiso Anticipado de Emplazamiento. Este proceso lo realiza la Empresa Eléctrica y es independiente de la tecnología del reactor.**
- **Proceso de Licencia Combinada (Construcción y Operación). Este proceso lo realizan la Empresa Eléctrica y el tecnólogo del reactor,**

en donde se identifican las pruebas y vigilancias que durante construcción se llevarán a cabo por el Organismo Regulador.

Para iniciar los trabajos de construcción, es necesario que el Organismo Regulados emita la Licencia Combinada, asegurando de esta manera que todos los asuntos relacionados con la seguridad, han sido resueltos.

1.10.- CAPACIDAD DE LA INDUSTRIA NUCLEOELÉCTRICA.

A nivel internacional, son varias las compañías que desarrollaron la tecnología de los reactores y de las unidades nucleoelectricas. A medida que ha pasado el tiempo, se han ido uniendo estas compañías para competir en el mercado mundial.

Así, tenemos que actualmente existen tres proveedores principales de reactores de agua ligera: AREVA NP (Franco-alemana), General Electric Energy (Norteamericana) y Westinghouse (Norteamericana), asociados básicamente con las compañías japonesas Hitachi, Toshiba y Mitsubishi. Más del 68% de los 434 reactores actualmente en operación fueron suministrados por estas compañías. Con relación a proveedores de reactores de agua pesada, tenemos a Atomic Energy of Canada y Nuclear Power of India, Ltd, que participan con el 11.5%. La anterior participación representa poco más del 80% del total de reactores en operación. El resto está cubierto con la participación de otros proveedores como por ejemplo Atomenergoprom (ruso con 12%), Doosan Heavy Industries (norteamericano con 2.1%) y Babcock & Wilcox (norteamericano con 1.6%).

El año pasado (2008), se anunció en los Estados Unidos los planes de construir cerca de 30 nuevas unidades nucleoelectricas. Para 27 de ellas, se anunció el diseño del reactor y el proveedor, quedando de la siguiente manera: PWR-Westinghouse con 12 (44.4%), BWR-General Electric con 7 (25.9%), PWR-AREVA con 6 (22.2%) y PWR-Mitsubishi con 2 (7.4%), todos ellos, reactores avanzados.

Con relación al diseño y fabricación de equipo nuclear, los proveedores y fabricantes deben ser calificados. Uno de los certificados aceptados a nivel internacional es el que emite la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) que se conoce como Estampado ASME (N-stamp). **Algunos de los líderes mundiales en el mercado de manufactura de vasijas y grandes componentes nucleares son los siguientes:**

Japón: Japan Steel Works (JSW) y Mitsubishi (MHI).

Corea del Sur: Doosan Heavy Industries.

China: China First Heavy Industries.

India: Larsen & Toubro Ltd.

Europa: SFARsteel (propiedad de AREVA en Francia). En Inglaterra, la empresa Sheffield Forgemasters International.

Norte América: Babcock & Wilcox (único proveedor de grandes vasijas de presión en 2008), Global Modular Solutions (empresa en formación por el Grupo Shaw y Westinghouse) y AREVA (construyendo una nueva instalación para fabricar vasijas de reactor, generadores de vapor y presurizadores).

Rusia: OMZ's Izhorskiye Zavody y Zio-Podolsk.

1.11.- LA ENERGÍA NUCLEAR Y LA SOCIEDAD.

Con el fin de conocer la opinión de la población a nivel mundial sobre el uso de la nucleoelectricidad, Global Management Consulting y Technology Compañy Accenture realizaron una encuesta en 20 países y los resultados se publicaron en World Nuclear News en marzo de 2009, indicando los resultados siguientes:

- 29% de los encuestados respondieron que apoyan el uso de la energía nuclear además del aumento de su utilización como fuente de energía.
- 40% opinó que apoyaría a la energía nuclear siempre y cuando se aclararan las opiniones negativas que han existido en su contra.
- 43% opina que la energía nuclear es un medio para lograr la reducción de las emisiones de carbono.
- 9% solicita un aumento en el uso de la energía nuclear para reducir la dependencia de combustibles fósiles.
- 34% opina que debe combinarse el uso de la energía nuclear y la energía renovable.
- Las tres preocupaciones principales de los encuestados fueron: eliminación de residuos, la seguridad y el desmantelamiento.
- 45% de los que se oponen al uso de la energía nuclear opinan que el contar con más información haría cambiar la opinión negativa de la población.
- 28% indicó que está bien informado sobre la estrategia de su País con respecto al uso de la energía nuclear y el resto (72%), que no está bien informado o no informado.

La encuesta realizada por la Comisión Europea, revela que la opinión pública acerca de la energía nuclear parece estar fuertemente dividida en la Unión Europea. Los resultados indican que el 44% de los encuestados manifiestan su apoyo a la energía nuclear mientras que el 45% se opone a ésta. Aquellas personas cuya respuesta fue "muy a favor" de la energía nuclear, representan el mayor segmento de la encuesta (33%) y una proporción ligeramente inferior (28%) confirma que se encuentra "muy en contra".

Los Estados Unidos es otro de los países en donde la aceptación por la población de la energía nuclear, ha ido en aumento, con un 74% a favor y un 24% en contra en encuesta realizada en septiembre de 2008. En la encuesta realizada en marzo de 2009 por Gallup Polling Organization arrojó un 59% de los encuestados como a favor o muy a favor y un 37% que se opone. En marzo de 2009, el World Nuclear News publicó los resultados de la encuesta anterior más los resultados de otra encuesta realizada por Bisconti Research y GfK NOP, la cual encontró que el 84% de las personas que respondieron

consideran que la energía nuclear será importante para satisfacer las futuras necesidades de energía.

Con relación a México, el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares realizó en el 2008 una encuesta a nivel nacional, Distrito Federal, Sonora y Veracruz. Más de la mitad de los encuestados (57%) no saben o no contestan cuáles podrían ser los beneficios de usar la energía nuclear como energía eléctrica. El 11% afirma que uno de los beneficios es que la energía sería más barata, 7% afirma que aumentaría la producción de energía y 4% afirma que no contamina. Similar a lo que sucede con los beneficios, el 54% de los encuestados no expresan ninguna desventaja del uso de energía nuclear. Entre las desventajas que le atribuyen los encuestados al uso de la energía nuclear como energía eléctrica, resaltan por la radiación (10%), porque contamina más (9%) y porque causaría enfermedades (6%).

Como se puede observar, a nivel mundial la aceptación de la nucleoelectricidad va en aumento, probablemente influenciado por los altos costos de los energéticos fósiles y por la preocupación por la contaminación y las emisiones de gases de efecto invernadero. Otra observación importante de los resultados de las encuestas es que cuando los entrevistados están informados, generalmente su opinión es de apoyo a la nucleoelectricidad.

Por último, los resultados de las encuestas realizadas en las comunidades comprendidas dentro de los 16 km alrededor de Laguna Verde muestran que, actualmente, la Central Laguna Verde no constituye ningún motivo de preocupación real en su entorno.

2.- LA EXPERIENCIA DE LAGUNA VERDE.

La Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde inició operación comercial en julio de 1990 con la Unidad 1. La Unidad 2 inició su operación comercial en abril de 1995. Desde entonces, ambas Unidades han operado de manera satisfactoria y en general, con indicadores operativos por encima de la media a nivel mundial para el mismo tipo de reactor, en este caso, a los BWR. Asimismo, la experiencia en recarga de combustible se ha visto reflejada en reducciones importantes de los tiempos empleados en dicha actividad, logrando tiempos entre 25 y 30 días para las últimas recargas.

Actualmente en ambas Unidades se realiza el proyecto de Rehabilitación y Modernización, conocido como Proyecto de Aumento de Potencia Extendida, con lo que se contempla un aumento de potencia eléctrica del 20% adicional del valor original de diseño, por Unidad. Estos trabajos serán concluidos el año 2010 en ambas unidades.

2.1.- LAGUNA VERDE 1 vs LAGUNA VERDE 2.

Al inicio de la construcción, la diferencia entre los programas de la Unidad 1 y la Unidad 2 fue de poco más de un año. Sin embargo, por problemas de presupuesto, la construcción de la Unidad 2 se suspendió cuando la obra civil estaba muy avanzada. Esto permitió que el personal de CFE se capacitara y entrenara tanto en Ingeniería como en construcción, de tal manera que al reinicio de la construcción de la Unidad 2, CFE tomó control del proyecto, lo que incluyó a la Ingeniería, la Construcción, Garantía de Calidad y la Administración del Proyecto, mejorando sensiblemente los resultados y rendimientos en la construcción de la Unidad 2.

La Central Laguna Verde ha obtenido varios certificados y reconocimientos por Organismos Internacionales y nacionales.

2.2.- ÍNDICES DE WANO E INDICADORES DE COMPORTAMIENTO EN LA CLV.

Con el propósito de asegurar que la operación de Laguna Verde sea sujeta de comparaciones referenciales con plantas de su tipo en otros países, se decidió utilizar los Indicadores de Comportamiento establecidos por la Asociación Mundial de Operadores Nucleares (WANO). En todos los casos los resultados obtenidos son comparados con la meta comprometida o bien con la media de WANO.

Como parte del sistema de mejora continua de la Gerencia de Centrales Nucleoeléctricas (GCN), se utilizan indicadores con el objetivo de proporcionar, a los directivos y responsables de los procesos, elementos para identificar y atender áreas de mejora. Los indicadores más importantes se clasifican como: Nivel 1, Nivel 2 y Nivel 3.

Indicadores Nivel 1, están enfocados a monitorear el cumplimiento de los objetivos estratégicos.

Indicadores Nivel 2, están enfocados a la Gestión y desempeño de los procesos de la CLV.

Indicadores Nivel 3, están enfocados al monitoreo estratégico, como, por ejemplo, administración del agua.

2.3.- COSTOS DE COMBUSTIBLE, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO Y PRODUCCIÓN EN LA CLV.

Los costos de producción del 2003 a septiembre de 2008 se han mantenido en una media de \$250.00 /MWh. En el mes de septiembre de 2008 se inició el Proyecto de Rehabilitación y Modernización para el Aumento de Potencia de la CLV, por lo que los costos de producción han aumentado a alrededor de \$335.00 /MWh.

Como sucede en la industria nucleoelectrónica, dentro del costo de producción hay un porcentaje destinado al fondo para el desmantelamiento y disposición final de desechos radiactivos al final de la vida útil de las Unidades.

2.4.- EL CICLO DE COMBUSTIBLE NUCLEAR EN LAGUNA VERDE 1 Y 2.

Durante la operación de las Unidades de Laguna Verde, la CLV ha llevado a cabo varios contratos para el suministro del combustible nuclear con varias compañías, buscando las mejores condiciones para CFE en cada caso. Actualmente se tiene un contrato con la compañía Global Nuclear Fuel (GNF).

El combustible gastado se encuentra en su almacenamiento inicial en la alberca de combustible gastado que se localiza en el Edificio del Reactor. En la alberca de la Unidad 1 se encuentran 1,904 ensamblajes y en la Unidad 2, 1,471 ensamblajes. Se prevé que para el año 2020 la alberca de combustible gastado de la Unidad 1 alcance su capacidad máxima de diseño.

Un tiempo razonable antes de agotar la capacidad de diseño de las albercas de combustible gastado, la CLV deberá negociar la mejor opción para CFE en ese momento para completar el ciclo de combustible, ya sea ciclo abierto o ciclo cerrado.

2.5.- EXPERIENCIA EN DESMANTELAMIENTO EN LA CENTRAL NUCLEOELÉCTRICA LAGUNA VERDE.

Las actividades de desmantelamiento hasta el año 2007 fueron mínimas, concretándose únicamente al reemplazo, descontaminación y almacenamiento de equipos pequeños y componentes que fueron cambiados como resultado de actividades de mantenimiento. **Durante las recargas de combustible programadas de los años 2008 de la U-1, 2009 de la U-2 y 2010 en ambas Unidades, se llevarán a cabo las actividades de Rehabilitación y Modernización para el Proyecto Aumento de Potencia, lo que incluye la sustitución de equipos de gran tamaño, tuberías, componentes y material de demolición.**

La remoción y tratamiento de estos equipos y componentes, así como los materiales contaminados radiológicamente que resulten de dichas actividades, puede considerarse como un desmantelamiento parcial.

En total se estima que se generarán 4,000 toneladas de material metálico de bajo nivel de radiación y aproximadamente 1,500 bidones con desecho sólido seco compactable.

Los materiales con bajo nivel de radiación serán almacenados en almacenes construidos para ese propósito en condición SAFSTOR.

2.6.- TRATAMIENTO DE DESECHOS RADIATIVOS DE NIVEL BAJO Y MEDIO EN LA CLV.

Como resultado de la operación de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, se generan desechos radiactivos líquidos, sólidos y aceites gastados.

Los desechos líquidos se generan en los sellos y fugas canalizadas de equipos, así como derrames en los pisos que son conducidos a drenajes de piso. Los sistemas de tratamiento de desechos radiactivos se encuentran en el edificio de Desechos Radiactivos para la Unidad 1 y en el edificio de Purificación para la Unidad 2. El tratamiento que se les da puede ser físico o químico. Una vez tratados, son almacenados en los almacenes de la CLV.

Los desechos sólidos pueden ser compactables o no compactables (básicamente metales). Son sometidos a descontaminación mediante procesos físicos y químicos y si es posible su descontaminación a niveles menores a los indicados por la Norma NOM-035-NUCL-200, entonces son tratados como chatarra industrial. De otra manera, son almacenados dentro del sitio de la CLV.

Los aceites gastados son los aceites lubricantes que usan los equipos para su operación. La descontaminación se realiza mediante un proceso de centrifugado. El material contaminado resultante es almacenado dentro del sitio de la CLV.

Se tiene estimado que el volumen de Desechos Radiactivos de Medio y Bajo Nivel, a confinar definitivamente al final de la operación comercial de la CLV (después de 60 años de operación comercial) será de 2,690 m³ que incluyen 1,111 m³ de tambores llenos de concentrado seco. Este volumen equivale a aproximadamente la capacidad de una alberca olímpica.

3.- REACTORES AVANZADOS A CONSIDERAR PARA UNA NUEVA NUCLEOELÉCTRICA.

3.1.- DISEÑOS DISPONIBLES EN EL MERCADO.

Las tecnologías nuevas y evolucionadas disponibles se agrupan en los siguientes grupos:

- **Reactores Avanzados.** Han resultado de incorporar mejoras a los reactores existentes obteniendo parámetros de seguridad superiores.
- **Reactores Avanzados/Pasivos.** Son reactores con los mismos principios básicos de operación pero incorporan en su diseño nuevos conceptos con el objetivo de simplificar a los sistemas mismos y reducir elementos activos en los sistemas del reactor.
- **Reactores de Nueva Generación.** Están basados en principios de operación diferentes a los anteriores y utilizan criterios de diseño nuevos acorde a los requisitos inherentes a los reactores en desarrollo. Se prevé su entrada en operación comercial en 20 o 30 años más.

Cronológicamente los reactores nucleares se clasifican de la siguiente manera:

Generación I.- Son los reactores prototipo y usados en las primeras nucleoelectricas comerciales desarrolladas en los años 50s y 60s. Muy pocas de estas nucleoelectricas operan en la actualidad.

Generación II.- Los reactores de esta generacion se usaron en las nucleoelectricas que se comercializaron y construyeron en los años 70s y 80s. Las unidades de Laguna Verde corresponden a esta generacion.

Generación III.- Estos reactores desarrollados en los años 90s presentan una serie de mejoras en su diseño basándose en la experiencia de las generaciones anteriores e innovaciones tecnológicas en los sistemas de seguridad. Son más económicos en sus costos de operación y mantenimiento, proporcionando una mayor disponibilidad y vida útil, generalmente de 60 años.

Generación III+.- Son los desarrollados recientemente y con características más avanzadas como por ejemplo, sistemas pasivos en algunas funciones de seguridad del reactor. Sólo un pequeño número 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.

Generación IV.- Ofrecen la perspectiva de mejorar la seguridad nuclear y presentan un mayor número de ventajas económicas, además de reducir la producción de desechos radiactivos, mejorar la seguridad física y la resistencia a la proliferación.

A continuación se mencionan los diseños de reactores avanzados que se encuentran disponibles en el mercado internacional que corresponden a las generaciones III y III+ con capacidades mayores a 1,000 MWe.

REACTORES DE AGUA LIGERA.

ABWR (Advanced Boiling Water Reactor). Este reactor fue diseñado por General Electric y certificado por la NRC en 1997. Tiene una capacidad de generación eléctrica de 1371 MWe, una potencia térmica de 3,926 MWt y una probabilidad de daño al núcleo del orden de 10^{-7} /año. Se han construido cuatro unidades nucleoelectricas con este reactor en Japón las cuales están operando, además existen otras en construcción. Tiene la factibilidad de utilizar combustible MOX.

AP1000 (Advanced Passive Reactor) Diseñado por Westinghouse, fue certificado por la NRC en enero de 2006. Tiene una capacidad eléctrica de al menos 1150 MWe y una capacidad térmica de 3,400 MWt. La probabilidad de daño al núcleo es de 2.9×10^{-7} /año. Los sistemas de seguridad de este reactor son predominantemente pasivos. Tiene varias opciones de uso de combustible, incluyendo combustible MOX.

ESBWR (Economic Simplified Boiling Water Reactor) Este reactor fue diseñado por General Electric- Hitachi con una potencia eléctrica de 1,550 MWe y una capacidad térmica de 4,500 MWt. El reactor ESBWR tiene tecnología perteneciente a la Generación III+. Se encuentra en proceso de certificación por la NRC.

APWR (Advanced Pressurized Water Reactor). Este reactor fue desarrollado por Mitsubishi Heavy Industries (MHI) y pertenece a la generación III+ de reactores. Su tecnología está basada en los reactores de agua presurizada (PWR), tiene una capacidad eléctrica de 1538 MWe. El reactor US-APWR fue desarrollado por Mitsubishi para ser usado en los Estados Unidos bajo la normatividad de ese País. El próximo reactor APWR+ podrá usar combustible MOX.

APR-1400 (Advanced Power Reactor) Desarrollado por Corea del Sur, este reactor cuenta con una capacidad de 1400 MWe y está basado en la tecnología de los reactores PWR. Este reactor fue certificado por el Instituto Coreano de Seguridad Nuclear en mayo de 2003 y las primeras dos unidades nucleoelectricas con reactores de 1400 MWe de capacidad se encuentran en construcción.

EPR (European Pressurized Water Reactor) Este reactor desarrollado por AREVA NA es descendiente directo de los más recientes reactores franceses (N4) y los alemanes (KONVOI). Su diseño contempla cuatro sistemas redundantes de seguridad en lugar de sistemas pasivos. Cuenta con una capacidad que va de 1600 a 1750 MWe. Está diseñado para utilizar combustible MOX.

VVER (Reactor Energético de Agua-Agua). Este es un reactor nuclear de agua presurizada desarrollado por la ExUnión Soviética y la Rusia actual. El nombre es por el hecho de que el agua funciona tanto como refrigerante como moderador de neutrones. Las capacidades de este reactor está entre 1150 y 1200 MWe. Este reactor cumple con la normatividad rusa y Europa del Este.

REACTORES DE AGUA PESADA.

CANDÚ (Canadian Deuterium Uranium). El reactor CANDÚ utiliza principalmente el uranio natural como combustible y agua pesada como refrigerante y moderador. Estos reactores se encuentran operando en Canadá y otros países y sus capacidades son de 700 y 900 MWe.

ACR-1000 (Advanced Reactor CANDÚ-1000) Este reactor Candú avanzado utiliza agua ligera como refrigerante y agua pesada como moderador. Su capacidad es de 1200 MWe y pertenece a la generación III de reactores. Este reactor puede operar utilizando uranio enriquecido al 1.5% o 2% de uranio-235, así como combustible MOX, Torio y actínidos.

3.2.-COMPARATIVA DE LOS DISEÑOS DE REACTORES AVANZADOS.

**TABLA COMPARATIVA
REACTORES GENERACIÓN III/III+**

DATOS	TIPO DE REACTOR				
	ABWR	EPR	APWR	AP1000	ESBWR
Potencia Térmica, MWt	3926 4300 (UPRATE)	4590	4451	3400	4500
Potencia Eléctrica, MWe	1371 1465 (UPRATE)	1600	1538	1150	1550
Eficiencia, %	34	37	39**	34	34.7
Factor de Planta	90%	94%		93%	95%
No. De Lazos Primarios	0	4	4	2	0
Masa del Combustible (UO ₂) ton ⁽²⁾	172	129.2	157.37	95.97	163
Vida de Diseño (Años) ⁽²⁾	60	60	60	60	60
Capacidad de Alberca Combustible Gastado, Ciclos ⁽²⁾	10	10	10	10	10
Frecuencia de Daño al Núcleo del Reactor (RY) ⁽²⁾	2x 10 ⁻⁷	3.6x10 ⁻⁷	1.8x10 ⁻⁶	2.9x10 ⁻⁷	3x10 ⁻⁸
Diseño contra impacto de avión ⁽²⁾	Si	Si	Si	Si	SI
Diseño Sísmico para Parada Segura (SSE) ⁽²⁾	0.3g	0.3g	0.3g	0.3g	0.3g
Tipo de Combustible	Uranio enriquecido/ MOX	Uranio enriquecido/ MOX	Uranio enriquecido/ MOX***	Uranio enriquecido/ MOX	Uranio enriquecido
Compañía/ País de origen	General Electric/Hitachi; Westinghouse/ Toshiba; EUA/Japón	Areva Francia	Mitsubishi Japón	Westinghouse/ Toshiba; EUA/Japón	General Electric: EUA

Tiempo requerido para Ingeniería de Detalle, (Años)	4	5		4	3.7
Tiempo requerido para Preparación de Sitio y Excavación) (Años)	1	1.3	1.3	1.5	1
Tiempo entre el Primer Colado y la Carga de Combustible (Años)	3	3.3	3.3	3	3.45
Dosis a trabajadores (Sv-Hombre/año)	0.36	0.35		0.7	0.604
No de Obreros en el Pico de la Obra ⁽⁵⁾⁽⁶⁾	4500	2600			
No Pico de Personas de Supervisión y Administrativas en la Obra ⁽⁵⁾⁽⁶⁾	750	300			
Número de unidades en Operación ⁽¹⁾⁽²⁾	4				
Número de Centrales bajo construcción	5*	2		1	

En un proceso de licitación en México para la construcción de una nueva unidad nucleoelectrica, es necesario considerar dos aspectos importantes que han impactado los programas de construcción de centrales nucleoelectricas en el pasado:

- Proceso de Licenciamiento.
- Tecnología del reactor.

Con relación al proceso de licenciamiento, aun cuando no se tiene experiencia con el nuevo proceso de licenciamiento emitido por la NRC de los Estados Unidos a través del 10CFR52, este fue elaborado tomando como base la experiencia de haber construido muchas centrales nucleoelectricas con un proceso que demostró su ineficacia, por lo que el nuevo método se ve lógico y se recomienda que sea usado. En paralelo al licenciamiento está la normatividad aplicable a la ingeniería de diseño de la nueva unidad nucleoelectrica. Este aspecto es igualmente importante y el conocimiento de la normatividad es indispensable para un desarrollo del proyecto adecuado. En este caso se recomienda usar un diseño al que se le aplique una normatividad conocida en México, como lo es la Norteamericana, la cual fue usada en el diseño de Laguna Verde.

Con respecto a la tecnología del reactor, se tienen los siguientes escenarios para tomar el que más convenga a CFE al momento de una licitación.

- Por ser el único con experiencia operacional, considerar un reactor del tipo ABWR.
- Realizar una licitación para adquirir un reactor tipo ABWR o AP-1000 o EPR, considerando que estos dos últimos tendrán algunos años de experiencia operacional para cuando la unidad de México entre en operación.
- Una licitación para adquirir un reactor del tipo Avanzado o Avanzado/Pasivo. En este caso se podrían considerar reactores tipo ABWR, EPR, APWR, ESBWR y AP-1000. Con este escenario se tiene la desventaja de considerar reactores sin experiencia ni en construcción ni en operación y la unidad nucleoelectrica mexicana podría ser prototipo.

3.3.- DISEÑOS CERTIFICADOS (ESTANDARIZADOS BAJO NORMAS AMERICANAS) E INGENIERÍA A DETALLE.

El proceso de licenciamiento de las nuevas unidades nucleoelectricas en los Estados Unidos estará basado en lo indicado en el 10CFR52, donde se contempla la certificación de los diseños y promueve la estandarización de las unidades nucleoelectricas. El Certificado lo que busca es resolver los asuntos relacionados con la seguridad antes de iniciar la construcción de una nueva unidad nucleoelectrica.

Actualmente la NRC ha certificado cuatro diseños de reactores:

1. Advanced Boiling Water Reactor, (ABWR), diseñado por General Electric Energy (Mayo 1997).
2. System 80+, diseñado por Westinghouse (Mayo 1997).
3. AP600 diseñado por Westinghouse (Diciembre 1999).
4. AP1000 diseñado por Westinghouse (Enero 2006).

Asimismo, se encuentran en revisión las solicitudes de certificación de los diseños siguientes:

1. AP1000 (Solicitud de enmienda). La solicitud de enmienda al diseño certificado del AP1000 fue por Westinghouse en julio de 2007 y su incorporación está programada para el 2010.
2. ESBWR. El 24 de agosto de 2005 General Electric solicitó la certificación del diseño del reactor ESBWR y su certificación se espera para el 2010.
3. EPR.- AREVA solicitó la certificación del diseño de su reactor EPR en diciembre de 2007 y se tiene programado su certificación el 2011.

4. US-APWR. En diciembre del 2007 Mitsubishi Heavy Industries solicitó la certificación del diseño de su reactor US-APWR. Se tiene programada su certificación para el 2011.

Con base a lo indicado anteriormente, para el año 2012, las tecnologías señaladas estarán certificadas bajo la normatividad norteamericana y disponible a nivel internacional.

Con relación a la Ingeniería de Detalle y documentos para Construcción, es importante determinar el alcance de la Ingeniería incluida en el Certificado, ya que este varía de acuerdo al tecnólogo propietario del diseño. A partir de la Ingeniería incluida en el Certificado, se desarrolla la Ingeniería de Detalle y la compra de equipos y componentes.

3.4 NUEVOS MÉTODOS CONSTRUCTIVOS

La experiencia reciente en la construcción de reactores avanzados muestra que un factor clave de éxito es el tiempo de construcción. Las técnicas constructivas más importantes que se han implementado recientemente y que han permitido reducciones significativas en los tiempos de construcción, son las siguientes:

Tecnología de Construcción	ABWR	ESBWR	AP1000	ACR-700
Prefabricación, preensamble y Construcción Modular	Si	Si	Si	Si
Estructuras de Concreto reforzadas con placas de acero	No	No	Si	No
Jalado y empalmes de cables	No	No	No	No
Tecnologías sobre la composición del Concreto	Si	Si	No determinado	Si
Soldadura con alta tasa de aporte	Si	Si	No determinado	Si
Soldadura robotizada	Si	Si	No determinado	Si
Modelado en 3D	Si	Si	Si	Si
Aplicaciones con posicionamiento (GPS y escaneo con láser)	Si	Si	No determinado	Si
Construcción desde arriba a techo abierto	Si	Si	Si	Si
Tubería doblada vs. Codos soldados	Si	Si	No determinado	Si
Dinamitado con Precisión/Remoción de rocas	Según sitio	Según sitio	Según sitio	Según sitio
Control y manejo avanzado de información	Si	Si	Si	Si

3.5.- PROGRAMA DE EJECUCIÓN DE UN NUEVO PROYECTO NUCLEAR.

La definición de un programa completo de construcción deberá incluir temas tan importantes como los siguientes:

- Preparación de la Especificación del Concurso.
- Preparación de las Ofertas por los Proveedores.
- Revisión de Ofertas y Firma de Contrato.
- Desarrollo de la Solicitud de la Licencia Combinada Construcción-Operación, (COL). Incluye el desarrollo de la Ingeniería de Detalle.
- Revisión de la COL por el Organismo Regulador.
- Construcción de la Planta.
- Pruebas de Arranque.

Los tiempos en cada una de las etapas dependen de cada tecnólogo y del alcance de la Ingeniería en el Certificado del diseño del reactor. El tiempo total del Proyecto puede estar entre 35 y 60 meses.

Tomando como base los programas genéricos emitidos por algunos tecnólogos y con la experiencia de la construcción de Laguna Verde, se desarrolló el siguiente programa para la construcción de una nueva unidad nucleoelectrónica en el sitio de Laguna Verde.

Etapa 1															
Actividad		Año 1								Año 2					
1	Contratación de una firma de Ingeniería Experimentada en Centrales Nucleoeléctricas Avanzadas	■	■												
2	Contratación de una firma experimentada en manejo de Opinión Pública	■	■												
3	Parámetros Específicos del Sitio	■	■												
4	Ejecución de Ingeniería para Preparación del Sitio	■	■	■	■	■	■	■							
5	Elaboración de la Especificación de Concurso	■	■	■	■										
6	Preparación de Oferta					■	■	■	■						
7	Revisión y Evaluación de Propuestas									■	■	■			
8	Negociación del Contrato											■	■		
9	Manejo de Opinión Pública		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		

Programa del Proyecto (1/3)

Etapa 2												
Actividad	Año 2				Año 3				Año 4			
10	Manifiesto de Impacto Ambiental, Permiso de Sitio y otros Permisos											
11	Preparación de COLA											
12	Ejecución de Ingeniería faltante para Adquisición de Equipos con tiempo de entrega largo y Documentos de Manufactura y Construcción para iniciar construcción											
13	Adquisición de Equipo con tiempo de entrega largo											
14	Supervisión de CFE de Actividades del Contratista											
15	Manejo de Opinión Pública											
16	Preparación del Sitio (caminos de acceso, campamento y oficinas CFE, preparación para suministro de servicios de construcción)											
17	Revisión de COLA, Manifiesto de Impacto Ambiental y Otros Permisos											

Programa del Proyecto (2/3)

Etapa 3		Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9
18	Adquisición de otros Equipos					
19	Ingeniería de Soporte a Construcción					
20	Adquisición de Materiales					
21	Administración de la Construcción					
22	Construcción (Instalación y Mano de Obra)					
23	Supervisión de CFE de actividades del Contratista					
24	Manejo de Opinión Pública					
25	Costos de Propietario (subestación, agua de enfriamiento, edificios administrativos)					
26	Arranque de Unidad					
27	Auditorías CNSNS					

Programa del Proyecto (3/3)

3.6.- SITIOS POSIBLES PARA LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO.

El Código de Regulaciones Federales de los Estados Unidos, 10CFR-100, así como la Guía de Seguridad 50.SG-SQ del Organismo Internacional de Energía Atómica, especifican los estudios y requisitos a cumplir para que un Sitio sea aprobado por el Organismo Regulador para la construcción de una unidad nucleoelectrónica.

La normatividad internacional indicada anteriormente se complementa con leyes y normas locales y nacionales y para su cumplimiento es necesaria la consideración de los siguientes aspectos:

- Distribución de población
- Disponibilidad de agua de enfriamiento
- La geología y sismicidad.
- Integración al Sistema Eléctrico Nacional.

- Vías de comunicación.
- Las condiciones meteorológicas.

En México, los estudios para selección de sitios con el propósito de construir centrales nucleoelectricas iniciaron en la década de los 60s del siglo pasado. Se consideraron en el estudio los sitios de: "Laguna Verde" y Casones en el Edo. de Veracruz; "El Tordo-Soto la Marina" en el Edo. de Tamaulipas; "Puerto Libertad" en el Edo. de Sonora; y "Zacatecas-San Luis Potosí" en los Estados del mismo nombre.

Desde el inicio de los estudios se hicieron evidentes las ventajas de Laguna Verde para construir ahí la primera Central Nucleoelectrica en el País. Con relación al resto de los sitios, se continuaron los estudios pero sin llevarlos a lo completo y detallado que requiere la normatividad, de tal manera que el contar con toda la información requerida puede llevar varios años.

3.7.- INFRAESTRUCTURA REQUERIDA.

La infraestructura requerida para la construcción de una unidad nucleoelectrica, depende en gran medida del proceso constructivo que se emplee. La metodología actual de construcción basada en la técnica modular ha demostrado su efectividad en la construcción de las modernas unidades nucleoelectricas en Japón y otros países de Asia. Por lo anterior, esta metodología deberá ser empleada en México para la construcción de las nuevas centrales nucleoelectricas.

La construcción modular requiere de talleres de primer orden que permitan trabajar en condiciones óptimas. Asimismo, se debe considerar durante la planeación y programación del Proyecto, el manejo, transporte e instalación de los módulos, considerando que un módulo puede pesar entre 200 y 1050 toneladas.

Además de los talleres se deben asignar áreas para habilitado, prefabricación de componentes, etc., que pueden oscilar entre 6000 y 25000 m², pudiendo llegar a 200,000 m² en total.

Además de lo anterior, se debe considerar en la infraestructura del Sitio toda aquella instalación temporal necesaria para la administración adecuada del Proyecto, como lo es almacenes, talleres, oficinas técnicas y administrativas, servicios y transporte de personal.

4.- ASPECTOS AMBIENTALES.

4.1.- EL IMPACTO AMBIENTAL EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

Toda tecnología de generación de energía eléctrica causa de manera directa o indirecta algún impacto ambiental. En el proceso de generación de energía eléctrica, el medio ambiente se puede ver afectado por Emisiones al Aire, Consumo, Usos y Descargas de Agua y Disposición de Residuos.

Emisiones al Aire. Las unidades de generación basadas en combustibles fósiles, son consideradas fuentes importantes de emisiones atmosféricas que pueden afectar la calidad del aire en el área local o regional, así como contribuir en el calentamiento global a mediano plazo. Los principales gases, emitidos como resultado de la combustión de combustibles fósiles, son: bióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), bióxido de carbono (CO₂) y partículas sólidas.

En México, la Norma Oficial Mexicana que regula las emisiones de óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y partículas suspendidas totales para las operaciones de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, es la NOM-085-ECOL-1994. Las emisiones del bióxido de carbono (CO₂), que ocasionan el efecto invernadero, no están normadas.

Las técnicas para el control de estos contaminantes se pueden clasificar en tres categorías: Sustitución de Combustibles (con menores contenidos de azufre y nitrógeno y combustibles más limpios); **Modificación a la Combustión** (modificación física u operacional de la caldera para el control de NO_x); y **El Control Después de la Combustión** (para el control de partículas y óxidos de nitrógeno y azufre. Se han desarrollado y se encuentran en uso diversas técnicas y equipos para el control de emisiones). Es importante indicar que hasta el momento no existe una técnica aprobada y en uso para el control de emisiones de bióxido de carbono.

Consumos, Usos y Descarga de Agua. El agua se usa cuando se toma de su cauce natural y se retorna a dicho cauce sin disminuir su calidad y volumen originales; en cambio, el agua se consume si durante el proceso de generación se alteran sus características fisicoquímicas, incluyendo disminución de volumen, o bien, si se vierte al alcantarillado o a una descarga de agua residual.

En las unidades termoeléctricas, carboeléctricas, ciclo combinados y nucleoeeléctricas, el uso y consumo de agua está dividido en tres áreas: Servicios, Repuesto al Ciclo Termodinámico y Enfriamiento.

1. **Servicios.** Este consumo comprende el requerido por el personal, áreas verdes, sistema contra incendios, lavado de precalentadores de aire, lavado de aisladores eléctricos y otras aplicaciones no relacionadas con el proceso de generación eléctrica. Esta agua proviene de algún acuífero u otras fuentes y es tratada para su consumo.

2. **Repuesto al Ciclo Termodinámico.** Este consumo de agua es para reponer al ciclo termodinámico el agua que se pierde por fugas de vapor y/o líquido. Esta agua proviene de algún acuífero u otra fuente y debe ser desmineralizada para cumplir los requerimientos fisico-químicos del agua del ciclo termodinámico.

3. **Enfriamiento.** Esta agua es requerida para los sistemas de enfriamiento, incluyendo el proceso de extracción del calor latente al vapor en el condensador principal. Para este enfriamiento se puede tener un sistema abierto o un sistema cerrado. En un sistema abierto, se usan cuerpos de agua que sean naturales y cercanos. Los sistemas cerrados pueden ser húmedos o secos. En los sistemas húmedos se tienen pérdidas por evaporación y en el caso de torres de enfriamiento, este consumo se incrementa de manera importante. Los sistemas secos utilizan enfriamiento con base en aire exclusivamente.

Descargas de aguas. El agua de servicio es usualmente descargada al alcantarillado o como agua residual. El agua de enfriamiento en los sistemas abiertos, una vez utilizada se conduce al cuerpo de agua original.

En México, todos los Usos y Descargas de Agua están sujetos a la Ley de Aguas Nacionales, su Reglamento y la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua, siendo la Comisión Nacional del Agua la encargada de la inspección y vigilancia en esta materia, así como también al cumplimiento de la NOM-001-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

En cumplimiento con la normatividad aplicable indicada anteriormente, en la CLV se tienen declaradas y establecidas las Condiciones Particulares de Descarga para las aguas residuales e industriales que se generan. Laguna Verde cuenta con un Sistema Abierto de Enfriamiento usando agua de mar.

El promedio de uso y consumo de agua en las unidades nucleoelectricas que están operando en los Estados Unidos y en la Central Laguna Verde son:

Sistema de Enfriamiento	Uso (litros/MWh)	Consumo (litros/MWh)
Abierto	119,000	519
Cerrado	4,164	2,362
Laguna Verde (abierto)	171,540	5.98

Es de notar que Laguna Verde requiere más caudal de agua de uso para enfriamiento que la mayoría de las unidades americanas porque la temperatura del agua de mar en Laguna Verde es más elevada. Por otra parte, el consumo de agua en Laguna Verde es mucho menor, debido principalmente a las pocas fugas que se presentan y a que el agua de las fugas es tratada, procesada e incorporada al ciclo termodinámico.

Desechos

En el caso específico de las unidades nucleoelectricas el origen, tratamiento, almacenamiento temporal y disposición definitiva de los desechos radiactivos

de actividad alta, media y baja, han sido descritos a detalle en las Secciones 1.3, 1.5, 2.4 y 2.5 de este Reporte.

4.2 EL ENTORNO ECOLÓGICO DE LA CENTRAL LAGUNA VERDE

La tecnología de las unidades nucleoelectricas está en el grupo de impacto ambiental bajo, conjuntamente con las energías renovables y las hidroeléctricas, con la ventaja que es la única capaz de suministrar grandes volúmenes de energía eléctrica base.

El Impacto Ambiental de la Central Laguna Verde (CLV). El Laboratorio de Dosimetría y Monitoreo Ambiental, a fin de evaluar los impactos ambientales de la operación de la Central desde su etapa preoperacional (1980-88) hasta la fecha, ha realizado una serie de vigilancias en la zona de influencia de la CNLV.

Después de 19 años de operación de la CNLV, 1988 - 2008, los análisis realizados para evaluar los impactos ambientales (Radiológicos y Ecológicos) producidos por la CNLV mostraron lo siguiente:

- **La actividad beta total detectada durante 2008 tiene el mismo comportamiento que en años anteriores y sus variaciones están comprendidas dentro de las que se han observado de 1981 a la fecha.**
- **En las muestras pertenecientes al monitoreo de rutas de exposición al hombre, no se detectaron radionúclidos que contribuyeran a incrementar la dosis de radiación.**
- **Los únicos radionúclidos artificiales que se han detectado son Cs-137 y Sr-90. Sin embargo, no son atribuibles a la operación de la CNLV, por dos razones: su origen es la detonación de armamentos nucleares y han llegado al área por lluvias radiactivas, y segundo, las concentraciones medidas están dentro de los límites establecidos en la etapa preoperacional.**
- **Las características bióticas, que pudieron haber sido afectadas por la descarga del agua de enfriamiento, no mostraron diferencias significativas entre las etapas pre y operacional, al igual que los promedios de densidad de organismos e índices de diversidad.**
- **Por lo tanto, el impacto ambiental de la descarga del agua de enfriamiento de la CNLV es mínimo, estadísticamente no detectable y se restringe a una área menor de 500 m de radio alrededor de la descarga.**

4.3.- GASES DE EFECTO INVERNADERO.

El término “efecto invernadero” se refiere al papel que desempeña la capa de gases que retiene el calor del sol en la atmósfera de la tierra. Los Gases de Efecto Invernadero son: Vapor de Agua (H₂O), Bióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Clorofluorocarburos (artificial), Óxidos de Nitrógeno (NO_x) y Ozono (O₃). Salvo los Clorofluorocarburos, todos ellos han existido de manera natural desde antes de la aparición del hombre, pero el uso intensivo de combustibles fósiles ha producido un incremento sensible de Óxidos de Nitrógeno y Bióxido de Carbono, agravado por la deforestación del Planeta.

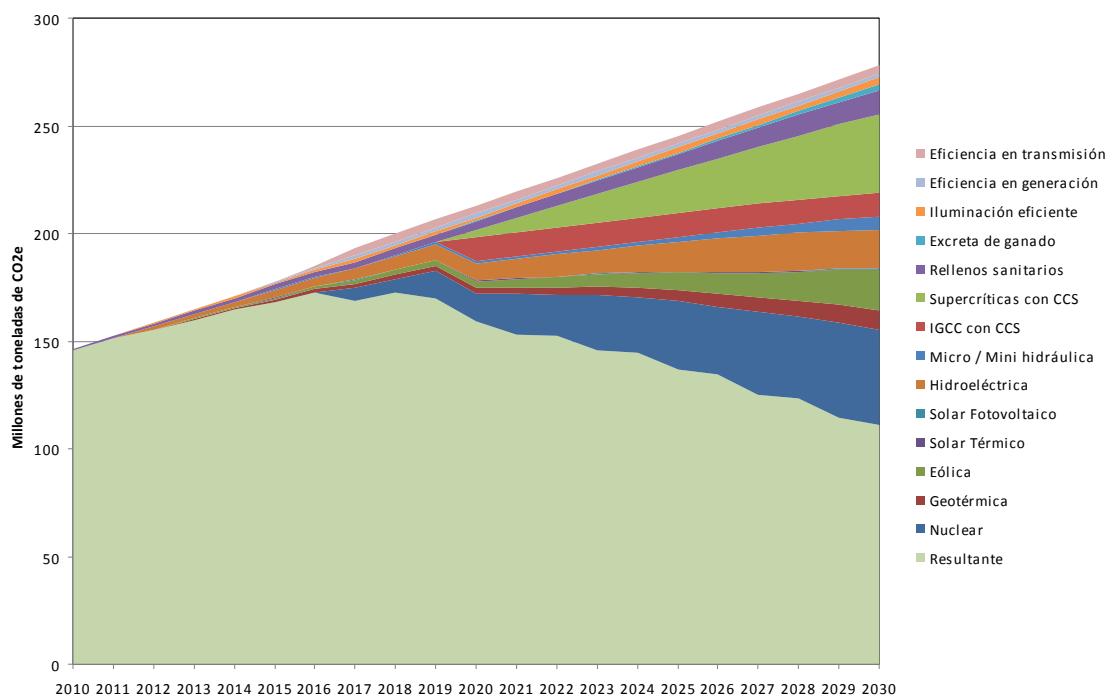
A nivel internacional, existe una alta preocupación por los efectos negativos que puede producir a toda la humanidad el fenómeno del calentamiento global producido por los gases de efecto invernadero. A continuación se presentan las conclusiones más importantes obtenida del “Tercer Informe de Evaluación Cambio Climático” desarrollado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático en 2001; y del reporte “The Economics of Climate Change” realizado por Stern Review.

1. Los beneficios de la adopción de medidas prontas y firmes sobre cambio climático superarán con creces los costos.
2. Las pruebas científicas apuntan a la existencia de riesgo cada vez mayor de que una actitud del mantenimiento del statu quo con respecto a las emisiones tenga consecuencias graves e irreversibles.
3. El cambio climático constituye una amenaza contra los elementos básicos de la vida humana, como por ejemplo, agua y producción de alimentos.
4. Aunque las emisiones han estado impulsadas por el crecimiento económico, la estabilización de las concentraciones de gases efecto invernadero en la atmósfera no es solamente viable sino compatible con un crecimiento sostenido.
5. Se ha calculado que los costos anuales de estabilización a 500-550 ppm de CO₂ serían del 1% del PIB para el 2050, nivel indudablemente significativo pero viable.
6. La política de reducción de emisiones deberá estar basada en tres elementos esenciales: asignación de precio al carbono (impuestos, comercio o reglamentación por emisión de carbono), política económica (apoyo para desarrollo de nuevas tecnologías) y eliminación de barreras al cambio (creación de condiciones que hagan posible medidas internacionales colectivas).

4.4.-PROPUESTAS DE MITIGACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

El sector eléctrico, con las tecnologías de generación actuales mediante combustibles fósiles, es la fuente principal de incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con otros sectores. El problema de estos gases es global y no tiene fronteras. No es de sorprender que se hayan preparado diversas propuestas de mitigación a nivel global, regional y nacional, en donde todas ellas presentan resultados muy similares.

Como ejemplo de uno de estos estudios, se presenta en la figura siguiente, el trabajo desarrollado para el sector eléctrico de México por el Centro Mario Molina, como apoyo en el desarrollo del Reporte de Impacto Económico del Cambio Climático. En este Reporte se presentan las estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero en el sector eléctrico mexicano.



Propuesta de mitigación de CO₂ –México.

Un denominador común de todas las propuestas de mitigación es que la tecnología nuclear está incluida en el portafolio de tecnologías de generación eléctrica que mitigan la emisión de gases invernadero. Para reducir las emisiones es necesario utilizar una mezcla de tecnologías que además de ocuparse de los gases de efecto invernadero, satisfagan otros requisitos, como la seguridad en el abasto de combustibles y por ende la generación de energía eléctrica, mediante la diversidad energética.

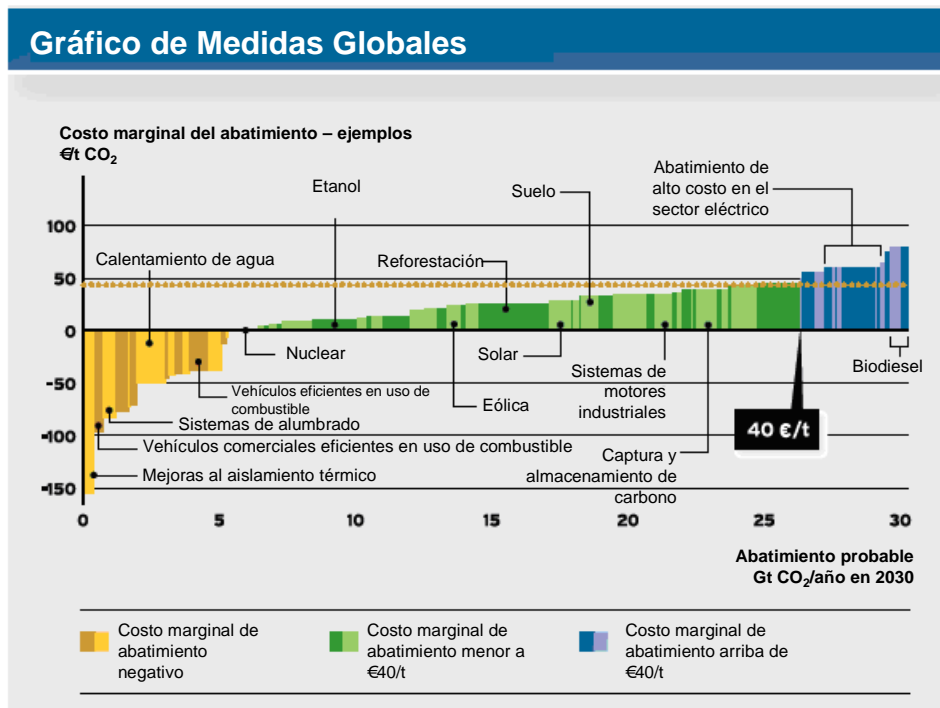
4.5.-COSTOS MARGINALES DE MITIGACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE LAS DIVERSAS TECNOLOGÍAS

La generación de energía eléctrica utilizando tecnologías libres de carbón tiene indudablemente un costo. En el próximo Capítulo se tratará con detalle la determinación del costo nivelado de generación en pesos/MWh o en USD/MWh.

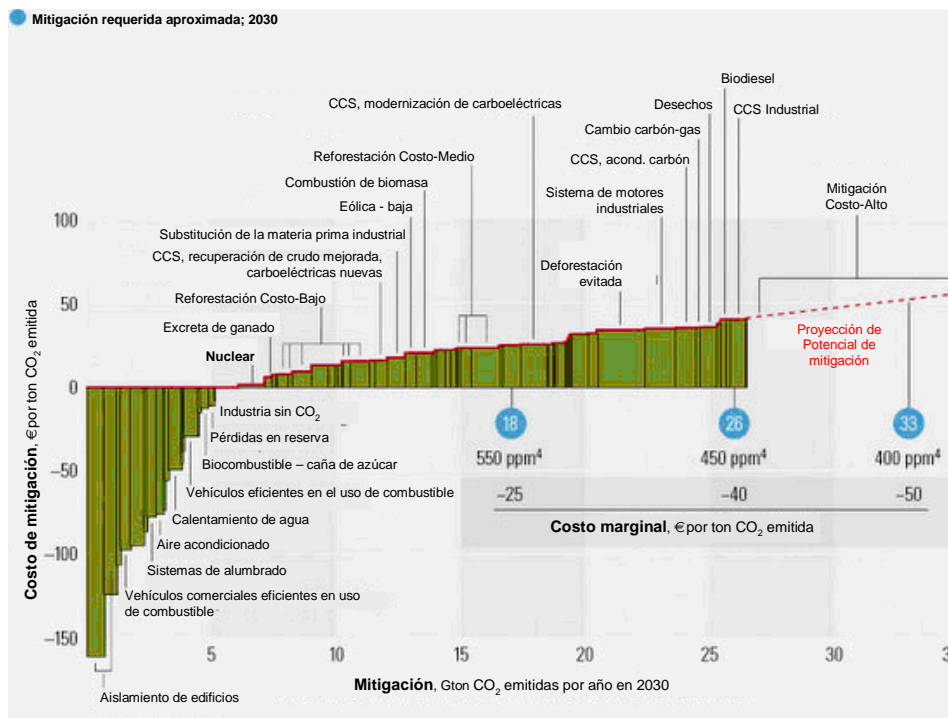
El costo nivelado de generación de cada tecnología depende de un conjunto de variables como son: el costo de la inversión, el costo del combustible, el costo de operación y mantenimiento, el factor de planta, la vida útil de la unidad de la generación, los costos de financiamiento y la tasa de descuento.

Para determinar el costo marginal de mitigación de una tecnología libre de carbón en USD/ ton CO₂ es necesario determinar la diferencia en el costo de generación de esa tecnología versus el costo de generación de la mezcla de combustibles fósiles, para dividirla entre las toneladas de emisiones de CO₂ evitadas por el uso de esa tecnología libre de carbón.

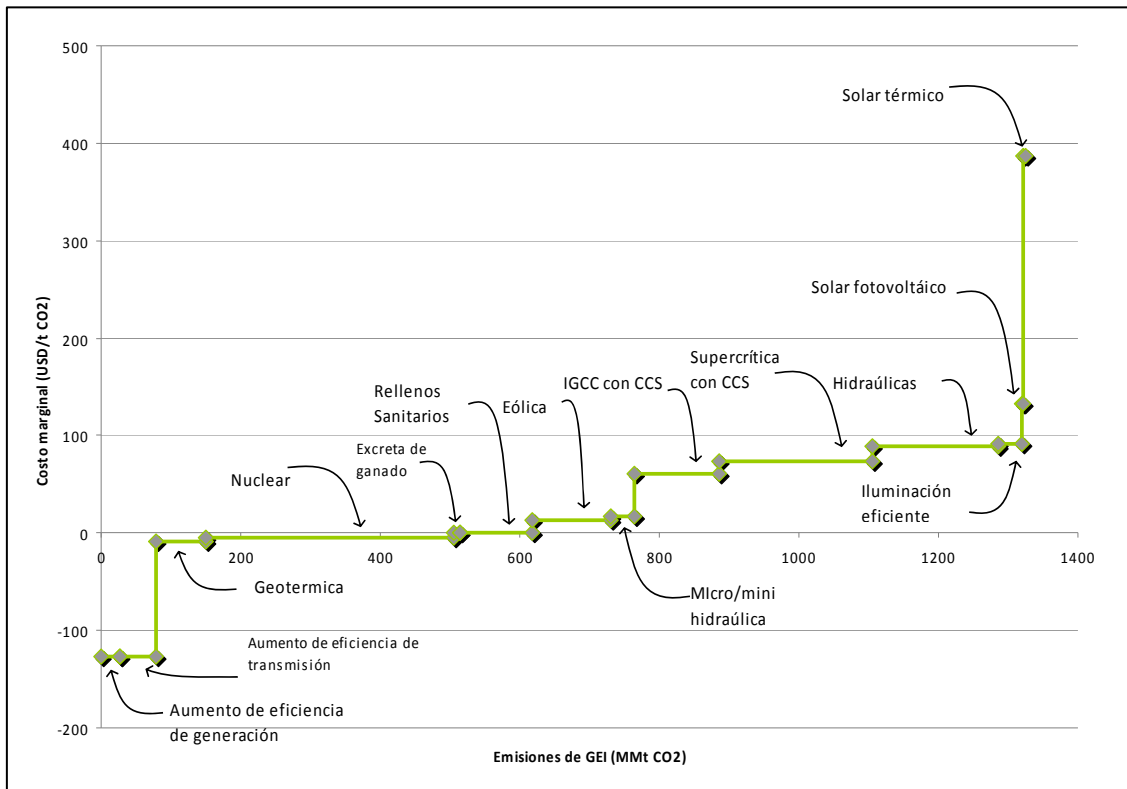
A continuación se muestran gráficas de costos marginales de mitigación en estudios realizados en diversos países.



Costo Marginal de Mitigación (Vaterfall)



Costo Marginal de Mitigación (McKinsey)



Costo Marginal de Mitigación (Centro Mario Molina).

En las gráficas anteriores se puede constatar que la tecnología nuclear tiene costos marginales muy bajos y que compite favorablemente con las energías renovables y tecnologías avanzadas de generación con combustibles fósiles, incluyendo la captura y el almacenamiento de carbono (CCS por sus siglas en inglés).

4.6 EMISIONES EVITADAS

En esta sección sólo se presenta el cálculo de las Emisiones/MWh de cada tecnología, ya que en el Capítulo siguiente los temas de costos serán abordados a profundidad.

En este sentido la comparación sólo es justa si se compara la tecnología nuclear con tecnologías de generación eléctrica basadas en combustible fósiles “quasi limpias”.

Tecnología	Generación Anual (MWh)	Emisiones Anuales (ton CO ₂)	Emisiones (ton CO ₂ /MWh)
Ciclo Combinado	4,905,600	1,895,033.28	0.3863
Ciclo Combinado con CSC	4,905,600	245,280	0.05
Carbón Supercrítica	4,905,600	3,877,386.24	0.7904
Carbón Supercrítica con CSC	4,905,600	569,049.6	0.116
IGCC	4,292,400	3,249,346.8	0.757
IGCC con CSC	4,292,400	485,041.2	0.113
Nuclear	11,037,600	0.0	0.0

Emisiones para diversas tecnologías

Los resultados que se muestran en la Tabla anterior indican que por ejemplo, por cada MWh que se genere con una carboeléctrica supercrítica se evitaría la emisión a la atmósfera de 0.7904 toneladas de CO₂/MWh si esta energía se generase con una nucleoelectrica o cualquier otra tecnología libre de carbono.

El mercado de transacciones de CO₂ está en desarrollo. En Europa occidental se encuentran valores entre 10 y 30 € por tonelada de CO₂, mientras que en los Estados Unidos se tienen valores cercanos a 25 USD por tonelada de CO₂. Con el objeto de apreciar el efecto en el costo nivelado del MWh generado por cada tecnología, a continuación se presentan estos efectos a 10,15, 20, 25 y 30 USD/ton CO₂:

Tecnología	Costo de Emisiones a 10USD/ton CO ₂ (USD/MWh)	Costo de Emisiones a 15USD/ton CO ₂ (USD/MWh)	Costo de Emisiones a 20USD/ton CO ₂ (USD/MWh)	Costo de Emisiones a 25USD/ton CO ₂ (USD/MWh)	Costo de Emisiones a 30USD/ton CO ₂ (USD/MWh)
Ciclo Combinado	3.863	5.7945	7.726	9.6575	11.59
Ciclo Combinado con CSC	0.5	0.75	1	1.25	1.50
Carbón Supercrítica	7.904	11.856	15.808	19.76	23.71
Carbón Supercrítica con CSC	1.16	1.74	2.32	2.9	3.48
IGCC	7.57	11.355	15.14	18.925	22.71
IGCC con CSC	1.13	1.695	2.26	2.825	3.39
Nuclear	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Costo de Emisiones

Por otro lado, Laguna Verde aportó el 4.5% de la generación total bruta del servicio público a nivel nacional, que fue de 232, 552 GWh durante el 2007, esto nos lleva a hacer una reflexión sobre la cantidad de emisiones contaminantes que las centrales eléctricas a base de combustibles fósiles emitieron a la atmósfera durante ese año, en la tabla siguiente se presentan los GWh y emisiones de CO₂ durante el 2007 para las tecnologías más importantes.

Tecnología	% de contribución	Factor IPCC (ton CO ₂ /GWh)	Generación (GWh)	Emisiones (Miles ton CO ₂)
Ciclo Combinado	44.2	386.3	102,787.98	39,706.99
Termoeléctrica convencional	21.3	817.0	49,533.57	40,468.93
Carboeléctrica	13.5	898.8	31,394.52	28,217.39
Nucleoelectrica	4.5	0.0	10,464.84	0.0
Geotermoeléctrica	3.2	0.0	7,441.66	0.0
Hidroeléctrica	11.6	0.0	26,976.03	0.0

Generación y Emisiones por tecnología durante el 2007.

5.- COSTOS DE UNA NUEVA NUCLEOELÉCTRICA.

5.1.- ENTENDIENDO COSTOS. SU INTEGRACIÓN Y SUPOSICIONES.

El análisis detallado de los costos de una unidad de generación eléctrica nueva requiere del entendimiento preciso de lo que se incluye en un conjunto dado de información de costos, particularmente cuando se comparan costos de diversas tecnologías de generación eléctrica. El costo de una unidad nueva se compone de tres elementos principales:

- **Costos de capital** (el costo de los equipos, materiales y mano de obra necesarios para construir la unidad de generación)
- **Costos de financiamiento.**
- **Costos de producción** (operación, mantenimiento y combustible).

Los costos de capital y financiamiento integran el **costo total del proyecto**. Los costos de capital, financiamiento y producción integran el **costo de generación**. El precio de contado de una unidad nueva de generación se le denomina **costo instantáneo** (no incluye financiamiento, inflación y escalación. Sí incluye la ingeniería, la procura y la construcción [EPC por sus siglas en inglés] además de incluir los costos del propietario). **Los costos del propietario incluyen infraestructura, además de costos de desarrollo y administración del proyecto, permisos, impuestos, servicios jurídicos y recursos humanos del propietario y su entrenamiento y capacitación.**

El costo total del proyecto debe incluir todos los costos de capital, contingencias y financiamiento. También puede considerar la escalación para inflar el valor del dinero al año en que se gastó.

Costos Externos, son aquellos costos o beneficios en que se incurre y que están directamente relacionados con la salud y el medio ambiente. Estos costos incluyen en particular los efectos de la contaminación del aire en la salud del público, cultivos agrícolas y edificios, así como las muertes ocupacionales y accidentes.

Costos Nivelados, expresa el costo medio del bien o servicio producido y es particularmente útil para comparar dos o más proyectos optativos para generar energía eléctrica.

Como las tecnologías de generación eléctrica son muy intensivas en capital, varios factores técnicos, económicos y financieros ocasionan variaciones en el costo de capital entre una tecnología y otra, así como de un proyecto de generación a otro. Estos factores pueden ser divididos en cuatro tipos:

Técnicos: Incertidumbre en fenómenos físicos, estadísticas limitadas de nuevas plantas e incertidumbre en factores de escala.

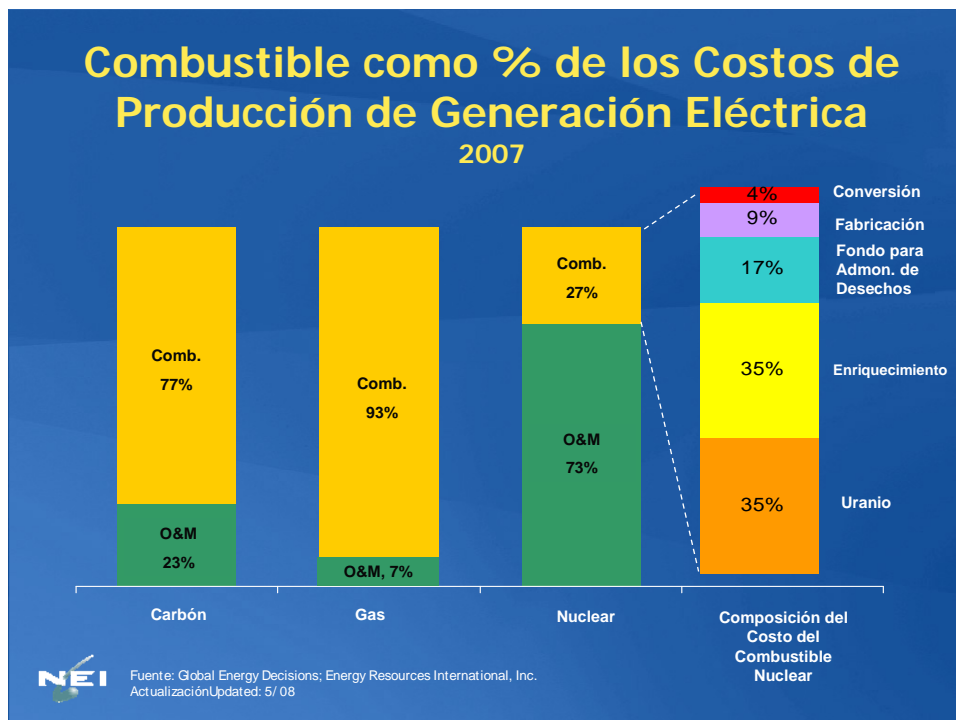
Estimaciones: Incertidumbres en estimados de costos basados en una ingeniería que no ha sido terminada.

Económicos: Incertidumbres que resultan de cambios no anticipados en los costos de capital, materiales y mano de obra.

Otros: Incertidumbres relacionadas con permisos, licenciamiento, regulaciones, huelgas y fenómenos naturales.

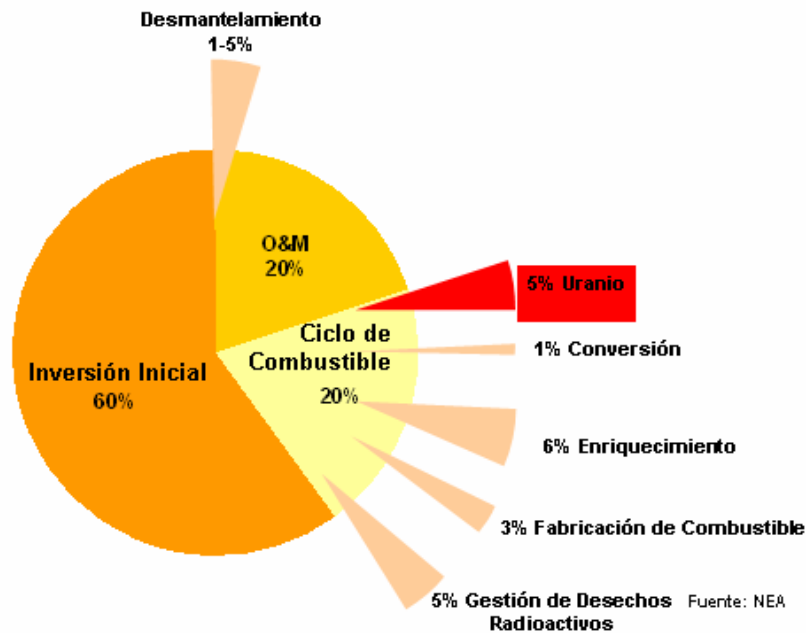
Es importante identificar si la estimación de costos ha sido realizada en moneda constante (no incluye inflación) o en moneda corriente (incluye los efectos de la inflación).

En cuanto a los costos de producción, esto es los costos de operación, mantenimiento y combustible, es importante apreciar la participación del combustible en dichos costos para diversas tecnologías, lo cual se muestra en la Figura siguiente:



La estructura de costos típica del costo nivelado del MWh de una unidad nucleoelectrónica se ilustra en la figura siguiente, en la cual es evidente la importancia del costo de capital:

Distribución de Costos típica de una Unidad de Generación Nuclear



Por otra parte, la información acerca del flujo de efectivo es necesaria porque proporciona las bases para evaluar la capacidad de un proyecto de generación de energía eléctrica, para generar efectivo y equivalentes al efectivo, así como las fechas que se producen y el grado de certidumbre relativa de su aparición.

5.2.- ESTIMACIONES RECIENTES DEL COSTO DE NUEVAS UNIDADES NUCLEOELÉCTRICAS.

La información más reciente y debidamente documentada respecto a la estimación de costos de generación eléctrica para varias opciones tecnológicas, está contenida en la publicación del Nuclear Energy Institute (NEI por sus siglas en Inglés), "The Cost of New Generation Capacity in Perspective" de agosto de 2008, de la cual se ha obtenido la mayor parte del material usado en el presente trabajo. La información contenida en el informe de la NEI, presenta el trabajo desarrollado por varias empresas y dependencias con el fin de estimar los costos de generación eléctrica para varias opciones tecnológicas. A continuación se presentan los resultados obtenidos por algunas empresas:

FLORIDA POWER AND LIGHT COMPANY (FP&L)

"El análisis de FP&L muestra que de todos los escenarios evaluados, en ocho de nueve, la incorporación de capacidad de generación de electricidad nueva por medios nucleares es económicamente superior respecto a la adición de nuevas unidades de CC (ciclo combinado) requeridas para suministrar la misma potencia, produciendo beneficios económicos directos superiores a los cliente. El único escenario en el cual

la energía nuclear no es claramente superior, es cuando el precio del gas natural es considerablemente más bajo que el precio actual y los costos futuros por emisiones de CO₂ son cero. De todos los escenarios evaluados, FP&L considera que estos dos son los menos probables. Incluso, en estos dos escenarios, los resultados de los análisis muestran que la generación de electricidad por medios nucleares es competitiva o tiene una ligera desventaja económica, mientras se conservan las ventajas no cuantificadas de diversidad del combustible, confiabilidad en el suministro del combustible e independencia energética.”

PROGRESS ENERGY FLORIDA

“En las evaluaciones preliminares, la generación de electricidad mediante la energía nuclear calificó mejor que las tecnologías de carbón pulverizado y combustión de carbón pulverizado en lecho fluidizado atmosférico (AFBC) y carbón IGCC, cuando se compararon con el caso de referencia que supone toda la generación con gas natural. Progress también concluyó que las unidades propuestas de generación nuclear 1 y 2 de Levy eran más económicas que el caso de referencia en donde toda la generación es a base de gas natural, cuando se evalúa sobre la base de los 60 años de vida operacional de cada unidad de generación nuclear y cumplimiento con las emisiones al medio ambiente.”

SOUTH CAROLINA ELECTRIC & GAS (SCE&G)

Al igual que FP&L y Progress, SCE&G analizó diferentes estrategias para satisfacer la demanda de electricidad de South Carolina. El análisis comparó a la energía nuclear, gas natural y carbón; examinó el cumplimiento de varias normas ambientales y los precios del combustible. **En todos los casos, SCE&G concluyó que la opción nuclear es la más competitiva a largo plazo:**

“Se puede apreciar que la estrategia del gas costaría a los clientes de SCE&G, \$15.1 millones por año más que la estrategia nuclear si una tonelada de CO₂ cuesta \$15 en 2012 y se escala el 7% anual. Con la tonelada de CO₂ en \$30, la ventaja del costo de la opción nuclear sería \$125.2 millones por año. Un precio del gas natural más alto, con el CO₂ en \$15 por tonelada demuestra una ventaja del costo de la opción nuclear de \$68.5 millones por año”.

Incluso en escenarios con las suposiciones desfavorables a la energía nuclear, la opción nuclear se considera la estrategia óptima:

“Si los precios del uranio tienden a la alza, la estrategia nuclear todavía tiene una ventaja positiva sobre la estrategia del gas por \$13.2 millones por año, pero si los precios del gas natural tienden a la baja, entonces la estrategia del gas tiene la ventaja sobre nuclear por \$44.9 millones por año. Además, si no hay legislación que imponga costos adicionales por emisiones de CO₂, la estrategia del gas tiene una ventaja de \$86.5 millones sobre la estrategia nuclear. Sin embargo, mientras los precios altos del uranio son posibles, estos no se esperan. Además, no parece razonable contar con precios del gas bajos o ninguna legislación que restrinja las emisiones de CO₂.”

CONNECTICUT INTEGRATED RESOURCE PLAN (IRP)

Connecticut Light and Power and United Illuminating contrataron al Brattle Group con el fin de realizar un estudio para determinar la tecnología que produjera la electricidad más barata. **Aunque se consideró el costo de capital más alto, la opción nuclear produjo la electricidad más barata, a excepción de la opción CC con gas natural sin CCS.** A continuación se presentan los resultados obtenidos para varias tecnologías.

	Nuclear	SCPC	SCPC c/CCS	IGCC	IGCC c/CCS	Gas CC	Gas CC c/CCS
Costo de Capital (\$/kWe)	4,038	2,214	4,037	2,567	3,387	869	1,558
Costo Nivelado (\$/MWh)	83.40	86.50	141.90	92.20	124.50	76	103.10

SCPC = carboeléctrica supercrítica; CCS = captura y almacenamiento de carbono; IGCC = ciclo combinado con gasificación integrada; CC = ciclo combinado.

CONGRESSIONAL BUDGET OFFICE (CBO)

CBO comparó el costo nivelado de las diversas tecnologías y encontró que excluyendo la legislación del dióxido de carbono y las iniciativas del EPAct, la opción nuclear es más barata que las nuevas tecnologías basadas en carbón y el gas natural pero es más costosa que la opción fósil convencional. Sin embargo, encontró que las restricciones por emisiones de dióxido de carbono tendrían un impacto muy positivo en la competitividad de la opción nuclear:

“En la ausencia de cargos por emisiones al medio ambiente e iniciativas del EPAct, las tecnologías convencionales basadas en combustibles fósiles dominarían la tecnología nuclear. Pero, incluso sin las iniciativas del EPAct, si los legisladores decretaran una ley que de lugar a un cargo por emisiones de dióxido de carbono de \$45 por tonelada métrica, la opción nuclear se vuelve una inversión más atractiva que el combustible fósil convencional, para la generación de electricidad. Si el costo por emisiones de dióxido de carbono estaba entre \$20 y \$45 por tonelada métrica, la opción nuclear tendrá preferencia sobre el carbón pero no sobre el gas natural.” CBO encontró que en un ambiente en donde el precio del gas natural es alto, alrededor de \$12/mmBtu (cerca de precios a principios del 2008), el gas natural ya no sería más competitivo que la opción nuclear.

ESTIMACIÓN DE COSTOS PARA TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN DE CARGA BASE.

Las empresas eléctricas están considerando varias tecnologías de generación para satisfacer sus necesidades de carga base. Además de la opción nuclear, muchas empresas del servicio público están buscando la aprobación para construir carboeléctricas supercríticas o unidades IGCC para satisfacer la demanda de electricidad futura. Estas tecnologías afrontan muchos de los mismos retos e incertidumbres de costos de la opción nuclear.

AMERICAN ELECTRIC POWER (AEP).

En marzo de 2008 Appalachian Power (subsidiaria de AEP) recibió la aprobación para construir la unidad IGCC de Mountaineer, de 629 Mwe, en Mason County, WV. El costo estimado de la unidad fue de \$ 1,550/kWe (dólares escalados al año en que se ejerce el gasto), basado en un estudio de el Electric Power Research Institute (EPRI). El costo nivelado resultó ser de \$ 56.2/MWh. Una unidad IGCC con CCS fue estimado en \$ 2,150/kWe y un costo nivelado de \$ 79.4/MWh.

Appalachian Power estima actualmente el costo del capital en \$ 2.23 MMD (dólares escalados al año en que se ejerce el gasto) o aproximadamente \$ 3,700.00/kWe no incluyendo AFDC. La nueva estimación incluye \$250 millones de escalación y contingencias para considerar las incertidumbres en productos y costos de mano de obra:

En el comunicado de junio de 2007, Appalachian Power también incluyó el análisis del costo del primer año de generación de una unidad IGCC sin CCS; el costo estimado rondaba entre \$78-84/MWh (dólares del 2006), dependiendo del contenido de azufre y el poder calorífico asociado del combustible. Con CCS, el costo estimado rondaba entre \$103-110/MWh.

DUKE ENERGY CORPORATION AND FLORIDA MUNICIPAL POWER AGENCY (FMPA) ET AL.

En febrero del 2007, la comisión de empresas del servicio público de North Carolina aprobó un certificado de conveniencia y necesidad pública a Duke Energy Carolinas para construir una unidad de generación de 800 MWe, en el sitio de Cliffside. En este documento, Duke estima que el costo del capital del proyecto será de \$1.8 MMD (alrededor de \$2,250/kWe) con un adicional de \$550-600 millones para AFUDC. Los detalles que sustentan los costos del capital del proyecto son del propietario y confidenciales.

En septiembre del 2006, un proyecto similar fue propuesto por un consorcio de empresas públicas de Florida para una carboeléctrica supercrítica de 765 MWe en el condado de Taylor, Florida. El costo total del proyecto fue estimado en \$1.7 MMD (dólares del 2012) (alrededor de \$2,200/kWe), incluyendo una escalación de los precios del 2.5% y \$135 millones de AFUDC, el cual fue calculado a una tasa de 5.0 %. En julio del 2007, el consorcio retiró voluntariamente su petición de ejecución del proyecto, debido a las preocupaciones por los cambios climáticos y el costo potencial de las emisiones de dióxido de carbono.

ESTIMACIONES DE COSTOS EN PERSPECTIVA.

Según lo indicado anteriormente, las nuevas unidades de generación pueden ser competitivas incluso si el costo total del proyecto excede los \$ 6,000/kWe. Estos resultados son confirmados por el modelo financiero del Nuclear Energy Institute (NEI) el cual indica que una unidad de generación nuclear con una estructura de capital 80% deuda / 20% acciones producirá electricidad en el intervalo de \$ 64/MWh a \$ 76/MWh, lo cual es competitivo con una unidad de CC quemando gas a \$ 6-

8/mmBtu o con una carboeléctrica supercrítica. A continuación se presentan los costos obtenidos mediante el modelo de financiamiento del NEI para varias tecnologías.

Tecnología	Nuclear		SCPC	IGCC		Ciclo Combinado Gas		
Estructura del Proyecto	PF LG 80/20	RB CWIP 50/50	RB CWIP 50/50	RB CWIP 50/50	PF LG 80/20	PF 50/50	PF 50/50	PF 50/50
Costo EPC (\$/kWe)	\$3,500-4,500		\$2,250	\$3,700		\$1,000		
Costo total (\$/kWe)	\$5,071-6,378	\$4,351-5,473	\$2,424	\$4,164	\$4,855	\$1,195	\$1,206	\$1,218
Costo de Combustible (nuclear - \$/MWh) (Gas/carbón - \$/mmBtu)	\$7.50		\$1.50	\$1.50		\$6.00	\$8.00	\$10.00
Capacidad (MWe)	1,400		800	600		400		
Primer año de Op. Comercial (Dol. 2007/MWh)	\$64.4-75.8	\$96.6-118.8	\$70.6	\$112.3	\$71.8	\$70.4	\$83.9	\$98.4

Costo de la Electricidad para varias tecnologías de generación (Modelo de Financiamiento del NEI)

ACTUALIZACIÓN DEL ESTIMADO DE COSTOS DEL TECNOLÓGICO DE MASSACHUSETTS (MIT POR SUS SIGLAS EN INGLÉS)

En 2009 el MIT procedió a actualizar su estimación de costos de generación de diversas tecnologías versus el estudio que había realizado en 2003. Los resultados de esta actualización se presentan a continuación:

	Costos de las tecnologías de generación de electricidad				
	Costo instantáneo USD/kW	Costo del combustible USD/mmBTU	Caso base c/kWh	Costo nivelado de generación	
				c/ cargo de 25USD por tCO ₂ c/kWh	c/ el mismo costo de capital c/kWh
[A]	[B]	[C]	[D]	[E]	
MIT (2003) <i>USD2002</i>					
Nuclear	2,000	0.47	6.7		5.5
Carbón	1,300	1.20	4.3	6.4	
Gas	500	3.50	4.1	5.1	
Actualización <i>USD2007</i>					
Nuclear	4,000	0.67	8.4		6.6
Carbón	2,300	2.60	6.2	8.3	
Gas	850	7.00	6.5	7.4	

5.3.- INFORMACIÓN DE COSTOS APORTADA A CFE POR EMPRESAS ELÉCTRICAS Y TECNÓLOGOS Y ESTRATEGIA DE REDUCCIÓN DE RIESGOS

Costos de capital instantáneos entre 3,000 y 4,000 USD/KW se anticipan para las nuevas unidades nucleoelectricas en dólares 2008, mientras que una carboeléctrica tendría un costo de capital instantáneo entre 1,500 y 2,500 USD/KW, sin considerar los costos inherentes a las externalidades por emisión de contaminantes. Los que proponen la nucleoelectricidad argumentan que las empresas eléctricas encuentran grandes beneficios en una tecnología que ponga el riesgo financiero al inicio del proyecto mientras la unidad se está construyendo, resultando en una vulnerabilidad muy baja durante la operación de esta unidad. Como es de esperarse los oponentes a la nucleoelectricidad argumentan que es más conveniente administrar los riesgos generados por las variaciones en los costos de los combustibles fósiles y modificaciones en las regulaciones ambientales, durante la vida operacional de otras tecnologías de generación.

El costo de una unidad nucleoelectrica está íntimamente relacionado con:

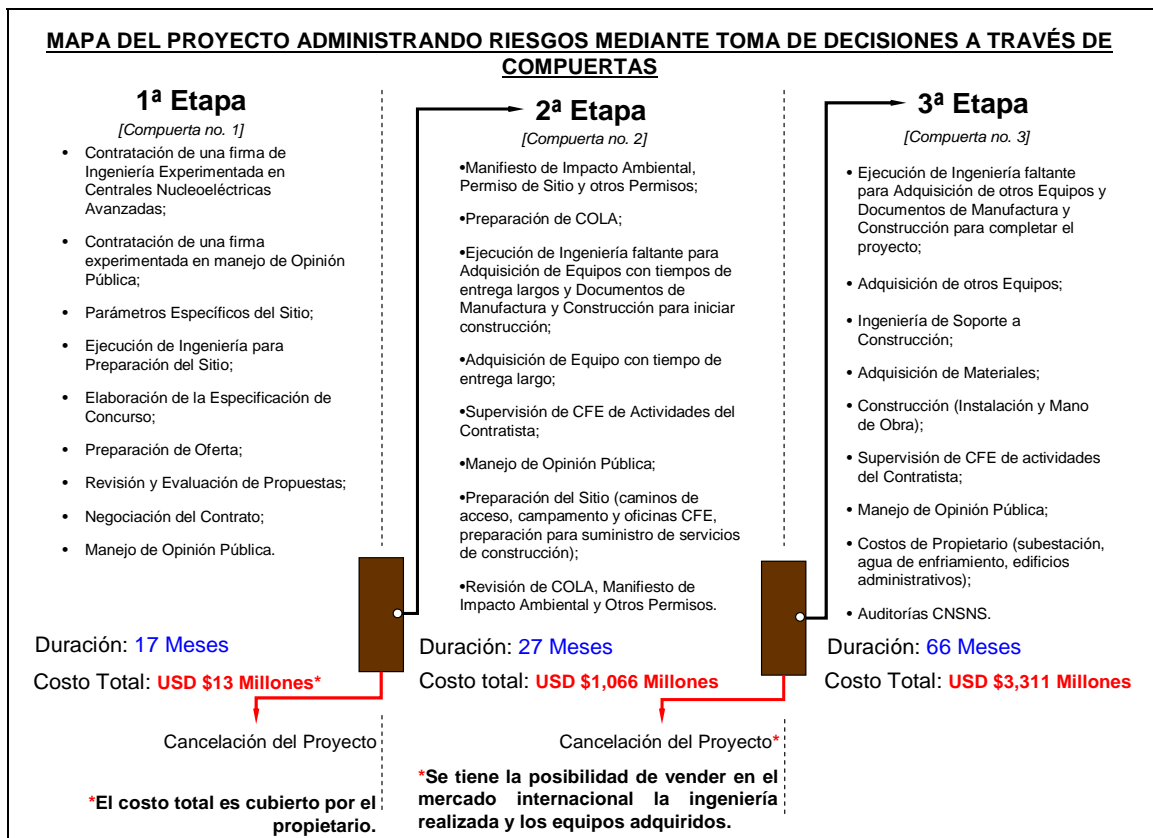
- **Los riesgos percibidos del proyecto, los cuales a su vez afectan la tasa de interés.**
- **El tiempo de ejecución del proyecto, que al aplicar la escalación y las tasas de interés afectan el costo del proyecto.**

Por lo anterior, se han desarrollado diversas estrategias para reducir los riesgos, destacando el Estudio de los Productores de Petroquímica de la Texas Gulf Coast Nuclear. En este Estudio se pretende reducir los riesgos más importantes del proyecto al inicio de este, cuando las inversiones de capital son bajas. Resalta en esta estrategia el hecho de que el proyecto puede ser retrasado o cancelado en cualquier momento antes de iniciar la construcción; la construcción se contrata una vez que se ha otorgado la licencia COL y el financiamiento aprobado; construir la unidad en el precio cotizado; y neutralizar la oposición al desarrollo del proyecto.

Dentro de esta estrategia de la Texas Gulf Coast Nuclear vale la pena señalar algunas cifras relevantes:

- **Los costos de propietario (desarrollo del proyecto, licenciamiento y preparación del sitio) se estiman en 10% del costo EPC para un sitio verde y entre 5 y 7% para un sitio existente.**
- **Los ahorros en la construcción para una 2ª unidad en el mismo sitio se estiman en 10% del costo instantáneo de la 1ª unidad.**
- **La variable clave es el % de avance en la ingeniería. Entre mayor sea el avance en la ingeniería, mayor certeza se tendrá en el costo EPC.**

La estrategia de la Texas Gulf se ha adaptado para el caso específico de una nueva unidad nucleoelectrica a ser construida en el mismo sitio de la central Laguna Verde. Para el desarrollo de esta estrategia se tiene un Mapa del Proyecto que incluye compuertas (puntos de chequeo), en las cuales se verifica la terminación satisfactoria de las actividades, antes de proceder con la etapa siguiente del proyecto. Este mapa se presenta en la Figura que sigue:



Con este Mapa del Proyecto propuesto, el 25% de los recursos financieros son aportados por CFE, durante la ejecución del proyecto, mientras que el 75% restante se obtiene de otras fuentes. Los recursos que aporta la CFE se destinan principalmente al desarrollo de la ingeniería faltante lo que contribuirá a la reducción de la incertidumbre en la estimación del costo de los materiales y la construcción, como se ha descrito anteriormente, y al pago de los costos del propietario lo cual es ineludible. Por otra parte los recursos que se obtengan de otras fuentes de financiamiento se aplicarán al pago de los equipos, materiales, instalación y mano de obra. En el Capítulo 6 se trata con detalle el financiamiento de una unidad nucleoeléctrica nueva.

5.4.- CALCULO DEL COSTO NIVELADO.

Es importante señalar la importancia de comparar la generación de electricidad mediante tecnologías limpias, por lo cual cuando se emplean combustibles fósiles se considera la captura y almacenamiento de carbón (CCS). **La Internacional Energy Agency señala en 2008 que la aplicación de la Captura y Almacenamiento de Carbón incrementa los costos de producción de unidades fósiles de carbón o gas entre 20 y 40 USD/MWh y que a partir del 2030 este incremento disminuirá a valores entre 10 y 30 USD/MWh. Para propósitos de estos cálculos se considera un valor de 25 USD/ton CO₂, el cual es muy razonable.**

El costo nivelado de generación de las diferentes tecnologías se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{Costo Nivelado (CN) de Generación} = \text{CN Inversión} + \text{CN Operación y Mantenimiento} + \text{CN Combustible}$$

El resultado es el siguiente:

Costo de Generación sin Costo de Emisiones ni los Fondos de Reserva Nuclear

Conceptos	CC	CC + CCS	IGCC	IGCC + CCS	SCPC	SCPC + CCS	Nuclear
Costo de Inversión Nivelado (USD/MWh)	14.29	31.58	69.41	112.49	38.34	101.18	71.26
Costo de Operación y Mantenimiento (USD/MWh)	4.62	6.82	14.35	20.45	9.04	15.14	13.70
Costo de Combustible (USD/MWh)	55.77	64.73	10.02	11.76	28.88	33.91	4.90
Costo Nivelado de Generación (USD/MWh)	74.68	103.13	93.78	144.70	76.26	150.23	89.86

Costo de Generación sin Costo de Emisiones y sin Fondos de Reserva Nucleares

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 Fondo 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 Fondo 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 Fondo 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

Costos Nivelados de Generación

5.5 FLUJO DE EFECTIVO DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE UNA UNIDAD NUCLEOELÉCTRICA NUEVA.

El desglose del costo de inversión instantáneo así como el flujo de efectivo correspondiente a la inversión de una nueva unidad nuclear de 4,390 millones de USD utilizado en la Sección precedente es el siguiente:

Año	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	Subtotal
Equipo Isla Nuclear		\$114.42	\$196.15	\$196.15	\$196.15	\$196.15				\$ 899.00
Equipo Balance de Planta		\$ 87.05	\$149.24	\$149.24	\$149.24	\$149.24				\$ 684.00
Materiales Isla Nuclear				\$ 16.67	\$ 50.00	\$ 50.00	\$ 50.00	\$ 50.00	\$33.33	\$ 250.00
Materiales Balance de Planta				\$ 18.20	\$ 54.60	\$ 54.60	\$ 54.60	\$ 54.60	\$36.40	\$ 273.00
Mano de Obra Isla Nuclear				\$ 46.67	\$140.00	\$140.00	\$ 140.00	\$140.00	\$93.33	\$ 700.00
Mano de Obra Balance de Planta				\$ 48.27	\$144.80	\$144.80	\$ 144.80	\$144.80	\$96.53	\$ 724.00
Ingeniería de Diseño		\$ 50.91	\$ 87.27	\$ 87.27	\$ 87.27	\$ 87.27				\$ 400.00
Administración de la Construcción				\$ 20.13	\$ 60.40	\$ 60.40	\$ 60.40	\$ 60.40	\$40.27	\$ 302.00
Ingeniería de Soporte a Construcción				\$ 1.80	\$ 5.40	\$ 5.40	\$ 5.40	\$ 5.40	\$ 3.60	\$ 27.00
Servicios de Arranque de Unidad									\$22.00	\$ 22.00
Ingeniería para preparación del sitio	\$2.00									\$ 2.00
Determinación Parametros Especificos del Sitio	\$1.00									\$ 1.00
Proceso de Licitación del Proyecto	\$5.33	\$ 4.67								\$ 10.00
Manifiesto de Impacto Ambiental		\$ 2.33	\$ 1.67							\$ 4.00
Preparación de Documentos de Licencia		\$ 7.00	\$ 5.00							\$ 12.00
Supervisión de CFE a Actividades del Contratista		\$ 5.19	\$ 8.89	\$ 9.93	\$ 12.00	\$ 12.00	\$ 12.00	\$ 12.00	\$ 8.00	\$ 80.00
										Gran Total
Total Anual	\$8.33	\$271.57	\$448.21	\$594.31	\$899.85	\$899.85	\$467.20	\$467.20	\$333.47	\$ 4,390.00
Porcentaje de Inversión	0.19%	6.19%	10.21%	13.54%	20.50%	20.50%	10.64%	10.64%	7.60%	100.00%

Y los porcentajes de inversión anualizada para diferentes tecnologías son como sigue:

Año	CC + CCS	IGCC + CCS	SCPC + CCS	Nuclear	Nuclear (Millones de USD)
-9				0.19	8.33
-8				6.19	271.57
-7				10.21	448.21
-6				13.54	594.31
-5				20.50	899.85
-4		33.70	11.00	20.50	899.85
-3	7.60	34.50	60.10	10.64	467.20
-2	71.90	16.60	24.30	10.64	467.20
-1	20.50	15.20	4.60	7.60	333.47
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Flujos de Inversión de Diversas Tecnologías (%)

5.6.- ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Es importante determinar el grado de sensibilidad del costo nivelado de generación al variar ciertos parámetros y analizar los resultados para las diversas tecnologías.

Costo Nivelado de Generación con Costo de Emisiones y Fondo de reserva Nuclear(USD/MWh)	CC	CC + CCS	IGCC	IGCC + CCS	SCPC	SCPC + CCS	Nuclear
Tasa de descuento 9%	81.12	97.28	95.53	119.70	86.66	128.43	67.58
Tasa de descuento 10%	82.17	99.58	101.01	128.57	89.65	136.32	74.58
Tasa de descuento 11%	83.24	101.95	106.74	137.85	92.78	144.56	82.00
Tasa de descuento 12%	84.34	104.38	112.71	147.53	96.02	153.13	89.86
Tasa de descuento 13%	85.46	106.87	118.91	157.58	99.38	162.00	98.17
Tasa de descuento 14%	86.61	109.41	125.34	168.01	102.86	171.18	106.94
Tasa de descuento 15%	87.78	111.99	131.99	178.79	106.45	180.64	116.18

Sensibilidad a Tasa de Descuento

Costo Nivelado de Generación con Costo de Emisiones y Fondo de reserva Nuclear(USD/MWh)	CC	CC + CCS	IGCC	IGCC + CCS	SCPC	SCPC + CCS	Nuclear
Costo de Combustible -40%	62.03	78.49	108.70	142.82	84.47	139.56	87.90
Costo de Combustible -20%	73.18	91.43	110.70	145.18	90.24	146.35	88.88
Costo de Combustible -10%	78.76	97.91	111.70	146.35	93.13	149.74	89.37
Costo de Combustible Ref.	84.34	104.38	112.71	147.53	96.02	153.13	89.86
Costo de Combustible +20%	95.49	117.33	114.71	149.88	101.80	159.91	90.84
Costo de Combustible +50%	112.22	136.75	117.72	153.41	110.46	170.08	92.31
Costo de Combustible +100%	140.11	169.11	122.73	159.29	124.90	187.03	94.76

Sensibilidad al Costo de Combustibles

Costo Nivelado de Generación con Costo de Emisiones y Fondo de reserva Nuclear(USD/MWh)	CC	CC + CCS	IGCC	IGCC + CCS	SCPC	SCPC + CCS	Nuclear
Costo de emisiones a 10 USD/ton CO ₂	78.54	103.63	101.35	145.83	84.16	151.39	89.86
Costo de emisiones a 15 USD/ton CO ₂	80.47	103.88	105.14	146.40	88.12	151.97	89.86
Costo de emisiones a 20 USD/ton CO ₂	82.41	104.13	108.92	146.96	92.07	152.55	89.86
Costo de emisiones a 25 USD/ton CO ₂	84.34	104.38	112.71	147.53	96.02	153.13	89.86
Costo de emisiones a 30 USD/ton CO ₂	86.27	104.63	116.49	148.09	99.97	153.71	89.86
Costo de emisiones a 35 USD/ton CO ₂	88.20	104.88	120.28	148.66	103.92	154.29	89.86

Sensibilidad al Costo de Emisiones

Tiempo de Construcción	Costo Nivelado USD/MWh
4 años	83.82
5 años	89.86
6 años	96.97
7 años	104.86
8 años	113.63

Sensibilidad al Tiempo de Construcción Nuclear

Costo de Inversión al Inicio de la Operación (Millones USD)	Costo Nivelado USD/MWh
6,077	79.80
6,577	84.84
7,077	89.86
7,577	94.91
8,077	99.94

Sensibilidad a Cambios en el Costo de Inversión al Inicio de la Operación Nuclear

Vida Útil	Costo Nivelado USD/MWh
30 años	92.24
40 años	90.56
50 años	90.03
60 años	89.86
80 años	89.79

Sensibilidad a la Vida Útil de la Unidad Nuclear

Factor de Planta	Costo Nivelado USD/MWh
80%	98.77
85%	94.06
90%	89.86
93%	87.56
95%	86.11

Sensibilidad al Factor de Planta de la Unidad Nuclear

6.0 FINANCIAMIENTO

La evaluación de las opciones y esquemas financieros para la construcción de una o varias unidades nucleoelectricas requiere considerar diversas indefiniciones, para las cuales no es posible contar con información precisa. Sin embargo, es posible especificar varios supuestos y principios básicos. A partir de estos es posible evaluar las distintas opciones financieras.

Se parte de una estructura de capital para el proyecto en si, que considera una aportación parcial de capital y financiamientos provenientes de varias fuentes. En este caso la estructura de capital considerada es más bien “tradicional” para este tipo de proyectos, es decir, 80/20. (80% de crédito y 20% de capital, aportado por el gobierno federal). El “apalancamiento” del proyecto es entonces de 4 a 1. El financiamiento se irá pagando (amortizaciones) a partir del momento en que la primera unidad comience su operación comercial.

6.1 CONTEXTO GENERAL DEL FINANCIAMIENTO

La evaluación de la conveniencia y viabilidad financiera de construir nuevas unidades nucleoelectricas en México debe ubicarse en un contexto amplio. Se debe buscar mayor diversificación tecnológica, menor riesgo, mayores efectos multiplicadores, mayor desarrollo tecnológico, entre otros objetivos. Las inversiones son de largo plazo, como también lo son las implicaciones financieras y los requerimientos de cualquier estrategia, nuclear o convencional. En este contexto, el horizonte de planeación del sector debe ser de muy largo plazo. **El conocimiento sobre la evolución futura de precios y costos es imperfecto, pero se percibe que las consecuencias de no actuar serían catastróficas.**

En el ámbito internacional, se percibe que la generación nucleoelectrica tiene tres ventajas importantes:

- **Primero, reducción en las emisiones de CO₂.**
- **Segundo, costos de generación de electricidad altamente estables, pues no están relacionados con los costos de los combustibles fósiles, altamente volátiles y de tendencia al alza.**
- **Tercero, mayor seguridad de abastecimiento del combustible.**

La nucleoelectricidad es claramente competitiva, en un contexto amplio, que incorpore las externalidades hasta ahora excluidas de los costos de operación de las tecnologías tradicionales (o que las considere para fines de evaluación), sin incluir el apoyo de subsidios similares a los que recibe la generación de energía “renovable” que en general ha recibido grandes subsidios en los países que han desarrollado dichas tecnologías

Los costos ambientales son de gran importancia, como también lo son los objetivos de desarrollo de largo plazo. Igualmente, las tendencias de la economía mundial, y en particular la evolución de los precios de los combustibles fósiles o los límites y costos de las tecnologías renovables, son aspectos relevantes en el análisis de las mejores opciones de crecimiento para la generación eléctrica. Considerando estos elementos, la generación

nucleoeléctrica es claramente competitiva, como se muestra en el Capítulo 5. Sin embargo, los cambios profundos en los esquemas financieros internacionales y el desplome de los mecanismos de financiamiento privado con alto apalancamiento, obligan a replantear las soluciones financieras para grandes proyectos. Se han encarecido los esquemas de financiamiento netamente privados, al reevaluarse el riesgo y los modelos de diversificación vigentes en la última década

La creciente conciencia ecológica a nivel mundial, y los compromisos asumidos por diferentes países, orientan el desarrollo tecnológico y la normatividad internacional, hacia fuentes distintas de energía. Ello incluye tanto las llamadas “fuentes alternas” -eólica, solar, biomasa, biocombustibles, mareas - como la energía nuclear y las tecnologías para reducir la contaminación, tales como CCS (captura y secuestro de carbón). En este contexto, se da un proceso de reevaluación de la energía nuclear en el mundo, desde varios puntos de vista:

- **Costos de generación competitivos si se considera un costo ambiental en niveles acordes a la discusión internacional.**
- **Efecto ambiental positivo, en cuanto a la no emisión de carbono.**
- **Impulso económico y tecnológico de gran importancia para las economías nacionales.**
- **Búsqueda de esquemas de financiamiento adecuados, según las condiciones de cada país.**

La comparación de México con el resto del mundo muestra claramente que México se quedó rezagado con respecto al desarrollo nucleoelectrico. En 1990, cuando Laguna Verde 1 entró en operación, existían ya 246 reactores en operación fuera de Estados Unidos. Hoy día existen 332, y 104 en los Estados Unidos para un total a nivel mundial de 436. Habiendo superado los obstáculos iniciales que implicó Laguna Verde, los esfuerzos se abandonaron por la crisis de 1995 y se perdió mucho del avance logrado.

En suma, es útil evaluar las oportunidades y los retos financieros, económicos y tecnológicos que la electricidad nuclear significa para México.

6.2 EXPERIENCIAS INTERNACIONALES

De acuerdo a la estructura económica del sector eléctrico y al marco jurídico vigente, distintos países han adoptado diferentes enfoques para apoyar a la industria nuclear. Ello es consecuencia de la necesidad de reactivar el desarrollo de esta actividad, después de un largo periodo de relativa inactividad, pero sobre todo de la elevada prioridad que los países otorgan al sector energético en su desarrollo. Dicha prioridad va mucho más allá que la sola producción de electricidad o de hidrocarburos. De hecho, en países como Francia es componente básico de la estrategia nacional de crecimiento y desarrollo.

En Europa y Estados Unidos, y por supuesto en los países asiáticos más desarrollados, se ha considerado a la industria nuclear como factor

importante para la competitividad internacional, y como una fuente generadora de empleos y exportaciones.

En Estados Unidos la electricidad de origen nuclear representa cerca del 20 por ciento de la generación de electricidad total. A pesar del alto grado de importancia de la nucleoelectricidad en Estados Unidos, dicho país no ha construido nuevos reactores recientemente. Los más nuevos entraron en operación en 1993 y 1996. Sin embargo, la tendencia observada en años recientes, hacia el aumento en los precios del petróleo y el gas natural, ha llevado a dicho país a replantear sus políticas. Así, ha diseñado diversas medidas, a partir de The Energy Policy Act de 2005. **Esta Ley establece diversos esquemas de apoyo para fomentar la inversión en el aumento de la capacidad de generación nucleoelectrica.**

Adicionalmente a lo anterior, algunos estados de la Unión Americana ofrecen también diversos tipos de apoyos. En el caso de los estados que regulan las tarifas eléctricas a través de agencias regulatorias sectoriales, varios tipos de apoyo se han ofrecido. Entre los principales pueden citarse los siguientes:

- Evaluación previa de la “necesidad y razonabilidad” de la unidad por parte del Regulador del gobierno del estado, lo cual conlleva la garantía de la recuperación de costos y da certidumbre a los mercados financieros.
- Revisión periódica de los costos de construcción, lo cual asegura que el total de este monto se incorporará a la base para el cálculo de tarifas una vez que la unidad entra en operación.
- En algunos casos, igualmente, se permite la recuperación de los costos financieros (intereses) acumulados durante la construcción de una unidad, con base en las tarifas eléctricas vigentes. Disminuye la carga financiera que debe pagarse al momento de terminar la unidad y durante la operación de la misma, ya que los costos financieros durante la construcción pueden llegar a representar más del 30 por ciento del costo total de una unidad al momento de iniciar su operación.
- En estados donde las tarifas no están reguladas, y por lo tanto el mecanismo señalado no operaría directamente, un mecanismo que se utiliza es el compromiso de largo plazo para compra de energía, por parte de grandes consumidores, públicos o privados.

Varios estados han aprobado diversas medidas legislativas en apoyo a la construcción de nuevas nucleoelectricas. Son los siguientes trece: Florida, Georgia, Iowa, Kansas, Louisiana, Michigan, Mississippi, North Carolina, Ohio, South Carolina, Texas, Virginia, Wisconsin.

El otorgamiento de este tipo de apoyos reconoce la complejidad y larga duración del proceso de autorización, que obliga a tomar decisiones de manera oportuna, a fin de evitar costos importantes a futuro

Con relación a América Latina, son Brasil, México y Argentina los países que cuentan con unidades nucleoelectricas en operación. **Unicamente Brasil ha anunciado, a través del Ministro de Minas y Energía, incentivos fiscales para la construcción de la unidad nucleoelectrica Angra 3, colocando al proyecto dentro del Régimen Especial de Incentivos Fiscales para el**

Desarrollo de Infraestructura (REIDI). Esta unidad es un reactor tipo PWR de 1,220 MWe y se tiene contemplado iniciar su operación a fines del 2014.

A mediano plazo, las perspectivas de la energía nuclear en Europa son altamente favorables. Se le ve como competitiva con otras fuentes de generación, ante las tendencias de largo plazo, como el aumento de precio de los combustibles fósiles y el probable establecimiento de un costo por las emisiones de CO₂. No se contempla en Europa una situación en la que los gobiernos concedan subsidios explícitos a la energía nuclear, como es el caso en EUA. En Francia, sin embargo, desde la década de los setenta, el gobierno francés ha apoyado fuertemente a las empresas involucradas en todos los aspectos de la energía nuclear.

Dado que cuando menos la mitad del riesgo de un proyecto es función del largo periodo de gestación y de la incertidumbre que actualmente existe en relación al costo final, una primera diferencia es si los costos financieros se pagan durante la construcción o se capitalizan. En todo caso, en el largo plazo, es inevitable que los costos se reflejen en las tarifas eléctricas, en cualquier tipo de mercado, se trate de mercados sujetos a regulación gubernamental o de otros con esquemas de mayor competencia.

Desde el punto de vista del financiamiento vía deuda, la fijación de precios a los que se puede vender la electricidad es la opción preferida por los otorgantes del servicio de energía eléctrica. Igualmente, desde el punto de vista de la evaluación de riesgos por parte de las instituciones otorgantes de crédito. Sin embargo, es difícil lograrla en mercados competitivos. En el caso de México, la situación que enfrentan los PIEs (Productores Independientes de Energía) es muy favorable ya que a final de cuentas, CFE paga los costos y asume los riesgos, lo cual asegura un rendimiento financiero para dichos productores. Sin embargo, dado el carácter paraestatal de CFE, en el fondo los costos de la garantía implícita otorgada recaen sobre las finanzas públicas, al igual que si el financiamiento hubiera sido otorgado directamente a una entidad paraestatal.

Por lo tanto, un elemento básico de la estrategia financiera debe ser el diseño de compromisos y fórmulas que permitan asegurar los ingresos provenientes de la generación nuclear.

El esquema financiero que se ha seguido en Finlandia desde hace muchos años ilustra la forma en que un país pequeño ha diseñado esquemas apropiados a sus condiciones. Se trata, de hecho, del esquema de una cooperativa de consumo. Tal es el caso de la nucleoelectrónica de Olkiluoto 3, actualmente en proceso de construcción. Dicha unidad será propiedad de un grupo de empresas que comprarán la electricidad para su uso o para su venta.

6.3 CONTEXTO NACIONAL DE LA ENERGÍA NUCLEAR

A lo largo de los últimos cuarenta años, el ritmo de avance en materia nuclear ha sido sumamente lento en México, después de que se creó la Sección Nuclear en la CFE a finales de la década de los sesenta. En la primera etapa de esta industria en México, se concluyeron las Unidades 1 y 2 de Laguna Verde. **El modelo financiero fue totalmente basado en el endeudamiento**

público, con la garantía del gobierno federal para la totalidad del endeudamiento.

En las próximas décadas, se requerirá de elevadas inversiones en el sector. En una estrategia de diversificación energética, la energía nuclear tiene un potencial muy importante, además de generar efectos multiplicadores sobre el desarrollo nacional.

La tendencia global observada en las últimas décadas es muy clara en cuanto al aumento en los precios reales de los energéticos. Dicha tendencia se reflejará directamente en los precios del petróleo, gas natural, y carbón.

A partir de los años noventa, los esquemas jurídicos y financieros han orientado las decisiones de expansión de la capacidad eléctrica hacia la inversión privada (Productores Independientes de Energía, o PIEs), privilegiando inversiones modulares y de corto periodo de maduración, principalmente con la tecnología de ciclo combinado. En esencia, el sector público ha asumido la totalidad de los costos y los riesgos, garantizando al sector privado un rendimiento sobre sus inversiones y costos. A cambio, en principio se ha logrado mayor eficiencia operativa y transparencia, al asumir esta tarea las empresas privadas participantes. Sin embargo, a futuro el esquema debe evaluarse a la luz de la evolución económica y financiera internacional, en especial de acuerdo a la probable evolución del mercado de los hidrocarburos, y específicamente del gas natural.

La garantía de compra de la energía generada por productores independientes (PIEs) mediante el uso de gas natural, a precios definidos en función de los costos de inversión, financieros y del precio del energético, en esencia ha liberado a las empresas del riesgo comercial y financiero y recae plenamente en la CFE, y en última instancia en el Gobierno Federal.

Existe ahora la necesidad, y la oportunidad, de desarrollar una visión estratégica de largo plazo, que permita fortalecer las bases del desarrollo nacional. De haberse avanzado hacia la creación de una unidad nucleoelectrónica hacia 1980, y de haber continuado el desarrollo de esta tecnología, lo cual era altamente factible en los años sesenta y setenta, hoy día se contaría con importantes ventajas:

- **Electricidad más barata.**
- **Mayor disponibilidad de petrolíferos para otros fines.**
- **Menores importaciones de gas natural.**
- **Una industria altamente desarrollada.**
- **Una base de recursos humanos altamente calificados.**
- **Un número importante de empleos de alta calidad.**

Con relación a los costos del sector eléctrico, los precios de insumos y productos energéticos favorecen la utilización de combustibles fósiles. Sin embargo, como lo ha señalado recientemente el Presidente Calderón en el Día Mundial del Medio Ambiente, existe un compromiso político de avanzar hacia metas ambientales. De ahí la importancia de desarrollar opciones no contaminantes, como lo es la energía nuclear. En el ámbito internacional,

existen amplias expectativas en el sentido de que las políticas para considerar explícitamente los costos ambientales de las emisiones de CO₂ están por cambiar. Tanto los tratados internacionales como el cambio en la Administración de EUA, y el consenso de la OCDE, probablemente llevarán también al país en esta dirección.

Condicionantes bajo las cuales ha operado la política de expansión eléctrica:

- Decisión de SHCP de lograr un ingreso importante como impuesto por la generación de energía eléctrica.
- Decisión de financiar la expansión del sector eléctrico de manera que el endeudamiento externo incurrido para ampliación de capacidad no se refleje directamente en el balance de CFE, sino anualmente en mayores costos directos.
- Restricciones impuestas por el marco constitucional al establecimiento de un mercado competitivo de energía eléctrica.

Áreas de incertidumbre para CFE.

- Evolución de los precios del gas natural en las próximas décadas.
- Trayectoria futura de los precios del petróleo y del carbón. Ambos están relacionados con el precio del gas natural, si bien la volatilidad de cada uno de estos energéticos es diferente.
- México ha ratificado el protocolo de Kioto. Probablemente en los próximos años, bajo la nueva Administración en los Estados Unidos y de acuerdo a nuevos consensos internacionales, el país deberá adoptar políticas ambientales cuya expresión concreta en materia de generación eléctrica será un costo por la contaminación generada, como se analiza de manera explícita en la sección de costos.

Cambios probables a nivel internacional en las próximas décadas.

- Probable Acuerdo Internacional para establecer un costo por las emisiones de CO₂ a la atmósfera.
- Evolución de la política global en materia de protección al medio ambiente, la cual se reflejaría en un precio por las emisiones de carbón. Es decir, se tendría que pagar al menos en parte el costo de contaminación, que en la actualidad no tiene un costo explícito.
- Probable evolución hacia un uso mayor de automóviles eléctricos y transporte masivo, en parte eléctrico, con un menor predominio del automóvil.
- Aumento en los presupuestos para el desarrollo de tecnologías alternativas de generación eléctrica. A nivel internacional, es evidente que una de las formas más eficaces para reducir la contaminación es la electrificación del transporte, tanto público como privado.
- Mayor importancia relativa de la generación nucleoelectrónica, tanto en Estados Unidos como en Europa, Asia. Países como Japón, Taiwán, India, China y Rusia, y desde luego Francia, tienen en marcha programas importantes de aumento de la capacidad de generación nucleoelectrónica. Las razones principales son las de seguridad de abastecimiento, efectos multiplicadores internos y desde luego

competitividad económica, en vista de objetivos de conservación del medio ambiente.

Al evaluar la conveniencia de desarrollar la electricidad nucleoelectrónica, debe considerarse el carácter de largo plazo de dichas inversiones, así como la curva de aprendizaje en la tecnología y construcción de dichas unidades. A nivel internacional, la discusión enfatiza las disminuciones en costos que pueden esperarse al construir varias unidades. La primera unidad (de una tecnología, en un país o una región, en una empresa) evidentemente tiene un mayor costo, por lo que los mecanismos de subsidio gubernamental en EUA se orientan explícitamente a apoyar a las empresas a superar estos obstáculos iniciales. La expectativa es que la construcción de nuevas unidades adicionales lleve a un proceso de aprendizaje y reducción de costos. De tal manera, en México debe considerarse este “factor de aprendizaje” como uno de los beneficios, al evaluar la conveniencia de ampliar la capacidad nucleoelectrónica.

Ante la falta de un conocimiento claro y preciso de los costos de generación en CFE, es recomendable utilizar para fines de comparación y evaluación financiera las cifras disponibles internacionalmente sobre parámetros de operación y costos de diferentes tecnologías, así como presentar de manera explícita los supuestos a utilizar, de manera que el análisis sea verificable. Asimismo, a fin de llevar a cabo la comparación entre diferentes tecnologías, se propone utilizar la tasa interna de rendimiento, como un índice objetivo, que no requiere suponer previamente una tasa arbitraria de descuento, que pudiera sesgar el resultado de la comparación.

La tasa interna de rendimiento de proyectos alternativos permite comparar directamente los flujos de ingresos y egresos asociados a cada alternativa tecnológica. El ordenamiento resultante indica cuales proyectos son más rentables en condiciones de igualdad. Es decir, se comparan los flujos reales en cada etapa de la vida de un proyecto, sin presuponer un costo del dinero. En cuanto a factores como la escalación de costos durante la construcción, es posible incorporar directamente la mejor información disponible, o hacer los supuestos que se desee.

En particular, es importante incorporar de manera transparente los supuestos relativos a la probable evolución futura de los costos de los combustibles y del posible costo por la contaminación asociada a cada tecnología. Este es un punto de gran importancia. Dado el desconocimiento acerca de la evolución futura de precios y costos, es preferible efectuar la evaluación de los flujos a precios constantes actuales. Posteriormente, se pueden incorporar distintos supuestos a la trayectoria en el tiempo de distintas variables de precios y costos.

6.4 OPCIONES FINANCIERAS A EXPLORAR

Por la magnitud de la inversión, el financiamiento de una nueva unidad nucleoelectrónica debe plantearse en el contexto de las políticas económicas nacionales. Se propone considerar varios principios:

- a) El componente nacional debe financiarse en pesos.

- b) 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.
- c) 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.
- d) Deben aprovecharse las experiencias internacionales en la búsqueda de los mejores esquemas de financiamiento.

El desarrollo de un Programa, por atractivo que pueda parecer, debe considerar diversas particularidades del contexto nacional. Por una parte, los antecedentes históricos y las restricciones políticas vigentes hacen que desde la perspectiva de los mercados financieros internacionales, no exista claridad en las finanzas de CFE. Por otra parte, las tarifas eléctricas reflejan también el resultado de presiones sociales y de la acumulación de decisiones históricas.

Es entonces necesario plantear soluciones dentro de los esquemas nacionales de tarifas, aplicables a toda la Empresa. En tal contexto, cualquier decisión de absorber previa y/o parcialmente los costos financieros de un proyecto nucleoelectrico, deberá ser una decisión de política pública nacional, instrumentada y financiada por el gobierno federal, directa o indirectamente.

Existen al respecto dos opciones. Una puede ser que el gobierno federal incorpore directamente al Presupuesto de Egresos de la Federación dicho costo, como una aportación directa al capital de CFE para cubrir dichos costos financieros. La segunda es conceder a CFE la posibilidad de conservar recursos que de otra manera debería pagar al gobierno federal por concepto de diversos “derechos y aprovechamientos”.

Existen dificultades para aplicar en México las políticas más comunes empleadas a nivel internacional para financiar una parte importante del costo de construcción nuclear sin que ello signifique gravar las finanzas de las empresas generadoras o cargar costos importantes al presupuesto gubernamental. **Ante estas circunstancias, es necesario evaluar la decisión del desarrollo nuclear en un contexto nacional de largo plazo. Las razones para ello son varias.**

Primero, la tendencia internacional a futuro apunta claramente hacia la imposición de un cobro por las emisiones de CO₂.

Segundo, existe un imperativo de diversificación tecnológica en la generación de electricidad, debido a las fluctuaciones en los precios de los hidrocarburos y contando con una disponibilidad nacional limitada.

Tercero, dada la evolución de la economía internacional, el país claramente ha perdido competitividad en la última década. El desarrollo

de la industria nucleoelectrica ofrece una oportunidad de largo plazo para generar desarrollo tecnologico y efectos multiplicadores importantes sobre la economia nacional.

En este contexto nacional de largo plazo, se propone considerar el desarrollo de un programa de generacion nucleoelectrica a largo plazo, de manera que se transformen las expectativas sobre la economia y se vuelva mas facil el financiamiento del desarrollo nucleoelectrico.

Los principales elementos financieros de dicho programa son los siguientes:

- 1. Efectuar una aportacion gubernamental que cubra el desarrollo de los elementos basicos de estudio e ingenieria hacia el interior de CFE, y al mismo tiempo, generar actividades de apoyo en la economia.**
- 2. Se busca generar el interes empresarial en invertir, interes en las universidades por desarrollar programas de largo plazo de formacion de recursos humanos, certidumbre de largo plazo en los actores economicos demandantes de energia, y un conjunto de efectos multiplicadores sobre la actividad economica.**
- 3. La promocion de actividades de apoyo en la economia dependera principalmente de la certidumbre de largo plazo que solo el Gobierno Federal puede generar, alrededor de dos conceptos basicos.**
 - a. Primero, la certidumbre de largo plazo de la existencia de demanda por energia electrica, y de la posibilidad de participacion de la industria nacional en la fabricacion de componentes para dicha industria.**
 - b. Segundo, la existencia de un compromiso del gobierno federal con el apoyo a los distintos elementos esenciales, como desarrollo tecnologico y formacion de recursos humanos.**

El panorama internacional para el financiamiento de este tipo de inversiones a corto plazo es bastante incierto. Sin embargo, es altamente conveniente iniciar de manera intensiva los trabajos de planeacion, analisis, busqueda de las mejores tecnologias. Asimismo, se puede avanzar en la exploracion de formas de maximizar el contenido nacional de este tipo de inversiones. En un plazo de 2 a 3 años, el panorama internacional habra cambiado, por lo que se puede iniciar en etapas el proceso de ingenieria, licenciamiento y construccion de un proyecto nucleoelectrico.

A manera de ejemplo para ilustrar los principios basicos discutidos, se desarrolla el analisis de una forma basica de pago (1) y dos esquemas (2 y 3). Las principales caracteristicas son las siguientes:

Unidad Nucleoelectrica

Costo Instantaneo: **4,390 Millones USD**

Estructura Deuda/Capital: **80/20**

Plazo de pago de la aportación de capital: **9 Años**

Aportaciones anuales de capital, años 1-9: **97.6 Millones USD**

Plazo de amortización de la deuda: **20 años de operación**

Tasa de interés promedio: **7.5% (CETES +2.15)**

Opción:

- i. Con Pago de Intereses Durante Construcción y Amortización de Capital Constante.

Para completar el análisis se realizará la comparación con un ciclo combinado con las características siguientes, para las mismas 3 opciones:

Ciclo Combinado

Costo Instantáneo: **1,177 Millones USD**

Estructura Deuda/Capital: **80/20**

Plazo de pago de la aportación de capital: **3 Años**

Aportaciones anuales de capital, años 1-3: **78.5 Millones USD**

Plazo de amortización de la deuda: **20 años de operación**

Tasa de interés promedio: **7.5% (CETES +2.15)**

Las tasas internas de rendimiento (TIR) para la opción mencionada, tanto para una unidad nucleoelectrica, como para un ciclo combinado, incluyendo Fondos Nucleares y Costo por Emisiones para el ciclo combinado, así como excluyéndolos, se muestran en la Tabla siguiente:

Esquema 1. Pago de intereses durante la construcción y amortización de deuda constante.				
<i>Variación de la TIR por incremento en el costo de combustibles</i>				
Tecnología	Caso Base	Incremento del 2.8%	Incremento del 12.93%	Suposiciones
Nuclear	10.717	10.688	10.59	Incluyendo fondos
CC	13.466	10.688	0.0	Incluye costo por emisiones de CO2
Tecnología	Caso Base	Incremento del 20.3%	Incremento del 30.25%	Suposiciones
Nuclear	11.87	10.511	10.41	Sin incluir fondos
CC	30.606	10.511	0.0	Sin incluir costo por emisiones de CO2

TIR para unidad nucleoelectrica y de ciclo combinado (Opción 1), y sensibilidad de la TIR al incremento en costo de combustible.

En la Tabla 6.4.3.1 también se muestra, el cambio en las TIRs con las variaciones en el costo del combustible nuclear y en el gas. De estos resultados se puede concluir lo siguiente:

- 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
- Cuando se consideran costos por emisión de CO₂, un incremento de tan sólo 2.8% en el costo de ambos combustibles iguala la TIR de las dos opciones tecnológicas.
- Cuando se consideran costos por emisión de CO₂, un incremento en el costo del gas de 12.93% lleva la TIR del ciclo combinado a cero, lo cual es muy preocupante en una inversión a largo plazo.
- Incrementos en el precio del gas en dólares de hasta 75% y decrementos de hasta 100% han ocurrido en los últimos 12 meses haciendo evidente la volatilidad en los precios del gas. Lo anterior sin considerar variaciones en el tipo de cambio peso-dólar.

6.5 CONCLUSIONES

La evaluación del costo de oportunidad de largo plazo para el sector eléctrico mexicano debe considerar varios factores.

- I. El costo de financiamiento de distintos tipos de proyectos.
- II. Las modalidades de financiamiento disponibles para el sector eléctrico.

III. Las garantías implícitas de los proyectos de inversión en México.

Implícitamente, el mercado exterior considera que los grandes proyectos en México conllevan una garantía, cuando menos parcial, de parte del sector público. Desde las crisis financieras de 1982 y 1994-5 las respuestas de política gubernamental han validado este supuesto. Más recientemente, la respuesta gubernamental ante las crisis que han enfrentado las empresas que realizaron operaciones con futuros del peso mexicano ha reforzado la percepción existente con anterioridad en los mercados financieros, nacionales e internacionales.

De acuerdo a lo anterior, puede inferirse que en los proyectos de generación externa, CFE paga los costos más altos de financiamiento – incorporados a las tarifas que paga a los PIEs- a la vez que las empresas generadoras pueden estar seguras que la plena garantía del gobierno mexicano respalda sus inversiones.

Dadas estas condiciones existentes, en cuanto a los costos que CFE ya está pagando, es factible considerar que el financiamiento para proyectos nucleares puede lograrse en mejores condiciones.

La nucleoelectricidad es una opción muy segura a largo plazo dada la reducida volatilidad del precio de su combustible y la baja participación de este componente en el costo total de generación. **Es preocupante la fragilidad en la rentabilidad de un ciclo combinado, cuando incrementos relativamente menores en el precio del gas invalidan su viabilidad financiera.**

7.- IMPACTO SOCIOECONÓMICO.

7.1.- INTRODUCCIÓN.

Una inversión de la magnitud de una nucleoelectrica es un detonador potencial de gran magnitud. Se trata en general, de bienes y servicios que requieren una alta proporción de componentes provenientes de otros sectores. Se pueden obtener altos efectos indirectos sobre la producción de bienes intermedios y de productos de consumo final.

El logro pleno de los beneficios de esta forma de generación de energía eléctrica requiere definir un programa de largo plazo que contemple diversas acciones gubernamentales y de parte de CFE, para desarrollar proveedores y asegurar los mejores niveles de costos y calidad. La ampliación de la capacidad nucleoelectrica es un objetivo de gran importancia, es también un medio y puede ser parte importante de una estrategia nacional de crecimiento económico.

7.2.- CONTEXTO DE LOS RESULTADOS.

En este capítulo se apuntan algunas de las principales acciones de tipo social sugeridas para posibilitar la realización de un proyecto de esta envergadura.

- Los efectos regionales, y nacionales, de “multiplicación del impulso inicial del gasto” (comúnmente conocidos como efectos multiplicadores) no pueden considerarse como estáticos o inmutables
- Las acciones de apoyo a la actividad industrial nacional tienen un objeto específico, pero también efectos amplios sobre el sector privado nacional, en particular las empresas medianas y grandes.
- Existen amplias oportunidades para lograr un mayor contenido nacional en la producción de componentes manufacturados y en los servicios de ingeniería, pero sobre todo para impulsar una mayor integración industrial a partir del impulso constructivo de una nueva central nucleoelectrica.
- Se generan también amplias oportunidades para la economía nacional. Los países que llevan a cabo programas de desarrollo de la nucleoelectricidad en paralelo realizan acciones específicas para fortalecer su capacidad en los ámbitos relacionados.
- Al llevar a cabo las acciones necesarias para desarrollar la generación nucleoelectrica, se logra el fortalecimiento de la industria nacional, del sector educativo y tecnológico.
- La perspectiva del desarrollo y construcción nucleoelectrica genera diversas oportunidades para focalizar las acciones a desarrollar en el

ámbito local, por parte de los tres niveles de gobierno. Un costo explícito que debe considerarse es por lo tanto la asignación de recursos para la realización de acciones de desarrollo y fortalecimiento de la capacidad local de gestión.

- La posibilidad de asociar responsabilidades y compromisos específicos a recursos asignados para los tres niveles de gobierno, es un requisito fundamental a fin de evitar un proceso interminable y muy desgastante de peticiones y demandas hacia CFE.

7.3.- MATRIZ INSUMO-PRODUCTO.

Una matriz de insumo-producto es un esquema contable en el cual se describe el flujo de bienes y servicios entre los diferentes agentes o sectores que participan en la actividad económica. La matriz se compone de un renglón y una columna por cada sector de la actividad económica.

El uso fundamental de la matriz en este Reporte es para estimar el impacto del gasto en la construcción de una unidad nucleoelectrica sobre los diversos sectores de la economía nacional. La matriz usada es la elaborada por el INEGI en 2003 y desagrega la actividad económica en 20 sectores.

7.4.- CUANTIFICACIÓN DE EFECTOS ECONÓMICOS.

Los resultados cuantitativos que genera la matriz insumo-producto requieren acciones específicas, o sea, no puede considerarse que se generan de manera automática.

La utilización de la matriz de insumo-producto permite cuantificar los efectos que se generan en las empresas que apoyan con insumos de bienes y servicios a los proveedores directos de componentes y servicios para la construcción nuclear. Dichas empresas a su vez requieren adquirir insumos de otras empresas, y así sucesivamente.

La cuantificación de los efectos económicos directos e indirectos toma como punto de partida la actualización de la experiencia histórica de la construcción de Laguna Verde I y II. Basado en esa experiencia, se refleja la capacidad que la industria nacional ya ha mostrado en el pasado en términos de contenido nacional.

Con base en los cálculos realizados, se estima que de una erogación de 4,390.00 Millones de USD, 2,520.00 Millones de USD puede ser gasto nacional, lo que genera requerimientos de insumos y componentes por un total de 4,173.00 Millones de USD. **Esto es un factor de 1.66 veces**, esto significa que el gasto nacional se multiplica por un elevado porcentaje.

7.5.- IMPACTOS REGIONALES DIRECTOS.

El estado de Veracruz tiene enormes riquezas naturales, sin embargo, su nivel de desarrollo lo ubica considerablemente por debajo de la media nacional. No cuenta con infraestructura industrial que le permita aprovechar plenamente los impulsos derivados de la producción petrolera y energía eléctrica con que cuenta. Asimismo, las estadísticas indican que un elevado porcentaje de la población económicamente activa se dedica a las actividades primarias y de comercio.

La Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde, por sí sola, no podría cambiar esta situación, dado que fuera de esa inversión, no se han llevado a cabo inversiones amplias para el desarrollo de la zona.

7.6 LA REGIÓN INMEDIATA A LAGUNA VERDE.

El estado de Veracruz se integra por diez regiones de acuerdo a la clasificación utilizada por la Secretaría de Desarrollo Económico. Laguna Verde se ubica en el municipio de Alto Lucero que corresponde a la región denominada "Capital". Con relación a los municipios más cercanos a Laguna Verde, es patente el estancamiento económico.

Las cifras de la matriz insumo-producto a nivel nacional tienen poca relevancia en el entorno geográfico de Laguna Verde. 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 una tercera unidad.

7.7.- EL PROCESO CONSTRUCTIVO: PRINCIPALES EFECTOS.

Las necesidades que se generan alrededor de una gran construcción como lo es una nucleoeléctrica, arrojan oportunidades que es importante aprovechar.

7.8.- ACCIONES PROPUESTAS.

- **Formación de recursos humanos y desarrollo tecnológico.** Informar a las principales instituciones de educación superior sobre la importancia de la energía nuclear para la economía nacional y para el desarrollo tecnológico nacional. Interesarlos en el tema.
- **Fortalecer la capacidad de la industria nacional para contribuir al proyecto.**
- **Fortalecer la capacidad de financiamiento de la industria nacional.**

- **Promover una reunión con las empresas participantes en LV 1 y 2.** El objetivo es revisar la evolución de las capacidades de la industria nacional y detectar con mayor precisión las áreas de mayor importancia para las políticas públicas.
- **Fortalecimiento de la capacidad para desarrollar proyectos locales.** Participación de gobierno estatal y Universidades del Estado de Veracruz.
- **Participación de los gobiernos municipales,** ya que una participación activa de estos sería de gran utilidad comp. Parte del esquema de comunicación con la sociedad en su conjunto.

7.9.- CONCLUSIONES

- El análisis de la matriz de insumo-producto permite concluir que el efecto multiplicador de la inversión en una nueva planta nucleoelectrica es importante, por los requerimientos directos e indirectos de las compras de servicios, equipos y productos para dicha unidad.
- Dado el elevado efecto multiplicador que en potencia es posible alcanzar, es de la mayor importancia buscar la máxima producción nacional.
- Un programa multiplantas permitiría elevar los efectos integradores a nivel regional y nacional.
- Se tiene la necesidad de estructurar un conjunto de mecanismos que involucren a los tres niveles de gobierno.
- No es posible identificar los efectos nacionales en su dimensión geográfica, dado el grado de agregación de la matriz de insumo-producto. Sin embargo, es posible definir los tipos de ajustes necesarios en aspectos tales como el financiamiento, la normatividad de adquisiciones y contrataciones del sector público y la relación con universidades y sector productivo, a fin de lograr el mayor efecto nacional.
- Las acciones de apoyo necesarias para este proyecto rebasan el ámbito de decisiones de CFE. Forman parte de una estrategia que ubicaría a México en la tendencia de las decisiones adoptadas en otros países. Las consideraciones básicas son la seguridad energética y el apoyo al crecimiento económico, la competitividad, el empleo, la tecnología y la energía no contaminante.

CONCLUSIONES GENERALES.

- La energía nuclear ha sido considerada por varios países como una tecnología confiable para generar electricidad y combatir el cambio climático.
- Los costos de producción de las unidades nucleoelectricas han disminuido consistentemente, llegando en el 2008 a 18.7 USD/MWh, valor menor a los costos de producción mediante otras tecnologías.
- El combustible nuclear irradiado, al ser reprocesado, puede seguir generando energía al convertirse nuevamente en combustible y se deberá de disponer de manera definitiva de los residuos radiactivos, que representan únicamente el 3% del combustible reprocesado.
- Se cuenta con tecnologías probadas y en uso en varios países para el almacenamiento temporal y definitivo tanto de los productos del combustible irradiado como de los desechos radiactivos de medio y bajo nivel.
- La generación anual de desechos radiactivos en los países de la OCDE, es mínima (equivalente a 81,000 toneladas) comparada con la generación de desechos tóxicos (aproximadamente 300 millones de toneladas).
- La descontaminación y desmantelamiento de una unidad nuclear no es ninguna novedad. Decenas de unidades nucleoelectricas a nivel mundial han realizado este proceso de manera exitosa una vez terminada su vida útil.
- Es importante mencionar que las tecnologías fósiles también requieren ser desmanteladas y sus desechos tales como cenizas y escorias requieren de procesamiento y disposición.
- Con base en la información estadística de accidentes en unidades de generación de energía eléctrica, la energía nuclear es la fuente más segura.
- Con relación a la Seguridad Física, las unidades nucleoelectricas son resguardadas mediante sistemas avanzados de seguridad enfocados a evitar el mal uso de materiales nucleares o radiactivos, cumpliendo con los compromisos para la No Proliferación suscritos por México mediante la firma de acuerdos y tratados internacionales.
- El proceso de Licenciamiento se ha modificado con la emisión por la Nuclear Regulatory Commission de los Estados Unidos de la normatividad 10CFR52.
- La capacidad de la industria de la manufactura de componentes para unidades nucleoelectricas sigue en crecimiento ante la reactivación de la nucleoelectricidad.

- La opinión pública en varios países es cada vez más favorable a la energía nuclear.
- Cada vez México cuenta con mayor experiencia sobre el uso de la nucleoelectricidad al estar operando este tipo de unidades desde 1990 en Laguna Verde.
- Actualmente los tecnólogos cuentan con diseños mejorados de reactores nucleares que además de contar con sistemas de seguridad más confiables al requerir una mínima participación del operador, permiten mayor capacidad de generación eléctrica.
- Los métodos constructivos utilizados en la actualidad han sido uno de los factores de éxito en los proyectos recientemente terminados al realizar la construcción en tiempos relativamente cortos.
- Las nucleoelectricas al igual que las hidroeléctricas, geotérmicas, solares y eólicas, son tecnologías prácticamente libres de emisiones de gases contaminantes al medio ambiente.
- Entre las nuevas tecnologías de generación eléctrica limpia de carga base, la nucleoelectricidad es la más barata cuando se compara con cualquier otra tecnología fósil que incorpore Captura y Secuestro de Carbono.
- La tendencia al alza de los precios de los hidrocarburos refuerza la competitividad de la energía nuclear para generar electricidad.
- La Tasa Interna de Retorno (TIR) en una unidad nucleoelectrica es prácticamente insensible al incremento en el costo del combustible nuclear, contra una dependencia muy importante de la TIR ante las variaciones de combustibles fósiles.
- Se considera que de una erogación de 4.390 Millones USD, aproximadamente 2,520 Millones USD puede ser gasto nacional. Por los "Efectos Multiplicadores" a nivel regional y nacional, 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.
- Aún cuando Veracruz tiene enormes riquezas naturales, las cifras de la matriz insumo-producto tienen poca relevancia en el entorno geográfico inmediato a Laguna Verde, por lo que es necesario desarrollar políticas públicas para transformar la percepción de que Laguna Verde no genera beneficios para la región donde se ubica.