



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

“PROPUESTA TÉCNICA Y ECONÓMICA DE
LA AMPLIACIÓN DE LA CENTRAL
NUCLEOELÉCTRICA LAGUNA VERDE CON
UN REACTOR NUCLEAR ADICIONAL”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

P R E S E N T A :

CARLOS DANIEL LEAL COBOS

DIRECTOR DE TESIS:
DR. JUAN LUIS FRANÇOIS LACOUTURE



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F.

2005



Agradecimientos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Germen de humanismo y sabiduría.

A mis padres

Por su apoyo incondicional en todos los aspectos de mi vida y por la oportunidad que me brindaron para realizar este sueño.

A mis padrinos

Por sus excelentes consejos y su valiosa y siempre oportuna ayuda.

A mis hermanas y mi familia

Por su gran soporte y amor que contribuyeron a la realización de esta meta.

A Diana

Por el amor y apoyo ofrecidos desinteresadamente en estos últimos años.

A mis amigos

Por su apoyo y compañía a lo largo de carrera.

Al Dr. Juan Luís François Lacouture

Por su gran apoyo y conocimientos, elementos fundamentales en la elaboración de este trabajo de tesis.

Al M.I. Miguel Medina Vaillard

Por sus valiosas sugerencias y comentarios al contenido de esta propuesta.

A los miembros del jurado

Dr. Eduardo Arriola, Dr. Arturo Reinking, Dra. Cecilia Martín del Campo y Dr. Alberto Elizalde por las excelentes observaciones y sugerencias que enriquecieron este trabajo de tesis.

Índice general.

Agradecimientos	
Prefacio	1
Introducción	3
1 Antecedentes	
1.1 El medio ambiente y la atmósfera.	6
1.2 Los Gases de Efecto Invernadero.	9
1.3 El Protocolo de Kyoto.	14
1.4 La energía nuclear en el mundo.	16
1.5 Indicadores relevantes.	19
1.6 Situación Nacional.	22
2 Marco Tecnológico	
2.1 Energía Nucleoeléctrica.	25
2.2 Aspectos generales de las centrales Nucleoeléctricas.	26
2.3 Central Nucleoeléctrica Laguna Verde.	32
2.4 Reactores Avanzados.	40
2.5 Tecnología ABWR.	43
3 Propuesta	
3.1 Introducción.	56
3.2 Implicaciones técnicas.	58
3.3 Implicaciones económicas.	64
3.4 Implicaciones financieras.	73
3.5 Implicaciones ambientales.	75
3.6 Rentabilidad económica.	76
4 Análisis de la propuesta	
4.1 Impactos de la propuesta.	80
4.2 Beneficios potenciales.	84
4.3 Perspectivas.	86
Conclusiones	89
Referencias	96
Anexos	104

Prefacio.

En el ámbito internacional, se reconoce que algunas actividades humanas, principalmente las de tipo industrial y de generación de energía eléctrica, han incrementado las concentraciones atmosféricas de los llamados gases de efecto invernadero. Se dice que esto ha perturbado el balance de la radiación solar en el planeta ocasionando un cambio climático global que amenaza la evolución natural del medio ambiente.

De no tomarse medidas preventivas al respecto, en los próximos 100 años la temperatura global podría alcanzar un valor promedio de tal magnitud que ocasionaría un deshielo importante en los polos. Esto podría aumentar el nivel del mar y causar la inundación de islas y planicies costeras, así como el advenimiento de condiciones climáticas más severas y difíciles de predecir.

La contaminación del aire también es motivo de gran preocupación. En algunas zonas, los contaminantes atmosféricos han alcanzado concentraciones que pueden perturbar el equilibrio de los ecosistemas y afectar la calidad de vida de los seres humanos.

Los procesos convencionales para generar electricidad que se basan en la quema de combustibles fósiles¹, emiten cantidades importantes de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos. Estos procesos son la fuente principal de emisión de dióxido de carbono². Es por ello que la diversificación de las fuentes de energía para la generación de energía eléctrica puede contribuir a mitigar el efecto de los contaminantes sobre la atmósfera y sobre el medio ambiente global.

Desde hace cerca de 10 años, el aprovechamiento de las energías renovables ha sido un objetivo central de la política energética de la Unión Europea y otros países del mundo. Sin embargo a pesar de los esfuerzos que realizan éstos, incluso de manera conjunta, es claro que la

¹ Carbón e hidrocarburos, principalmente combustóleo y gas natural.

² Principal gas de efecto invernadero, gas incoloro, inodoro y con un ligero sabor ácido, cuya molécula consiste en un átomo de carbono unido a dos átomos de oxígeno (CO₂), se produce por diversos procesos: por combustión u oxidación de materiales que contienen carbono, como el carbón, la madera, el aceite o algunos alimentos.

capacidad de generación que puede lograrse mediante la explotación de este tipo de energías es insuficiente si se compara con la expectativa mundial de energía eléctrica.

Es así como la tecnología nuclear para la generación eléctrica cobra renovada importancia en un momento en que la humanidad busca alternativas de generación de menor impacto ambiental y en el que economías menos favorecidas buscan atraer capitales para fortalecer su infraestructura eléctrica a través de esquemas tecnológicos y financieros flexibles.

En nuestro país la visión económica proyectada a corto y mediano plazo debe incluir entre otras cosas, consolidar un país de alta competitividad, con un crecimiento económico equitativo, incluyente y sostenido, mejorando de manera constante el nivel de bienestar de la población, tales retos se deben afrontar con un uso racional de los recursos naturales y promoviendo una cultura de respeto al medio ambiente.

Garantizar una oferta de energía suficiente, oportuna y de alta calidad de tal forma que se coadyuve al crecimiento económico y al desarrollo sustentable del país al asegurar una elevada calidad del medio ambiente y la disponibilidad de los recursos naturales en el largo plazo son algunas de las tareas que debe realizar el sector energético en el país.

El cumplimiento de estos objetivos implica la implementación de un conjunto de estrategias y políticas que promuevan el uso eficiente y el ahorro de la energía así como la diversificación de las fuentes primarias tanto para garantizar la utilización de las renovables y la sustentabilidad de las no renovables en el largo plazo como para disminuir la gran dependencia actual de los hidrocarburos.

Introducción.

El propósito fundamental de este trabajo de tesis es realizar una propuesta de la ampliación de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde (CNLV) con un reactor nuclear adicional de tipo avanzado de agua hirviendo (ABWR), estudiando las implicaciones técnicas, económicas, financieras y ambientales del proyecto, así como la rentabilidad y los impactos socio económicos a niveles regional y estatal.

Se efectúa un análisis de la viabilidad de un nuevo reactor nuclear, con la finalidad de incrementar su capacidad de generación al Sistema Eléctrico Nacional (SEN) y satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica del país, así como presentar una propuesta formal de inversión a la infraestructura del sector con bases en el desarrollo sustentable y la protección del medio ambiente.

Asimismo se dan a conocer los beneficios que se alcanzarían con la realización de la propuesta, no sólo con el incremento en la capacidad del parque de generación de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) sino con la diversificación de las fuentes primarias de energía y con la menor dependencia energética de los hidrocarburos.

Además se presenta la experiencia operacional que se tiene en la CNLV y en otros países que satisfacen parte de su demanda de energía eléctrica con la tecnología nuclear, en este ámbito podemos mencionar que actualmente existen (hasta enero del 2005) alrededor de 440 reactores nucleares comerciales operando en 31 países, con una capacidad total de más de 364,000 [MWe], también cabe agregar que alrededor de 30 reactores están bajo construcción, lo que equivale a 6% de la capacidad existente, y que al menos 35 reactores están firmados y en proceso de planeación, equivalentes a 10% de la capacidad actual³.

³ World Nuclear Association: <http://www.world-nuclear.org/info/reactors.htm> (2005).

Por otro lado, la energía nuclear ha demostrado ser una fuente de energía limpia y segura (a pesar de los dos accidentes ocurridos en toda la historia de la tecnología), que si se utiliza de manera adecuada puede satisfacer las necesidades de generación de energía eléctrica del país, además de que el proceso mediante el cual se genera electricidad por este medio no emite gases de efecto invernadero a la atmósfera, lo que promueve el cuidado del medio ambiente, tema que es relevante en la actualidad en el ámbito internacional con la reciente ratificación del Protocolo de Kyoto.

Este acuerdo plantea la posibilidad de negociaciones entre países más y menos industrializados para intercambiar emisiones, es decir, que países que sobrepasen sus cuotas de emisiones y que ya no tienen la posibilidad de disminuirlas pueden invertir en proyectos de reducción de emisiones en países que emiten menos.

Debemos agregar también que en publicaciones concernientes a la evaluación de proyectos y tecnologías del sector eléctrico se ha demostrado la competitividad económica de las centrales nucleoelectricas que pueden compararse incluso con centrales de ciclo combinado o geotermoeléctricas⁴. Asimismo, dos ventajas adicionales de la energía eléctrica generada por reactores nucleares son su bajo costo de combustible y su alta seguridad, las plantas nucleoelectricas son considerablemente eficientes y tienen un alto factor de planta capaz de competir con cualquier otro tipo de centrales generadoras.

Dentro de los resultados esperados en este trabajo de tesis, podemos mencionar:

- Presentar un análisis de viabilidad y rentabilidad de la ampliación de la CNLV con un nuevo reactor nuclear con tecnología ABWR.
- Presentar una propuesta económica y financiera del proyecto.

⁴ CFE, “Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico”, 2004. (Ver Anexo A).

- Proponer una opción de generación de energía eléctrica, utilizando un tipo de energía no convencional, es decir, proponer una alternativa de generación de menor impacto ambiental.
- Proponer una opción de inversión, justificada y bien definida a la infraestructura del sector eléctrico.
- Aportar un análisis de los beneficios eléctricos y ambientales de la construcción de reactores nucleares en el país.

Por lo que a fin de realizar lo planteado anteriormente, la estructura de este trabajo consta de cuatro capítulos que se describen brevemente a continuación:

En el capítulo primero se tratan los antecedentes de la propuesta abordando temas como el medio ambiente, la atmósfera, los gases de efecto invernadero, el Protocolo de Kyoto y la energía nuclear en el mundo así como indicadores relevantes de la tecnología y la situación nacional.

En el capítulo segundo se mencionan los aspectos generales de la energía nucleoelectrica y de las centrales nucleares así como las características de la CNLV y los detalles de la tecnología ABWR.

En el capítulo tercero se tratan los detalles de la propuesta además de las implicaciones técnicas, económicas, financieras y ambientales del proyecto, en esta sección se analizan los costos de inversión, de combustible y de operación y mantenimiento además de la rentabilidad económica de la propuesta.

En el capítulo cuarto se habla de los beneficios potenciales que se alcanzarían con la realización de la propuesta, de las perspectivas del sector, y de las implicaciones socio económicas de la ampliación de la CNLV.

1 Antecedentes.

1.1 El medio ambiente y la atmósfera.

El medio ambiente es un conjunto de elementos abióticos (energía solar, suelo, agua y aire), que suelen englobarse en el término *geosfera*, y de elementos bióticos (organismos vivos) que integran la delgada capa de la Tierra llamada *biosfera*, sustento y hogar de los seres vivos⁵. Entre ambos elementos existe una relación muy estrecha; la vida en la Tierra depende de la existencia y funcionamiento de la *geosfera*, y ésta no tendría su configuración actual sin la existencia de los seres vivos.

El primer componente de la geosfera es el suelo o la Tierra sólida, que forma la base del globo terráqueo. En el nivel más profundo, entre 5,150 y 6,371 [Km] desde la superficie terrestre, se encuentra el núcleo interno que está compuesto de metal sólido y presenta una gran densidad. Por encima, entre los 2,900 y los 5,150 [Km] desde la superficie, se haya el núcleo externo que se compone de metal líquido (hierro, níquel y silicio), cuya densidad es menor. Entre los 700 y los 2,900 [Km] de profundidad, encontramos el manto inferior que está compuesto por óxidos densos, como el óxido de magnesio o el dióxido de silicio.

Muy cerca de la superficie, está el manto superior situado entre 200 y 700 [Km] de profundidad formado por silicatos densos de magnesio y hierro, mientras que entre los 40 y los

⁵ Enciclopedia *Encarta 2004*, Microsoft Corporation y Ludevid, M., *El cambio global en el Medio Ambiente*, Ed. Alfaomega, México, 1998.

200 [Km] de profundidad hay rocas básicas de olivino⁶ y piroxeno⁷. Por último, al nivel de la superficie y en contacto con el aire y el agua, se encuentra la corteza terrestre, que es la capa existente entre la superficie y los primeros 40 [Km] de profundidad, formada por rocas silíceas de escasa densidad. La acción de los movimientos tectónicos de placas, junto con la erosión del agua y los vientos, ha configurado montañas y valles en la corteza terrestre, que desempeñan un papel importante en el sistema climático. Esta última es la parte que más nos interesa de la Tierra sólida, porque es la que tiene una relación más directa y frecuente con los sistemas de la geosfera y la biosfera, a pesar de constituir menos del 0.0001% del volumen total del planeta.

El agua es el segundo gran componente del sistema terrestre, el término común para designar las diferentes formas de agua de la superficie terrestre, tanto la de los océanos como la de los mares de escasa profundidad, los lagos, los ríos, las aguas subterráneas o los glaciares, es el de *hidrosfera*, es decir, el agua líquida y el hielo. De toda esta agua, menos del 0.5% se encuentra en los continentes en forma de lagos y ríos. Más del 80% se concentra en océanos y mares poco profundos, el resto, un 18% aproximadamente, son sedimentos enterrados de origen marino. Ello significa que el agua dulce representa únicamente un 1.2% del total, el 23% de esta cifra corresponde a aguas dulces subterráneas⁸.

Alrededor del 70% de la superficie terrestre está cubierta por océanos. El papel de éstos es decisivo tanto en la conformación del clima como en la regulación de la biosfera y el funcionamiento del ciclo hidrológico. El clima se modifica tanto por la capacidad de los océanos de absorber energía de la radiación solar y transportarla, mediante las corrientes por todo el mundo, como por el ciclo de evaporación y precipitación que se inicia en la interfase aire-mar. Los océanos desempeñan un papel importante en la abundancia del oxígeno y el dióxido de carbono, elementos necesarios para los procesos vitales.

El tercer componente es el aire, es decir, la masa de gases que rodea la superficie terrestre y que hace posible la vida. Es lo que se conoce con el nombre de *atmósfera*. Dentro de ella, se suelen distinguir diversos niveles o capas. La *troposfera* es la capa que va desde la superficie

⁶ Mineral compuesto por silicatos de magnesio y hierro $(MgFe)_2SiO_4$ que se presenta en forma de cristales de color verde oliva común en las rocas eruptivas básicas.

⁷ Silicato complejo de hierro, magnesio, calcio y a veces aluminio, presente en las rocas eruptivas y metamórficas.

⁸ Raiswell, et al., *Química ambiental*, Ediciones Omega, Barcelona, 1983.

terrestre hasta 10 [Km] de la Tierra, la *estratosfera* se sitúa entre 10 y 50 [Km] de la superficie y la *mesosfera* se extiende desde los 50 hasta los 100 [Km] de altura. La composición de la atmósfera depende de la manera en que se formó originalmente el planeta, así como de los procesos físicos y químicos que continuamente añaden algunos gases al tiempo que extraen otros como las erupciones volcánicas, las reacciones químicas en la Tierra y la fuga de gases al espacio.

La atmósfera, que protege a la Tierra del exceso de radiación ultravioleta y permite la existencia de la vida, es una mezcla gaseosa constituida principalmente por nitrógeno y oxígeno. La parte restante la forman el argón, el dióxido de carbono, distintas proporciones de vapor de agua y trazas de hidrógeno, ozono, metano, monóxido de carbono, helio, neón, criptón y xenón. Esta composición se mantiene constante hasta una altura de 100 [Km] de la superficie terrestre. A partir de este nivel, las moléculas gaseosas simples pueden disociarse en iones y radicales libres mediante reacciones de fotodisociación provocadas por las radiaciones solares de onda corta que llegan a la parte alta de la atmósfera. A continuación se presenta la tabla 1.1 con los componentes más importantes de la atmósfera.

COMPONENTES	VOLUMEN EN %
Nitrógeno	78.084
Oxígeno	20.946
Argón	0.934
Dióxido de Carbono	0.031
Neón	1.82×10^{-3}
Helio	5.24×10^{-4}
Metano	1.5×10^{-4}
Criptón	1.14×10^{-4}
Hidrógeno	5×10^{-5}
Óxido de nitrógeno	3×10^{-5}
Monóxido de carbono	1×10^{-5}
Ozono	1×10^{-5}
Otros	5×10^{-3}

Tabla 1.1 Componentes de la atmósfera⁹.

⁹ Fuente: Ludevid, M., *El cambio global en el Medio Ambiente*, Ed. Alfaomega, México, 1998.

El oxígeno y el nitrógeno son importantes desde el punto de vista biológico ya que presentan ciclos característicos de interacción con los organismos vivos. El oxígeno, obtenido directamente de la atmósfera es necesario para la oxidación de los alimentos, que proporcionan energía; mientras que el nitrógeno que es químicamente no reactivo y necesario para formar aminoácidos esenciales para la vida, se debe obtener directamente de la atmósfera utilizando procesos naturales que lo convierten en sales solubles. El dióxido de carbono se utiliza en la fotosíntesis para sintetizar materia orgánica con la ayuda de la radiación solar y la clorofila como catalizador, este proceso es exclusivo del mundo vegetal. El contenido en vapor de agua del aire varía considerablemente en función de la temperatura y de la humedad relativa.

La biosfera incluye millones de plantas, animales y seres vivos en constante desarrollo que representan aproximadamente dos billones de toneladas de materia orgánica¹⁰. Todos estos elementos se interrelacionan con el resto del sistema terrestre a través de ciclos autorregulados. La geosfera y la biosfera son sistemas que se encuentran estrechamente relacionados, la existencia de uno depende del funcionamiento del otro y viceversa, a través de sistemas de transferencia de energía y de materia.

1.2 Los gases de efecto invernadero.

El medio ambiente descrito se encuentra sometido a importantes procesos y ciclos de cambio y transformación como los ciclos biogeoquímicos del oxígeno¹¹, del agua, del carbono¹² y de la energía¹³. Estos procesos han sido continuos desde la conformación de la Tierra, pero han

¹⁰ Cfr. Ludevid Anglada, Manuel, *El cambio global en el medio ambiente*, Ed. Alfaomega, México, 1998, p.11.

¹¹ El dióxido de carbono presente en la atmósfera se transforma en oxígeno a través de la fotosíntesis tanto terrestre como marina, mientras que los seres vivos al respirar devuelven el dióxido de carbono a la atmósfera para cerrar el ciclo.

¹² Ciclo de utilización del carbono por el que la energía fluye a través del ecosistema terrestre. El ciclo básico comienza cuando las plantas, a través de la fotosíntesis, hacen uso del dióxido de carbono (CO₂) presente en la atmósfera o disuelto en el agua.

¹³ Un 50% de la energía de las radiaciones solares es interceptada por las nubes, éstas vuelven a emitir hacia el espacio la mitad de esa energía, 2% de la energía permanece en las nubes mientras que el 23% restante llega a la corteza terrestre. Del otro 50% de energía solar sólo 19% llega a la superficie terrestre, un 17% es absorbido por los gases de efecto invernadero mientras que el 14% restante es reflejado por la corteza.

sufrido una aceleración y en algunos casos, un cambio de dirección en los últimos siglos debido a la intervención humana.

El clima puede variar por razones internas o externas. Los cambios externos están basados en procesos que provocan cambios en los flujos de energía de las radiaciones solares dentro del sistema¹⁴. Dentro de estos procesos, existen fuerzas completamente ajenas a la acción humana como los cambios en el nivel de irradiación que nos llega del Sol o los cambios en la geometría de la órbita de la Tierra. En otros casos la acción humana puede ejercer una gran influencia en los procesos de absorción de la radiación solar o de detención de las radiaciones de onda larga por parte de la atmósfera.

Los gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera desempeñan un papel clave en el sistema climático, ya que absorben la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre y vuelven a irradiar esta energía¹⁵. De hecho, lo que hacen es dejar pasar las radiaciones de onda corta y absorber y volver a emitir las radiaciones de onda larga¹⁶. En la figura 1.1 se muestra un esquema del efecto invernadero.

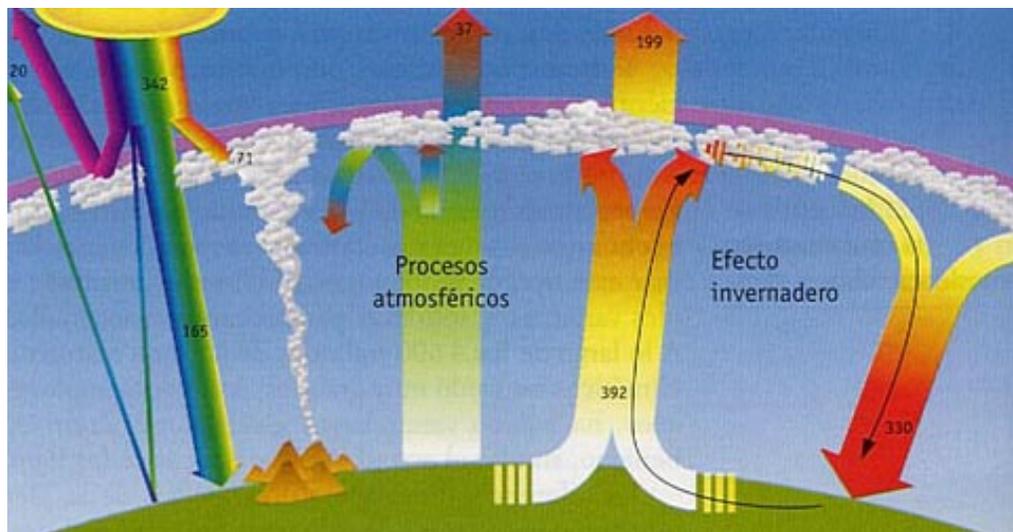


Figura 1.1 Efecto invernadero¹⁷.

¹⁴ Dickinson, R.E., *How Climate Change? The Climate System and Modelling of Future Climate*, Scope, No. 29, John Wiley & Sons, Chisester, 1989, p. 208.

¹⁵ Ramanathan, V., et al, *Trace Gas Trends and Their Potential Role in Climate Change*, Journal of Geophysical Research No.81, 1985.

¹⁶ Bolin, B., *The Greenhouse Effect, Climate Change and Ecosystems*, (s.f.).

¹⁷ Fuente: <http://www.bibliotecavirtual.com.do/Geografia/EfectoInvernadero.htm> (2005).

El principal gas de efecto invernadero, es el vapor de agua, responsable del 80% del efecto; el resto son gases en muy poca concentración denominados *gases traza*, que existen en muy pequeñas cantidades, pero que tienen una gran importancia. Los más sobresalientes de estos gases son el CO₂, el CH₄, el N₂O, el SF₆, los HFC, los PFC y el ozono, presentes en la atmósfera. Estos gases, a través del efecto invernadero, mantienen caliente la baja atmósfera y la superficie terrestre. En la tabla 1.2 se muestran los principales gases de efecto invernadero.

GASES DE EFECTO INVERNADERO	
CO ₂	Dióxido de Carbono
CH ₄	Metano
N ₂ O	Óxido Nitroso
HFC	Hidrofluorocarbonos
PFC	Perfluorocarbonos
SF ₆	Hexafluoruro de azufre

Tabla 1.2 Gases de efecto invernadero¹⁸.

El cambio climático provocado por el hombre está relacionado esencialmente con la intensificación del efecto invernadero, como resultado de los aumentos en las concentraciones de los gases traza¹⁹. Hablamos de intensificación, pues todos estos gases, a excepción de los clorofluorocarbonos (CFC), se producen naturalmente en la atmósfera y se eliminan, también de forma natural, a través de los ciclos biogeoquímicos que ya hemos mencionado. La concentración de dióxido de carbono en la atmósfera ha pasado de 315 [ppm] en 1958 a 343 [ppm] en 1984, y podemos afirmar con certeza que este aumento se ha debido a la explotación y consumo de combustibles fósiles²⁰.

Son las emisiones provenientes de la combustión y de la transformación del petróleo, el carbón y el gas natural, con grandes reservas aún por consumir, las que pueden provocar cambios climáticos notables, estas emisiones suponen casi el 80% del total, mientras que el resto correspondería a la deforestación y al cambio del uso del suelo. El análisis de muestras de aire atrapado en el hielo de los glaciares ha permitido, además, establecer que el aumento de las

¹⁸ Fuente: Elaboración propia.

¹⁹ Jaeger, J., Barry, E.G., *The Effects of Human Activity on the Climate of the Earth*, Cambridge University Press, 1990 P. 336.

²⁰ Bolin, B., et al ii, *The Greenhouse Effect, Climatic Change and Ecosystem*, (s.f.).

concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera se corresponde con los inicios de la Revolución Industrial. Las mediciones de la composición química del aire, lejos de los centros industriales, muestran un incremento en las concentraciones del gas desde hace más de 30 años, se trata por tanto de un fenómeno global²¹.

En enero de 2001 la Comisión Intergubernamental de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) sobre el Cambio Climático presentó un informe en el que se ponía de manifiesto que la temperatura media de la Tierra había aumentado 0.6 grados en el siglo XX. Algunos científicos han planteado que este incremento en la temperatura podría ser sólo parte de una fluctuación natural. Sin embargo, este último informe de la ONU pone de manifiesto que la actividad humana contribuye sustancialmente a este cambio climático y que el calentamiento de la superficie terrestre parece deberse, principalmente, al aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera²².

El efecto de estos incrementos podría ser un aumento global de la temperatura, estimado de 1.4 a 5.8 grados Celsius entre 1990 y 2100. Este calentamiento puede originar importantes cambios climáticos, afectando a la agricultura y provocando el incremento del nivel de los océanos que desde finales de la década de 1960 ha crecido entre 0.1 y 0.2 [m] y que podría aumentar de 0.09 a 0.88 [m] entre 1990 y 2100. De ocurrir esto, millones de personas se verían afectadas por las inundaciones en islas y planicies costeras. Otro efecto de la concentración de ciertos gases de combustión en la atmósfera es la llamada lluvia ácida, que es la precipitación, normalmente en forma de lluvia, pero también en forma de nieve, niebla o rocío, que presenta un pH del agua inferior a 5.65. Entendemos por lluvia ácida la deposición sobre la vegetación, la hidrosfera terrestre y la infraestructura de las sociedades humanas, de elementos químicos que, al disolverse en agua, aumentan su acidez.

La lluvia ácida se produce cuando las emisiones industriales se combinan con la humedad atmosférica. Los elementos químicos más comunes que participan son los óxidos de nitrógeno y

²¹ Jacobson, H., et al, *A Framework for Research on the Human Dimensions of Global Environmental Change*, p. 24, (s.f).

²² Enciclopedia *Encarta 2004*, Microsoft Corporation.

el dióxido de azufre²³ que forman ácidos nitroso, nítrico, sulfuroso y sulfúrico. Las nubes pueden llevar los contaminantes a grandes distancias, dañando bosques y lagos muy alejados de las zonas en las que se originaron. La lluvia ácida, además de quemar las hojas de las plantas también acidifica el agua de los lagos dejando sin vida muchos de estos ecosistemas.

Hay similar preocupación por el brusco aumento del contenido de metano en la atmósfera ya que su concentración ha aumentado desde 1978. Más o menos el 80% del gas es producido por descomposición de materia orgánica y añadido al efecto invernadero, el metano reduce el volumen atmosférico de iones hidroxilo, alterando así la capacidad de la atmósfera para autodepurarse de contaminantes.

Cada año, los países industriales generan miles de millones de toneladas de contaminantes. Los más frecuentes y más ampliamente dispersos son el monóxido de carbono, el dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno, el dióxido de carbono y las partículas en suspensión. El nivel suele expresarse en términos de concentración atmosférica (microgramos de contaminantes por metro cúbico de aire) o, en el caso de los gases, en partes por millón, es decir, el número de moléculas de contaminantes por millón de moléculas de aire. Muchos contaminantes proceden de fuentes fácilmente identificables como el dióxido de azufre que procede de las centrales eléctricas que queman carbón o petróleo.

La concentración de los contaminantes se reduce al dispersarse éstos en la atmósfera, proceso que depende de factores climatológicos como la temperatura, la velocidad del viento, el movimiento de sistemas de altas y bajas presiones y la interacción de éstos con la topografía local como montañas y valles. La temperatura suele decrecer con la altitud, pero cuando una capa de aire frío se asienta bajo una capa de aire caliente produciendo una inversión térmica, la mezcla atmosférica se retarda y los contaminantes se acumulan cerca del suelo. Un periodo de tan sólo tres días de concentraciones elevadas de productos peligrosos en áreas de alta contaminación puede producir enfermedades e incluso la muerte²⁴.

²³ Jacobson H., et al, *A Framework for Research on the Human Dimensions of Global Environmental Change*, p. 26, (s.f.).

²⁴ Ídem.

1.3 El Protocolo de Kyoto.

Muchos países tienen normas sobre la calidad del aire con respecto a las sustancias peligrosas que pueda contener. Estas normativas marcan los niveles máximos de concentración que permiten garantizar la salud pública, y controlan los niveles de emisión (lo que emite la fuente contaminante) e inmisión (lo que recibe el organismo receptor, por ejemplo una persona). En ese sentido, se han establecido normas para limitar las emisiones contaminantes del aire que producen las diferentes fuentes de contaminación. Sin embargo, la naturaleza de este problema no podrá resolverse sin un acuerdo internacional.

En junio de 1992, la Conferencia sobre Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas, también conocida como la Cumbre de la Tierra, desarrolló y legitimó una agenda de medidas relacionadas con el cambio medioambiental. El propósito fue determinar qué reformas medioambientales era necesario emprender a largo plazo, e iniciar procesos para su implantación y supervisión internacionales. Se celebraron convenciones para discutir y aprobar documentos sobre el medio ambiente.

Los principales temas abordados en estas convenciones incluyeron el cambio climático, la biodiversidad, la protección forestal, la Agenda 21 y la Declaración de Río. La Cumbre de la Tierra fue un acontecimiento histórico de gran significado. No sólo hizo del medio ambiente una prioridad a escala mundial, sino que a ella asistieron delegados de 178 países, lo que la convirtió en la mayor conferencia celebrada hasta ese momento.

En diciembre de 1997 se celebró en Japón la Tercera Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático donde más de 160 países adoptaron el denominado Protocolo de Kyoto, que es un acuerdo jurídicamente vinculante cuyo objetivo es que, en el período 2008-2012, los países industrializados reduzcan sus emisiones colectivas de gases que causan el efecto invernadero en un 5.2%, respecto a 1990. El acuerdo fue suscrito en la ciudad japonesa de Kyoto el 10 de diciembre de 1997, entonces 34 países industrializados, la mayor parte de ellos europeos, se comprometieron a cumplir determinadas metas.

Para que el Protocolo entrara en vigor tenía que ser ratificado por los países industrializados causantes del 55% de las emisiones de estos gases. Cuatro de los treinta y cuatro países originales no lo han ratificado: Estados Unidos (responsable por el 36.1% de las emisiones en 1990), Australia (2.1%), Liechtenstein (0.001%) y Mónaco (0.001%). En 2004, después de dos años de debates y negociaciones, Rusia ratificó el Protocolo, lo que posibilitó que noventa días después, el 16 de febrero de 2005, éste entrara en vigor. Hasta la fecha 141 países se han adherido al acuerdo.

Los países industrializados firmantes se han comprometido a reducir las emisiones de seis gases contaminantes (CO₂, CH₄, N₂O, SF₆, HFC y PFC) especificados en el Anexo A del protocolo en un promedio de 5.2% entre los años 2008 y 2012, en relación con los niveles registrados en 1990. Cada país signatario tiene sus propias metas. Las naciones de la Unión Europea deberán disminuir sus emisiones totales en un 8% (aunque algunos países miembros tienen metas diferentes en relación al desarrollo de su economía), mientras que Japón deberá hacerlo en un 5%.

En cambio, a algunos países con bajas emisiones se les autoriza a incrementarlas, lo que permite las negociaciones entre los grandes emisores y éstos. El razonamiento es que, para la atmósfera, las fronteras nacionales carecen de significado, si un país industrializado invierte en el desarrollo de un mecanismo limpio desde el punto de vista medioambiental en otro país, esta inversión puede incluirse como parte de su reducción de emisiones.

Este sistema fue un gran incentivo para que Rusia decidiera ratificar el protocolo; como éste dejó de emitir miles de toneladas debido al cierre de sus industrias pesadas luego de la desintegración de la Unión Soviética, ahora puede recibir inversiones de países más contaminantes.

En la tabla 1.3 se muestra la clasificación de las principales fuentes generadoras de gases de efecto invernadero del Anexo A del Protocolo de Kyoto. En la tabla 1.4 se presenta a los principales países industrializados emisores y su porcentaje de emisiones en 1990.

FUENTES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO		
Quema de combustible	Desechos	Procesos industriales
Industrias de energía Industria manufacturera y construcción Transporte Otros sectores Otros	Eliminación de desechos sólidos en la tierra Tratamiento de las aguas residuales Incineración de desechos Otros	Productos minerales Industria química Producción de metales Producción de halocarbonos y HF ₆ Consumo de halocarbonos y HF ₆ Otros

Tabla 1.3 Fuentes de gases de efecto invernadero²⁵.

PRINCIPALES PAÍSES EMISORES	
Estados Unidos	36.1%
Unión Europea	24.2%
Federación Rusa	17.4%
Japón	8.5%
Canadá	3.3%
Australia	2.1%

Tabla 1.4 Países emisores en 1990²⁶.

Las perspectivas en lo que al medio ambiente se refiere son poco claras y a pesar de los cambios económicos y políticos, las sociedades deben reconocer que el medio ambiente es finito por lo que se debe abrir paso a un uso más racional de los recursos y a un cambio de actitud por parte de la humanidad, asimismo ésta debe reconocer que atacar el medio ambiente pone en peligro su propia supervivencia.

1.4 La energía nuclear en el mundo.

Entre las distintas fuentes energéticas de que disponen los países, la energía nucleoelectrónica representa una de las pocas opciones que permite producir energía en todas sus formas, es decir, como electricidad, calor industrial en régimen de baja y alta temperatura y vapor industrial, en forma económica y en condiciones ambientalmente aceptables. Las preocupaciones respecto de los efectos ambientales del quemado de combustibles fósiles para la producción de energía han fomentado el interés por las fuentes de energía poco contaminantes. Por lo tanto, el

²⁵ Fuente: <http://www.medioambiente.gov.ar/acuerdos/conveniones/unfccc/ccprokio.htm> (2005).

²⁶ Fuente: <http://www.bbc.co.uk/spanish/especiales/protocolokioto.htm> (2005).

desarrollo y despliegue de la energía nucleoelectrica podrían ser para algunas naciones una opción atractiva para contribuir a un suministro energético seguro y fiable a largo plazo.

Las centrales nucleoelectricas utilizan la energía liberada en los procesos de fisión nuclear para producir electricidad, es decir que no utilizan combustibles fósiles como fuente de energía primaria, lo que las exime de emitir gases de efecto invernadero a la atmósfera. Dos características fundamentales de la fisión nuclear en cuanto a la producción práctica de energía resultan evidentes. En primer lugar, la energía liberada por la fisión es muy grande. La fisión de 1 [kg] de uranio 235 (U^{235}) libera 18.7 millones de [kWh] en forma de calor. En segundo lugar, el proceso de fisión iniciado por la absorción de un neutrón en el U^{235} libera un promedio de 2.5 neutrones además de núcleos fisionados. Estos neutrones provocan rápidamente la fisión de varios núcleos más, con lo que liberan otros cuatro o más neutrones adicionales e inician una serie de fisiones nucleares sostenidas, una reacción en cadena que lleva a la liberación continua de energía²⁷.

El primer reactor nuclear, el APS-1, entró en operación en junio de 1954 en Obninsk, cerca de Kaluga en la Unión Soviética, actualmente existen alrededor de 440 reactores nucleares comerciales operando en 31 países, con una capacidad total de más de 364,000 [MWe]. Estos reactores proveen aproximadamente el 16% de la electricidad que genera el mundo entero y sus eficiencias se incrementan día con día. Un total de 56 países operan 284 reactores de investigación y alrededor de 220 en barcos y submarinos.

La tecnología nuclear fue descubierta en la década de los años cuarenta y durante la Segunda Guerra Mundial su investigación se enfocó inicialmente a la producción de armamento nuclear, fue hasta la década de los años cincuenta que la atención se desvió hacia los usos o aplicaciones pacíficas de la fisión nuclear y particularmente hacia la generación de energía eléctrica.

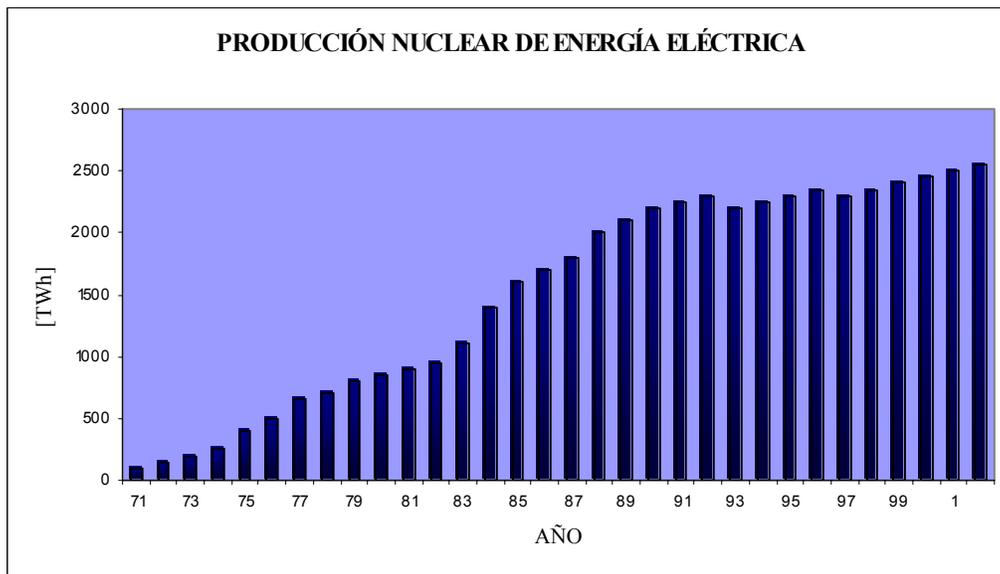
Actualmente, el mundo en su totalidad produce tanta electricidad proveniente de la energía nuclear como la generada por la combinación de todas las fuentes de energía en 1960. La energía nuclear de tipo civil puede ahora jactarse de tener más de 11,000 años-reactor de

²⁷ World Nuclear Association <http://www.world-nuclear.org/info/reactors.htm> (Información a enero del 2005).

experiencia y proveer el 16% de las necesidades globales en más de treinta países. Además son varios los países que desarrollan reactores experimentales para proveer una fuente de radiación de neutrones a la investigación científica y a la producción de isótopos tanto para la industria como para la medicina.

Por otro lado, el uso de reactores nucleares para la propulsión naval ha jugado un papel importante por más de cinco décadas, impulsando submarinos. Hay más de 150 embarcaciones que son impulsadas por más de 220 reactores marinos que agregan 12,000 años-reactor de experiencia. Actualmente Estados Unidos y Rusia están en proceso de desmantelar algunos de sus submarinos nucleares, sin embargo Rusia aún opera una flota de 8 rompehielos y un carguero de 62,000 toneladas que son impulsados por reactores nucleares.

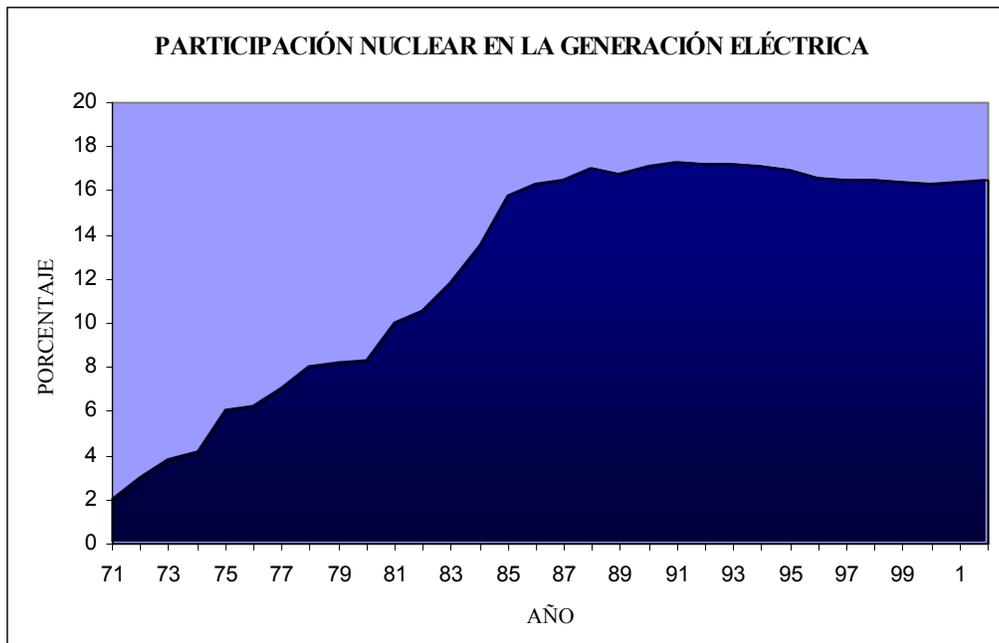
Cabe mencionar que actualmente alrededor de 30 reactores de potencia están bajo construcción, lo que equivale a 6% de la capacidad existente, y que al menos 35 están firmados y en proceso de planeación, equivalentes a 10% de la capacidad actual²⁸. A continuación se muestran las gráficas 3.1 y 3.2 que muestran la producción y participación de la energía nucleoelectrica en el mundo.



Gráfica 1.1 Producción mundial de energía eléctrica por medios nucleares en [TWh]²⁹.

²⁸ Fuente: World Nuclear Association <http://www.world-nuclear.org/info/reactors.htm> (2005).

²⁹ Fuente: Ídem.



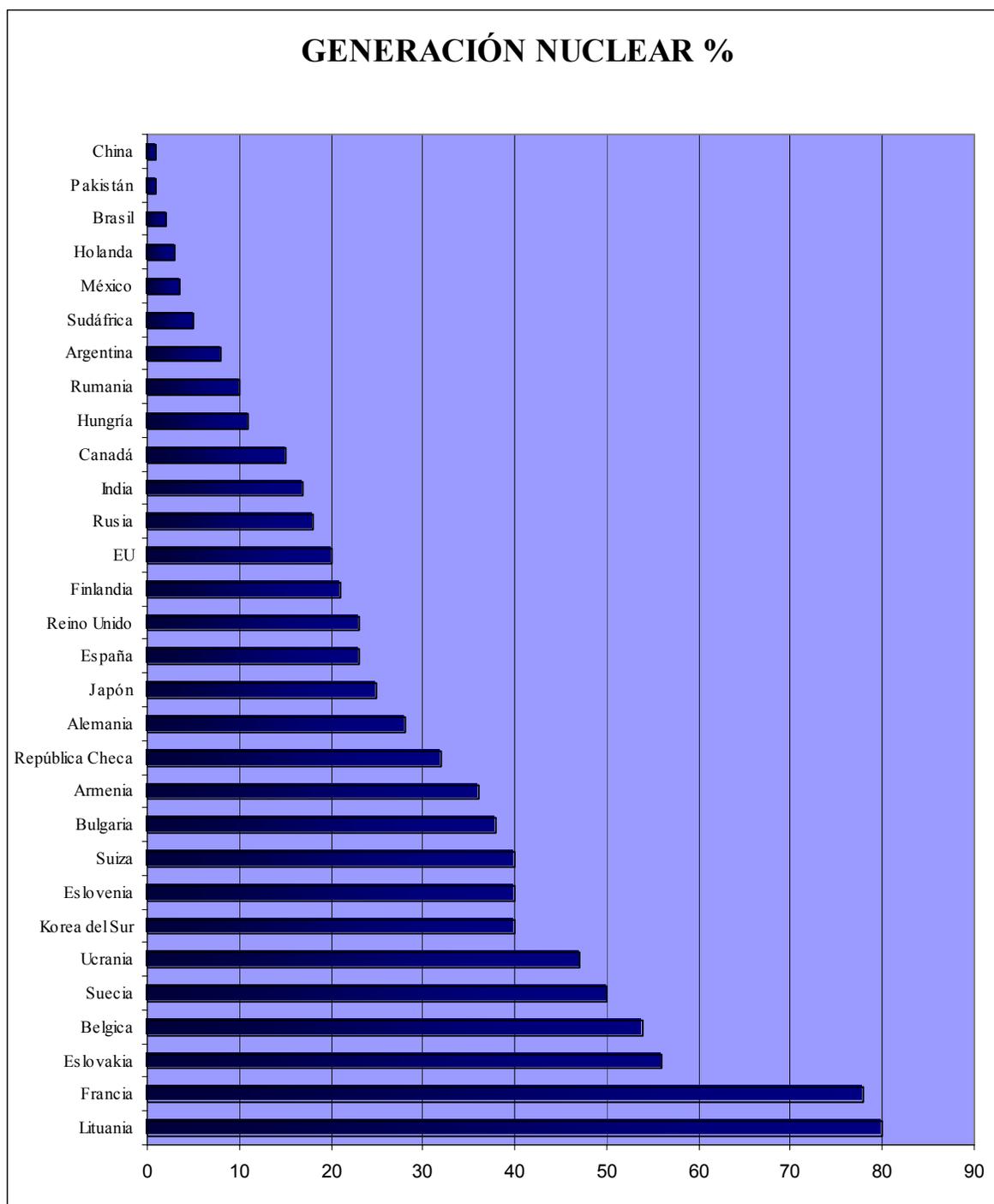
Gráfica 1.2 Participación nuclear en la generación mundial de energía eléctrica³⁰.

1.5 Indicadores relevantes.

Diecisiete países dependen de la energía nuclear en al menos un cuarto del total de su producción de electricidad. Francia y Lituania obtienen alrededor de tres cuartos de su electricidad por medios nucleares mientras que Bélgica, Bulgaria, Corea del Sur, Eslovenia, Hungría, Slovakia, Suecia, Suiza, y Ucrania obtienen un tercio o más. Japón, Alemania y Finlandia obtienen más de un cuarto de su electricidad por medio de la energía nuclear mientras que Estados Unidos obtiene un quinto.

A continuación la gráfica 1.3 muestra el porcentaje de generación nuclear para países que cuentan con reactores nucleares al primero de enero de 2005.

³⁰ Fuente: World Nuclear Association <http://www.world-nuclear.org/info/reactors.htm> (2005).



Gráfica 1.3 Porcentaje de generación de energía eléctrica por país³¹.

A continuación se muestra la tabla 1.5 con los reactores nucleares en operación, en construcción, en proceso de planeación al primero de enero de 2005 y los requerimientos anuales de uranio en 2004.

³¹ Fuente: World Nuclear Association <http://www.world-nuclear.org/info/reactors.htm> (2005).

1. Antecedentes.

	Generación de electricidad por medios nucleares 2003		Reactores en operación		Reactores en construcción		Reactores planeados		Reactores Propuestos		Uranio Requerido Anual (2004)
	billones de kWh	%e	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	U [Ton]
Argentina	7	8.6	2	935	0	0	1	692	0	0	140
Armenia	1.8	35	1	376	0	0	0	0	0	0	54
Bélgica	44.6	55	7	5728	0	0	0	0	0	0	1163
Brasil	13.3	3.7	2	1901	0	0	1	1245	0	0	303
Bulgaria	16	38	4	2722	0	0	0	0	1	1000	340
Canadá	70.3	12.5	17	12080	1	515	2	1030	0	0	1692
China	79	**	15	11471	4	4500	6	6000	20	17000	2127
Rep. Checa	25.9	31	6	3472	0	0	0	0	2	1900	474
Egipto	0	0	0	0	0	0	0	0	1	600	0
Finlandia	21.8	27	4	2656	0	0	1	1600	0	0	542
Francia	420.7	78	59	63473	0	0	0	0	1	1600	10181
Alemania	157.4	28	18	20643	0	0	0	0	0	0	3704
Hungría	11	33	4	1755	0	0	0	0	0	0	271
India	16.4	3.3	14	2493	9	4128	0	0	24	13160	299
Indonesia	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2000	0
Irán	0	0	0	0	1	950	1	950	3	2850	125
Israel	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1200	0
Japón	230.8	25	53	45275	3	3294	13	14682	0	0	7661
Corea del Norte	0	0	0	0	1	950	1	950	0	0	0
Corea del Sur	123.3	40	20	16840	0	0	8	9200	0	0	2819
Lituania	14.3	80	1	1185	0	0	0	0	0	0	290
México	10.5	5.2	2	1310	0	0	0	0	0	0	233
Holanda	3.8	4.5	1	452	0	0	0	0	0	0	112
Pakistán	1.8	2.4	2	425	0	0	1	300	0	0	57
Rumania	4.5	9.3	1	655	1	655	0	0	3	1995	90
Rusia	138.4	17	31	21743	4	3600	1	925	8	9375	3013
Eslovaquia	17.9	57	6	2472	0	0	0	0	2	840	370
Eslovenia	5	40	1	676	0	0	0	0	0	0	128
Sudáfrica	12.7	6.1	2	1842	0	0	0	0	1	125	356
España	59.4	24	9	7584	0	0	0	0	0	0	1629
Suecia	65.5	50	11	9459	0	0	0	0	0	0	1536
Suiza	25.9	40	5	3220	0	0	0	0	0	0	596
Turquía	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4500	0
Ucrania	76.7	46	15	13168	0	0	1	950	0	0	1512
Reino Unido	85.3	24	23	11852	0	0	0	0	0	0	2488
EU	763.7	19.9	103	97542	1	1065	0	0	0	0	22353
Vietnam	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2000	0
Mundo	2525	16	439	365,405	25	19,657	37	38,524	74	60,000	66,658

Tabla 1.5 Reactores nucleares en el mundo y requerimientos de Uranio³².

³² Fuente: WNA, (2005), Producción y porcentaje de energía eléctrica: IAEA, (2004).
WNA: Global Nuclear Fuel Market.

1.6 Situación Nacional.

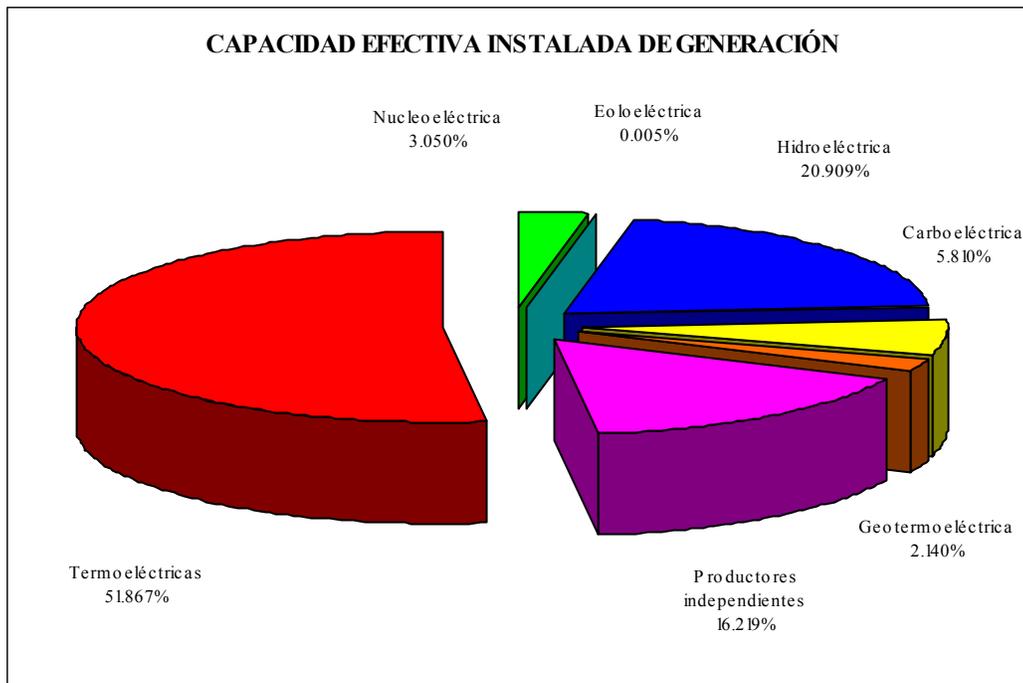
En nuestro país, la CFE es la empresa que genera, transmite, distribuye y comercializa energía eléctrica para 22.3 millones de clientes, lo que representa casi 80 millones de mexicanos. CFE es un organismo público descentralizado, con personalidad jurídica y patrimonio propio. El compromiso de la empresa es ofrecer servicios de excelencia a los clientes, garantizando altos índices de calidad en todos sus procesos, al nivel de las mejores empresas eléctricas del mundo.

La CFE ofrece el servicio de energía eléctrica en la mayor parte del país, con excepción del Distrito Federal y algunas poblaciones cercanas a éste, donde el servicio está a cargo de Luz y Fuerza del Centro (LyFC).

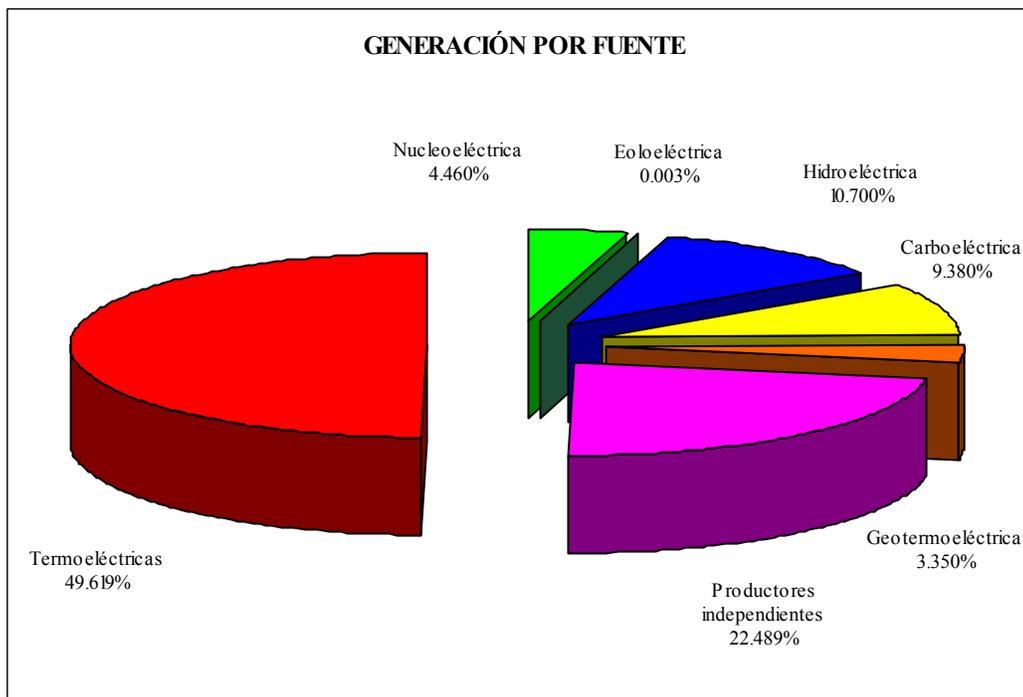
La generación de energía eléctrica en la CFE se realiza por medio de las tecnologías disponibles en la actualidad, centrales hidroeléctricas, termoeléctricas, eólicas y nuclear. Al cierre del mes de junio del año 2004 la CFE, incluyendo los productores independientes de energía, cuenta con una capacidad efectiva instalada para generar energía eléctrica de 44,787.71 [MW] (ver gráfica 1.4), de los cuales: 7,264.90 [MW] son de los productores independientes, 9,363.82 [MW] son de hidroeléctricas, 23,232.44 [MW] corresponden a las termoeléctricas de CFE que consumen hidrocarburos; 2,600.00 [MW] a carboeléctricas; 959.50 [MW] a geotermoeléctricas; 1,364.88 [MW] a la nucleoelectrica y 2.18 [MW] a la eoloeléctrica.

A lo largo de los años, la generación ha aumentado para cumplir el objetivo fundamental de la CFE, que es avanzar para atender todas las necesidades de energía eléctrica de la población, de la industria, la agricultura, el comercio y los servicios en México.

En la gráfica 1.5 se presenta el porcentaje de la capacidad de generación de la CFE por fuente primaria de energía del total de 100.24 [TWh] al 30 de junio de 2004.



Gráfica 1.4 Capacidad efectiva instalada de generación³³.



Gráfica 1.5 Generación por fuente³⁴.

³³ Fuente: CFE, <http://www.cfe.gob.mx>

³⁴ Fuente: Ídem.

A continuación se muestra la tabla 1.6 con las capacidades instaladas de generación y la generación de CFE y los productores independientes.

		1999	2000	2001	2002	2003	2004
Capacidad [MW]	CFE	34,839	35,869	37,691	36,855	36,971	37,523
	PIE'S	-	468	1,455	3,495	6,756	7,265
	Total	34,839	35,853	37,691	40,350	43,727	44,788
Generación [TWh]	CFE	179.07	191.20	194.92	198.88	169.32	77.70
	PIE'S	-	1.29	4.54	21.83	31.62	22.54
	Total	179.07	192.49	199.46	220.71	220.94	100.24

Tabla 1.6 Capacidad de generación³⁵.

En el ámbito nuclear, la Gerencia de Centrales Nucleoeléctricas de la CFE, cuenta con la CNLV, la única central nucleoeléctrica del país que está localizada sobre la costa del Golfo de México, en el municipio de Alto Lucero, Estado de Veracruz. Está integrada por dos unidades, cada una con una capacidad efectiva de 682.44 [MWe]; los reactores son tipo Agua Hirviendo (BWR-5) de ciclo directo y la contención tipo Mark II.

La Unidad 1 ha generado más de 65.7 millones de [MWh], con una disponibilidad de 84.41% y un factor de capacidad de 80.72%; mientras que la Unidad 2 ha generado más de 46.1 millones de [MWh], siendo su factor de disponibilidad de 84.78% y el de Capacidad de 81.65%. Ambas unidades representan el 2.99% de la capacidad efectiva instalada de CFE³⁶, con una contribución a la generación del 4.46%. En cuanto a la seguridad, la operación de la CNLV cumple con las más estrictas normas; su operación es vigilada por los diversos organismos reguladores nacionales e internacionales responsables de la correcta aplicación de la energía nuclear.

³⁵ Ídem, incluyendo a los productores independientes, información al 30 de junio de 2004.

³⁶ Incluyendo a los productores independientes.

2 Marco Tecnológico.

2.1 Energía nucleoelectrónica³⁷.

Toda la materia del Universo está formada por moléculas, que a su vez se encuentran constituidas por átomos, cada uno de éstos está formado fundamentalmente, por un núcleo compuesto de protones y neutrones y por electrones que giran alrededor de éste. En la naturaleza existen más de doscientos átomos estables con distintos números de masa que dan lugar a más de cien elementos plenamente identificados. Cada elemento está formado por átomos del mismo número atómico, pero que pueden tener diferente número de masa. Estos átomos de un mismo elemento reciben el nombre de isótopos, por ejemplo, el elemento Uranio tiene fundamentalmente dos isótopos, el U^{235} , que se encuentra en la naturaleza con una proporción de alrededor de 0.7%, y el U^{238} que constituye el restante 93%.

Los experimentos sobre la radioactividad de ciertos elementos realizados a fines del siglo pasado por Henri Becquerel y por el matrimonio Curie, condujeron en 1902 al descubrimiento del fenómeno de la transmutación de un átomo en otro diferente, a partir de una desintegración espontánea que ocurría con gran desprendimiento de energía. Poco después, en 1905, los estudios de Einstein explicaron que dicho desprendimiento de energía era el resultado de la transformación de pequeñísimas cantidades de masa. Ambos hechos condujeron a la conclusión

³⁷ Publicaciones de CFE, Central Laguna Verde, *Del fuego a la energía nuclear*, México 2002. y <http://www.cfe.gob.mx>

de que si se lograba desintegrar a voluntad los átomos de algunos elementos, seguramente se podrían obtener grandes cantidades de energía.

En 1938 Hahn, Strassman y Meitner comprobaron el fenómeno de la fisión nuclear, bombardeando núcleos de U^{235} con neutrones. En esta reacción cada núcleo se parte en dos núcleos nuevos de masas inferiores, emite radiaciones, libera energía térmica y emite dos o tres nuevos neutrones. Esta última circunstancia llevó al físico Enrico Fermi a tratar de mantener y controlar una reacción nuclear, utilizando los neutrones producidos en la fisión de núcleos de U^{235} , para fisiónar otros núcleos del mismo isótopo, en lo que se denomina una “reacción en cadena”, que finalmente logró producir en diciembre de 1942; el control de la reacción se obtuvo mediante la absorción de neutrones por elementos como el boro y el cadmio. Sin embargo no fue sino hasta la primera mitad de la década de los cincuenta, cuando por primera vez se empleó la energía nuclear para generar electricidad.

2.2 Aspectos generales de las centrales nucleoelectricas³⁸.

Una nucleoelectrica es una central térmica de producción de electricidad, su principio de funcionamiento es esencialmente el mismo que el de las plantas que funcionan con carbón, combustóleo o gas; la conversión de calor en energía eléctrica. Esta conversión se realiza en tres etapas. En la primera, la energía del combustible se utiliza para producir vapor a elevada presión y temperatura. En la segunda etapa la energía del vapor se transforma en movimiento de una turbina. En la tercera, el giro del eje de la turbina se transmite a un generador, que produce energía eléctrica.

Las centrales nucleoelectricas se diferencian de las demás centrales térmicas solamente en la primera etapa de conversión, es decir, en la forma de producir vapor. En las centrales convencionales el vapor se produce en una caldera donde se quema de una forma continua

³⁸ Ídem.

carbón, combustóleo o gas natural. Las nucleoelectricas tienen un reactor nuclear, que equivale a la caldera de las centrales convencionales. El reactor no tiene sistemas de inyección continua de combustible y aire, ni en él se necesita un dispositivo de eliminación continua de residuos sólidos. Tampoco se producen gases de combustión. Un reactor nuclear consta de tres elementos esenciales: el combustible, el moderador y el fluido refrigerante.

El combustible nuclear

En las centrales nucleoelectricas el calor se obtiene a partir de la fisión del uranio, sin que se produzca combustión. En un reactor puede emplearse como combustible uranio natural o bien uranio enriquecido aunque existen otros materiales fisibles que pueden usarse como combustible. Estos son el Pu^{239} y el U^{233} que se producen artificialmente a partir del U^{238} y del Th^{232} respectivamente.

El uranio natural se coloca en los reactores en forma de uranio metálico o de óxido de uranio (UO_2) dispuesto en barras compactas o tubos de pocos centímetros de diámetro y varios de longitud. El uranio enriquecido se utiliza en forma de óxido de uranio (UO_2) con el que se fabrican pequeñas pastillas cilíndricas normalmente de un poco más de un centímetro de diámetro y longitud.

Para contener el combustible y los productos formados en la fisión, las pastillas se encapsulan en un tubo perfectamente hermético, que además lo protege de la corrosión y la erosión del fluido refrigerante. El tubo es de aleaciones especiales de circonio.

El moderador

Contrariamente a lo que puede sugerir su nombre, el moderador no mitiga la reacción de fisión sino que la hace posible. Los neutrones que se generan como consecuencia de la fisión de los núcleos de U^{235} tienen, al emitirse, velocidades del orden de 20,000 [km/s]. Para que estos neutrones puedan a su vez fisiónar a otros núcleos de U^{235} de una manera eficiente y prosiga así la reacción en cadena, se debe disminuir su velocidad hasta 2 [km/s] aproximadamente, proceso que se conoce como termalización de los neutrones. Esto se logra intercalando alguna sustancia

cuyos átomos se encargan de frenar a los neutrones, por medio de choques, provocando que estos últimos pierdan velocidad. Para que el moderador realice su labor con eficacia, debe reunir ciertas condiciones como:

- Debe tener un peso atómico ligero
- No debe absorber neutrones
- Debe tener una elevada densidad atómica

Entre los moderadores más comunes podemos citar a:

- El agua
- El grafito
- El agua pesada
- Algunos líquidos orgánicos

El fluido refrigerante

La gran cantidad de calor que se genera en el reactor a consecuencia de la reacción nuclear, debe ser extraída para producir el vapor que se requiere en la generación de energía eléctrica y, al mismo tiempo, mantener lo suficientemente baja la temperatura de los distintos elementos que se encuentran en su interior para que estos no sufran ningún deterioro. Esto se consigue mediante la acción de un fluido que se conoce como refrigerante que puede ser un gas como el dióxido de carbono (CO_2) o el helio (He), o algún líquido como el agua ligera (ordinaria), el agua pesada o el sodio fundido. El fluido refrigerante circula entre las barras de combustible impulsado por una bomba y debe reunir una serie de condiciones para que pueda cumplir su función en forma satisfactoria como:

- No debe capturar neutrones
- Debe tener un elevado calor específico
- No ser corrosivo para los tubos y demás elementos del reactor

El fluido refrigerante, tras circular alrededor de las barras de combustible, con lo que se calienta, es conducido a un intercambiador en el que cede el calor extraído del reactor a otro

circuito de agua, donde se produce el vapor. En los reactores del tipo de agua en ebullición (BWR), el vapor se produce directamente en el reactor.

Dispositivos de seguridad

Las centrales nucleoelectricas tienen una serie de dispositivos de seguridad destinados a mantener bajo control la reacción de fisión en cadena y evitar la salida de radiaciones al exterior en caso de accidentes. El primer dispositivo lo constituyen las barras de control. Se trata de unas varillas construidas con un material muy absorbedor de neutrones. Al introducirse entre las barras de combustible capturan neutrones y disminuyen con ello el número de fisiones en el combustible, frenando la reacción. Cuando es necesario detener la fisión rápidamente, las barras de control se insertan en el reactor a gran velocidad, con lo cual la reacción cesa de inmediato.

Para prevenir la posible falta de refrigeración del combustible, función que realiza normalmente el fluido refrigerante, se dispone de sistemas de emergencia que entran en funcionamiento cuando se detectan indicios de falta de refrigeración en el combustible. Finalmente el material radioactivo en el combustible está aislado del ambiente exterior por una serie de barreras que son:

- La propia pastilla de combustible
- Los tubos que encapsulan las pastillas de combustible
- La vasija del reactor. Un recipiente que encierra el combustible y el moderador construido en acero especial. Sus paredes tienen 14 centímetros de espesor.
- El edificio de contención primaria. Es un edificio estanco³⁹ que rodea la vasija del reactor y el circuito de refrigeración, construido por concreto fuertemente armado con acero. Sus paredes tienen 1.5 [m] de espesor, por dentro se recubre con una chapa de acero de 0.95 [cm] de espesor soldada herméticamente para conseguir la estanqueidad.
- Edificio de contención secundaria. Rodea la contención primaria y a todos los equipos relacionados con la operación segura del reactor. Cuenta con un sistema de aire acondicionado que mantiene una presión negativa en su interior e impide la salida del material a la atmósfera.

Los edificios de contención se diseñan para soportar sismos y huracanes de muy alta intensidad, sin que pierdan su estanqueidad.

³⁹ Que no deja pasar o rezumar el agua.

Refrigeración

Para hacer posible el ciclo termodinámico se necesita una fuente caliente y una fría. Esta última es el condensador, que consiste en una serie de tubos en cuyo interior circula el agua de enfriamiento. El vapor proveniente de la zona de baja presión de la turbina pasa por fuera de los tubos y se condensa. El agua de refrigeración así calentada puede devolverse directamente al medio de donde se extrajo. Se dice entonces que la central funciona en ciclo abierto. En otro tipo de centrales el agua caliente se hace pasar previamente por una torre de enfriamiento donde una parte se evapora enfriando al resto. Una vez enfriada, el agua se recircula al condensador. Se dice entonces que la central funciona en circuito cerrado. Hemos visto que por el rendimiento del proceso de transformación de energía térmica en mecánica es necesario eliminar una gran cantidad de calor. Esto no es una característica específica de las centrales nucleares, sino de todas las centrales térmicas, si bien es verdad que las segundas tienen rendimientos algo mayores en la transformación.

Producción de energía eléctrica

La rotación de la turbina provocada por el vapor se transmite a un generador, el cual consiste de conductores eléctricos que giran en un campo magnético, produciendo electricidad. La energía eléctrica producida pasa a la subestación donde se eleva su tensión para disminuir las pérdidas por el calentamiento en las líneas de transmisión, ya que la potencia es producto del voltaje por la corriente y las pérdidas de transmisión son proporcionales al cuadrado de la corriente. Mediante líneas de transmisión, la energía se integra al sistema que la hace llegar hasta los usuarios.

Configuración de una central nucleoelectrica

Una central nucleoelectrica está constituida básicamente por seis edificios principales y otros secundarios. Los seis edificios principales son:

- Edificio del reactor. Alberga en su interior al reactor nuclear, sus sistemas auxiliares y los dispositivos de seguridad, la plataforma de recambio de combustible y la alberca de almacenamiento de combustible irradiado.

- Edificio del turbogenerador. Aloja a las turbinas de alta y baja presión, el generador eléctrico y su excitador, el condensador, los precalentadores de agua de alimentación y los recalentadores de vapor.
- Edificio de control. En su interior están el cuarto de control y la computadora de procesos, cuarto de cables, los sistemas de aire acondicionado, el banco de baterías, los laboratorios radioquímicos y el acceso de personal al edificio del reactor.
- Edificio de generadores diesel. Aloja los tres generadores diesel que se utilizan para el suministro de energía eléctrica a los sistemas de refrigeración de emergencia.
- Edificio de tratamiento de residuos radioactivos. Aloja los sistemas de tratamiento de residuos sólidos, líquidos y gaseosos de mediano y bajo nivel de radioactividad.
- Edificio de la planta de tratamiento de agua y del taller mecánico. Contiene la planta de producción de agua desmineralizada de alta pureza para su uso en el ciclo de vapor. También contiene el taller mecánico para reparación de equipos y mantenimiento.

Los edificios secundarios son: toma de agua de enfriamiento para el condensador y los componentes nucleares; la subestación eléctrica; el edificio administrativo; el edificio de almacenamiento de partes de repuesto; el edificio de acceso; el edificio de almacenamiento temporal de residuos de mediano y bajo nivel de radioactividad y el edificio de entrenamiento y del centro de información pública.

Tipos de centrales nucleoelectricas

Las centrales nucleoelectricas pueden ser de varios tipos, dependiendo de las características del reactor. Es decir, de las características del combustible, moderador y fluido refrigerante que utilizan. Comercialmente, los tipos de centrales más comunes son:

1. Reactor de agua pesada a presión (Pressurized Heavy Water Reactor-PHWR o CANDU)
2. Reactor de agua a presión (Pressurized Water Reactor-PWR)
3. Reactor de agua hirviente (Boiling Water Reactor-BWR)
4. Reactor enfriado por dióxido de carbono y moderado por grafito (Gas Cooled Reactor-GCR)
5. Reactor rápido de cría enfriado por sodio (Liquid Metal Fast Breeder Reactor-LMFBR)

2.3 Central Nucleoeléctrica Laguna Verde⁴⁰.

La CNLV está localizada sobre la costa del Golfo de México en el kilómetro 42.5 de la carretera federal Cardel-Nautla en el municipio de Alto Lucero, en el Estado de Veracruz. Geográficamente se encuentra a 60 [Km] al Noreste de la ciudad de Xalapa-Enríquez, 70 [Km] al Noroeste del puerto de Veracruz y 290 [Km] al noreste de México. En la figura 2.1 se muestra la ubicación de la CNLV.

La central está integrada por dos unidades, cada una con una capacidad actual de 682.44 [MW]; los reactores son de tipo Agua Hirviente (BWR-5) de ciclo directo y la contención tipo MARK-II. El sistema nuclear de suministro de vapor (NSSS) fue fabricado por General Electric Co. y el Turbogenerador por Mitsubishi Heavy Industries. Con la certificación del organismo regulador mexicano Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas (CNSNS), la Secretaría de Energía (SENER) otorgó las licencias para Operación Comercial a la unidad 1 el 29 de julio de 1990 y a la unidad 2 el 10 de abril de 1995.

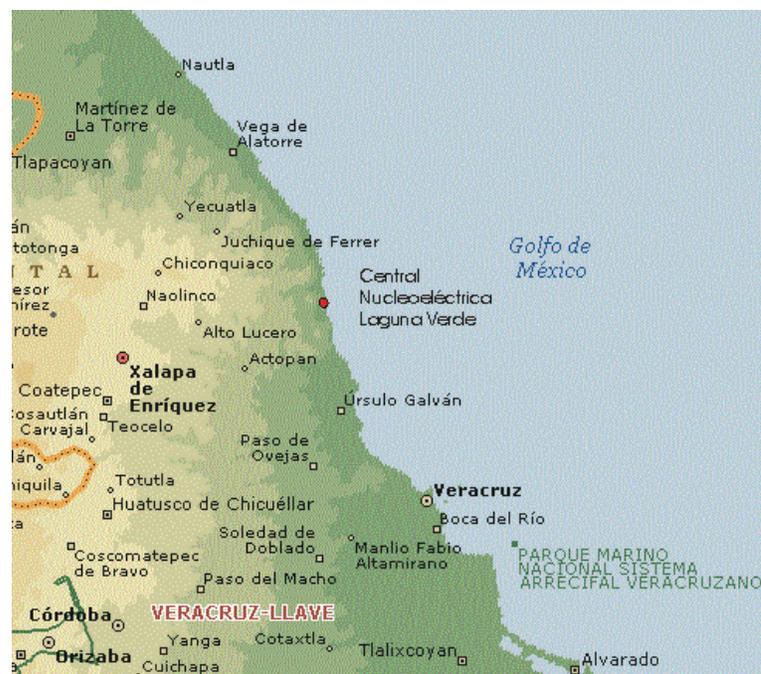


Figura 2.1 Ubicación de la CNLV⁴¹.

⁴⁰ Publicaciones de CFE, *Central Laguna Verde*, México, 1999 y <http://www.cfe.gob.mx>

⁴¹ Fuente: Imagen modificada de Enciclopedia Microsoft *Encarta 2004*, Microsoft Corporation.

Configuración de la central

La central consta de dos unidades, cada una con capacidad de 682.44 [MW] netos, equipadas con reactores que operan con Uranio enriquecido como combustible, y agua en ebullición como moderador y refrigerante (BWR). La unidad 1 cuenta con los siguientes edificios (Ver figura 2.2):

- A. Edificio del reactor
- B. Edificio del turbogenerador
- C. Edificio de control
- D. Edificio de generadores diesel
- E. Edificio de tratamiento de residuos
- F. Edificio de la planta de tratamiento de agua y taller mecánico

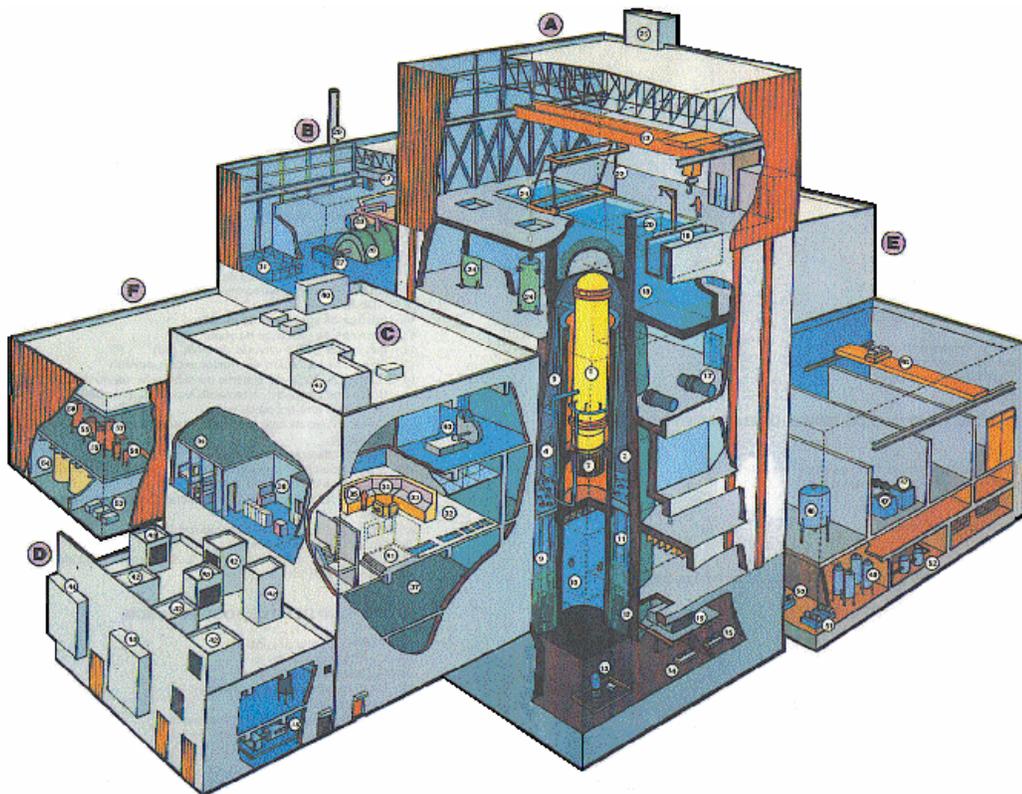


Figura 2.2 Edificio del reactor (Unidad 1)⁴².

⁴² Fuente: Publicaciones de CFE, *Central Nucleoeléctrica Laguna Verde*, México, 1999.

La unidad dos tiene sus propios edificios: del reactor, del turbogenerador, de control de purificación de agua del reactor y de generadores diesel. Comparte con la unidad uno el edificio de tratamiento de residuos radiactivos, el de la planta de tratamiento de agua y el del taller mecánico.

Hay edificios secundarios, comunes a ambas unidades como son:

- Toma de agua de enfriamiento para el condensador y los componentes nucleares
- La subestación eléctrica
- El edificio administrativo
- El edificio de almacenamiento de partes de repuesto
- El edificio de acceso
- El edificio de almacenamiento temporal de residuos de mediano y bajo nivel de radioactividad
- El edificio de entrenamiento y del centro de información pública
- Edificio del SIIP

Ciclo termodinámico

En los reactores de Laguna Verde el fluido refrigerante es agua desmineralizada que pasa por el núcleo del reactor a alta presión, y hierve al extraer el calor que se produce por la fisión nuclear en el combustible. El vapor húmedo que tiene una calidad del 14%, se separa del agua, se seca dentro de la misma vasija del reactor hasta alcanzar una calidad de 99.7% y se envía directamente para mover la turbina, cuya rotación se transmite al generador.

Al salir de la turbina, el vapor de baja presión pasa a la caja del condensador, que opera al vacío, donde se enfría con agua de mar y se convierte nuevamente en líquido. El caudal de 30 [m³/s] de agua de mar, que fluye en circuito abierto por los tubos del condensador a presión atmosférica, no entra en contacto con el vapor ni con el líquido condensado. Antes de precalentar y bombear a la vasija del reactor el líquido condensado, para cerrar así el ciclo termodinámico, se circula por resinas de intercambio iónico donde se le quitan las impurezas. El agua que se separa del vapor dentro de la vasija regresa a la parte inferior de la misma para inducir, junto con el agua que vuelve del condensador, el flujo del refrigerante a través del núcleo del reactor.

Reactor nuclear

Los principales componentes del reactor nuclear son: el núcleo, el separador de vapor, el secador de vapor y las bombas de tobera, los cuales se encuentran contenidos dentro de la vasija del reactor. Fuera de ésta, pero formando parte del reactor, se encuentran los mecanismos impulsores de las barras de control, así como las tuberías y bombas de recirculación. Las principales conexiones a la vasija son: las tuberías que llevan el vapor a la turbina, las tuberías de recirculación, las penetraciones de los mecanismos impulsores de las barras de control y las tuberías de alimentación de agua del condensador. Hay otras conexiones que no se muestran en el diagrama como son: las tuberías de entrada de agua para aspersion del núcleo, las tuberías de inyección de agua a baja presión y de remoción de calor residual, los canales para instrumentación, la tubería del líquido de control para el apagado de emergencia y la tubería de venteo de vapor.

Núcleo del reactor

El núcleo del reactor consiste de 444 ensambles de combustible, montados en una placa de soporte, que contienen 81 toneladas de uranio (UO_2) enriquecido al 1.87% de U^{235} en promedio, así como de 109 barras cruciformes de control, que contienen Carburo de Boro encapsulado en tubos y placas de acero inoxidable⁴³. Actualmente cada 18 meses se introducen 120 ensambles al 3.7% de U^{235} en promedio para reemplazar otros tantos cuyo enriquecimiento ha disminuido debido a las fisiones del U^{235} para producir energía. Estas son las recargas de combustible que permiten al reactor seguir operando.

Sistemas de contención de los productos de fisión

La operación del reactor implica la creación de productos de fisión altamente radioactivos. Estos se deben conservar debidamente confinados, tanto en operación normal como en caso de accidente, para evitar la irradiación del personal de operación y los impactos y daños al medio ambiente y a la población en general. La forma de lograr este confinamiento consiste en utilizar en el diseño y la construcción de la planta el sistema de múltiples barreras de contención.

⁴³ Datos de la primera carga de combustible.

En cada unidad de Laguna Verde se tienen cinco barreras a saber:

- Las pastillas de combustible.
- Los tubos herméticos de Zircaloy.
- La vasija del reactor y el circuito cerrado de refrigerante de alta presión.
- El contenedor primario, que es un edificio cilíndrico cónico con paredes de concreto de 1.5 metros de espesor fuertemente reforzadas con acero, recubierto interiormente con una placa de acero de 0.95 centímetros de espesor que está soldada herméticamente; en el fondo del contenedor primario hay una alberca de supresión de presión que contiene un volumen de 3,000 [m³] de agua.
- El contenedor secundario, que es el edificio mismo del reactor y que se mantiene a menor presión que la atmosférica para que no haya fugas al exterior.

Además existe un área de exclusión de personal no autorizado, que mide 680 [m] de radio alrededor del edificio del reactor, en cuya frontera una persona sin protección no recibirá una dosis mayor de 25 [rems] a cuerpo total en 2 horas, en caso de que sucediera el accidente base del diseño de la planta.

Ensamblados de combustible y barras de control

El combustible está constituido por pequeñas pastillas cilíndricas de UO₂ sinterizado de un centímetro de diámetro por uno de altura, que están herméticamente encapsuladas en tubos de Zircaloy de cuatro metros de longitud, para formar las barras de combustible. Los ensamblados originales constan de un arreglo de 8 x 8 barras, de las cuales sólo 62 contienen uranio y las otras 2 son huecas por las cuales fluye refrigerante, están rodeados de un canal de sección cuadrada, también de Zircaloy, por donde fluye el refrigerante. Para cada grupo de 4 ensamblados hay una barra cruciforme de control, que regula la reacción en cadena y se introduce mediante los mecanismos impulsores desde la parte inferior del núcleo.

Sistemas de enfriamiento de emergencia del núcleo del reactor

En caso de una pérdida anormal de líquido en el circuito de fluido refrigerante, el enfriamiento de emergencia del núcleo se garantiza mediante la operación de 4 sistemas redundantes que son:

- Sistema de despresurización automática (ADS), que descarga el vapor de la vasija a la alberca de supresión
- Sistema de enfriamiento de alta presión (HPCS), que inicia la aspersión del núcleo del reactor mientras se despresuriza rápidamente la vasija.
- Sistema de enfriamiento de baja presión (LPCS), que entra en operación cuando ya se despresurizó la vasija
- Sistema de inyección de refrigerante a baja presión (LPCI). Este sistema es el mismo que el de remoción de calor residual (RHR), pero en caso de emergencia sirve para el suministro de refrigerante al núcleo del reactor, cuando la vasija ya se despresurizó, manteniéndolo inundado por el lapso necesario.

Las bombas que operan estos sistemas, están respaldadas por tres generadores diesel de emergencia, que entran en operación a plena carga en 13 segundos en caso de falta de suministro de energía eléctrica externa e interna.

Interconexión a la red eléctrica del sistema oriental

La interconexión de la subestación de la CNLV a la red eléctrica nacional se hace mediante dos líneas de transmisión de 230 [kV] a la subestación Veracruz II, así como tres líneas de transmisión de 400 [kV]; dos de ellas a la subestación Puebla II y la tercera a la subestación Poza Rica II.

Datos técnicos⁴⁴

1. Reactor

Número de Unidades	2 x 682.44 MWe Netos
Tipo	De agua hirviente (BWR)
Combustible	UO ₂ enriquecido
Enriquecimiento alto (primera carga)	2.19% de U ²³⁵ (en peso)
Enriquecimiento medio (primera carga)	1.76% de U ²³⁵ (en peso)
Sin enriquecimiento	0.711% de U ²³⁵ (en peso)
Número de ensambles	444
Número total de barras de combustible	27,528
Peso total de Uranio	81,285 Toneladas de Uranio
Longitud activa del combustible	381 [cm]
Diámetro exterior de la barra	1.226 [cm]
Espesor del encamisado	0.0813 [cm]
Diámetro exterior de la pastilla	1.041 [cm]
Material del encamisado	Zircaloy 2
Material del canal de combustible	Zircaloy 4
Material de las placas de sujeción	Acero inoxidable 304

⁴⁴ Publicaciones de CFE, *Central Nucleoeléctrica Laguna Verde*, México, 1999.

Barras cruciformes de control de acero inoxidable llenas de Carburo de Boro	109
Sistema en reserva de control líquido	Penta borato de Sodio
Presión de servicio	71.79 [kg/cm ²]
Potencia térmica del reactor (original)	1931 MWt
Pérdidas en los sistemas	3.8 MWt
Potencia térmica al ciclo de la turbina	1933 MWt
Flujo de vapor	3774 [Ton/h]
Presión del vapor a la salida	68.2 [kg/cm ²]
Humedad del vapor	0.3%
Entalpía	669.75 [cal/gr]
Bombas de recirculación	2
Potencia de cada bomba de recirculación	4,500 [HP]
Flujo de recirculación	9,600 [Ton/h]
Bombas de chorro de recirculación interior	20
Flujo de recirculación interior	27,950 [Ton/h]
Vasija	Acero al carbón revestido interiormente de acero austenítico ⁴⁵

2. Turbina

Tipo	De flujo cuádruple impulso-reacción
De alta presión	1 Turbina
Presión a la entrada	68.2 [kg/cm ²]
Presión a la salida	13.7 [kg/cm ²]
Presión en el primer paso	52.8 [kg/cm ²]
Frecuencia de rotación	1,800 [rpm]
Temperatura del vapor a la entrada	283 [°C]
Número de extracciones	4
De baja presión	2 Turbinas
Presión a la entrada	13.3 [kg/cm ²]
Presión a la salida	710 [mmHg]
Temperatura del vapor a la entrada	267 [°C]
Número de extracciones	10

3. Generador

Tipo	Cerrado con polos no salientes
Capacidad máxima	675 MWe
Frecuencia	60 [Hz]
Voltaje	22 [kV]
Frecuencia de rotación	1,800 [rpm]
Corriente	19,703 [A]
Factor de potencia	0.9

⁴⁵ Adj. Que contiene Austerita; Austerita: Metal. Carburo de hierro presente en los aceros templados; es una solución sólida de hierro y carbono. Solamente es estable a temperaturas muy elevadas, pero mediante un templado muy enérgico, se logra que permanezca artificialmente en equilibrio en ciertos aceros especiales, llamados por dicha razón aceros austeníticos. Estos aceros se caracterizan por su extrema dureza y su grado elevado de resiliencia. Resiliencia: Número que caracteriza la fragilidad de un cuerpo, o sea su resistencia a los choques.

4. Excitador

Tipo	Directamente acoplado sin escobillas
Capacidad	3,000 [kW]
Voltaje	525 [V]
Corriente	5,715 [A]

5. Condensador

Tipo	De superficie de dos cuerpos con dos cajas en la entrada y dos en la salida
Capacidad	1.072×10^6 [kcal/h]
Número de tubos	40,784
Superficie efectiva total	47,117 [m ²]
Caudal de agua de mar para enfriamiento	28.2 [m ³ /s]

6. Bombas de condensado

Tipo	Centrífugas verticales con difusor
Número de bombas	3
Capacidad de diseño	352.5 [l/s]
Carga total	120 [m]
Frecuencia de rotación	1,170 [rpm]
Temperatura de diseño en la succión	60 [°C]

7. Bombas de refuerzo de condensado

Tipo	Centrífugas horizontales
Número de bombas	3
Capacidad de diseño	353.5 [l/s]
Carga total	311 [m]
Frecuencia de rotación	3,570 [rpm]
Temperatura de diseño en la succión	40 [°C]

8. Bombas de alimentación al reactor

Tipo	Turbo bombas centrífugas horizontales
Capacidad de diseño	685 [l/s]
Carga total	598.3 [m]
Frecuencia de rotación	Variable (5,200 [rpm] nominal)
Temperatura de diseño en la succión	188.9 [°C]

9. Calentadores de agua de alimentación al reactor

Tipo	De dos trenes en paralelo
Número de calentadores de baja presión	10
Presión de diseño	56 [kg/cm ²]
Número de calentadores de alta presión	2
Presión de diseño	161.7 [kg/cm ²]

2.4 Reactores Avanzados⁴⁶

Las crecientes preocupaciones respecto de los efectos ambientales del quemado de combustibles fósiles, han conducido a un renovado interés por la tecnología nuclear a escala internacional. Los programas nacionales de desarrollo se han complementado con actividades internacionales en la esfera del desarrollo de los reactores avanzados, particularmente de aquellos con características innovadoras.

En los últimos tres decenios, se han acumulado 11,000 años-reactor de experiencia operacional con los sistemas nucleares económicos y fiables actualmente existentes. Sobre la base de estos logros y de las enseñanzas extraídas de la experiencia de las centrales en operación, se han desarrollado, o se están desarrollando, nuevas generaciones de centrales nucleares; por lo tanto, se prevé que los nuevos diseños avanzados serán aún más seguros, económicos y fiables que sus predecesores.

Los diseños avanzados incorporan generalmente mejoras de los conceptos relacionados con la seguridad, incluidas, entre otras cosas, características que permitirán a los operadores disponer de más tiempo para tomar medidas de seguridad, y que proporcionarán una protección aun mayor contra cualquier liberación posible de radioactividad al medio ambiente. Los diseños mejorados también pueden incluir la introducción de características de seguridad pasiva basadas en fuerzas naturales tales como la convección y la gravedad, lo que permite reducir la dependencia de las funciones de seguridad de los sistemas y componentes activos, tales como las bombas y válvulas.

Se presta gran atención a la simplificación de las actividades de operación, inspección, mantenimiento y reparación de las nuevas centrales, a fin de aumentar su eficacia general desde el punto de vista de los costos. En caso de perturbaciones y accidentes, los sistemas de control, vigilancia y protección ampliamente digitalizados pondrán automáticamente a la central a funcionar de nuevo en condiciones normales o en un estado de cierre seguro, sin la intervención del operador. Los objetivos de diseño característicos permiten a los operadores disponer de por lo

⁴⁶ OIEA: <http://www.oiea.org>

menos 30 minutos para tomar medidas de seguridad y contar así con el tiempo necesario para evaluar la situación minuciosamente antes de intervenir. La mayor inercia térmica en el sistema del reactor y las menores densidades de potencia en el núcleo son dos factores de ese tipo relacionados con el diseño.

En lo que respecta a los dispositivos de seguridad pasiva, sus funciones también serán normalmente independientes del suministro de corriente eléctrica aprovechando mecanismos termohidráulicos tales como las diferencias de densidad debidas a diferentes temperaturas, y tanques de agua elevados, a fin de por ejemplo, permitir el flujo del refrigerante al sistema del reactor por gravedad para alcanzar los niveles máximos de refrigerante. La labor de desarrollo de un nuevo diseño de reactor es costosa y difícil, y requiere una gran cantidad de recursos. Este problema se ha resuelto frecuentemente mediante la cooperación a escala nacional o internacional, y se han demostrado las ventajas de mancomunar los recursos en proyectos de desarrollo.

Diseños avanzados

Una forma de atender a las necesidades energéticas futuras es aumentar gradualmente el despliegue de la energía nuclear, introduciendo diseños avanzados en los sistemas de suministro de energía del mundo entero. En este contexto, cabe señalar que el reactor ABWR no es un diseño avanzado sino uno evolutivo, es decir, es un descendiente del diseño de una central existente (BWR) que presenta las mejoras y modificaciones del diseño efectuadas en base al aprovechamiento de la experiencia e incluye nuevos adelantos tecnológicos.

Reactores refrigerados por agua

Los reactores refrigerados por agua se caracterizan por utilizar agua como moderador y refrigerante; los reactores de agua ligera (LWR) utilizan agua ligera normal (H_2O) y los reactores de agua pesada (HWR) utilizan agua pesada (D_2O), al menos como moderador. En el agua pesada, los átomos de hidrógeno (H_2) han sido reemplazados por deuterio (D_2), un isótopo pesado del hidrógeno. Actualmente, se encuentran en funcionamiento en todo el mundo unas 330 centrales LWR, lo que representa un 75% de todas las centrales nucleares en explotación. Este

tipo de reactor se ha venido explotando desde hace más de 35 años. El continuo perfeccionamiento y mejoramiento evolutivo de los diseños de centrales LWR han constituido la base para el desarrollo de diseños de LWR avanzados (ALWR), tanto del tipo BWR como del tipo PWR.

A continuación se mencionan ejemplos de diseños de LWR avanzados.

Unidades de gran tamaño:

- ABWR construido por General Electric Co (GE), EU, junto con Hitachi & Toshiba, Japón.
- APWR construido por Westinghouse (W), EU, junto con Mitsubishi, Japón
- EPR construido por Nuclear Power International (NPI), una empresa conjunta de Framatome, Francia, y Siemens, Alemania.
- WWER-1000 (W-392) construido por Atomenergoproject y Gidro press, Rusia.

Unidades de mediano tamaño:

- AP-600 PWR con mayores características de seguridad pasiva construido por Westinghouse, EU.
- AC-600 PWR con mayores características de seguridad pasiva construido por China National Nuclear Corporation.
- MS-600 PWR con un sistema de seguridad "híbrido" construido por Mitsubishi, Japón.
- SBWR BWR con mayores características de seguridad pasiva construido por Mitsubishi, Japón.
- WWER-500/600 (W-407) PWR con características pasivas construido por Ansaldo, Italia.
- ISIS innovador, PWR tipo de desarrollo construido por Ansaldo, Italia.
- SPWR innovador, PWR tipo de desarrollo construido por JAERI e IHI, Japón.
- WPBER-600 innovador, PWR tipo de desarrollo construido por OKMB, Rusia.

Actualmente, se desarrollan reactores grandes y medianos; los primeros representarían en gran medida, ampliaciones de los diseños existentes, mientras que en los más pequeños se emplearían mayormente dispositivos de seguridad pasiva con miras a la simplificación de las centrales y la realización de economías, a fin de lograr que no obstante, su menor tamaño sean competitivas desde el punto de vista del costo.

Los diseños avanzados de reactores nucleares aprovechan la amplia experiencia operacional adquirida de los sistemas actuales y los resultados de las actividades de investigación y desarrollo a escala mundial, con el fin de proporcionar centrales nucleares muy seguras, fiables y económicas que sean también favorables al medio ambiente. La mejora de los sistemas de reactores y la creciente consciencia y preocupación en lo que respecta al calentamiento global y la contaminación ambiental, han llevado a examinar más de cerca la opción nuclear para la futura producción de electricidad. El empleo eficaz de la energía nucleoelectrica en los años venideros no depende solamente de la excelencia técnica, un requisito previo indispensable, sino de la comprensión y aceptación tanto por el público como por las autoridades nacionales.

2.5 Tecnología ABWR.

El reactor avanzado de agua hirviente ABWR por sus siglas en inglés es el resultado de muchos años de investigación y experiencia en el diseño y construcción de reactores BWR por parte de un grupo de trabajo formado por General Electric Co. (EU), Hitachi LTD y Toshiba Power Co (JPN). El ABWR es el primero de la siguiente generación de reactores nucleares avanzados de agua ligera (ALWR) en ser contemplado en la construcción de las nuevas centrales nucleoelectricas. En la década pasada, el grupo mencionado construyó en la central nucleoelectrica Kashiwazaki-Kariwa de Japón, propiedad de Tokyo Electric Power Company (TEPCO), las unidades 6 y 7 con tecnología ABWR y con una capacidad de 1356 [MWe] en cada reactor. La unidad 6 entró en operación el 7 de noviembre de 1996 y fue el primer reactor ABWR en entrar en operación comercial en el mundo, mientras que la unidad 7 entró en operación comercial el 2 de julio de 1997. Cabe mencionar que en enero de 2005 entró en operación un tercer reactor ABWR en Japón.

La tecnología ABWR presenta una serie de nuevas características técnicas con respecto a su antecesor el BWR que se explican a continuación.

Datos técnicos del reactor ABWR⁴⁷

Tipo	Reactor avanzado de agua hirviente
Potencia eléctrica neta	1356 [MWe]
Potencia térmica bruta	3926 [MWt]
Núcleo del reactor	
Altura	3.71 [m]
Diámetro	5.16 [m]
Número de elementos de combustible	872
Estimación de potencia promedio	196 [W/m]
Densidad de potencia promedio	50.6 [W/lt]
Combustible	
Material de combustible	UO ₂ , UO ₂ -Gd ₂ O ₃
Enriquecimiento promedio por recarga	3.2%
Número de varillas por arreglo de ensamble	62
Diámetro de la barra de combustible	12.3 [mm]
Material del encamisado	Zircaloy 2
Espesor del encamisado	0.86 [mm]
Descarga de combustible consumido	32,000 [MWd/t]
Sistema de control	
Número de barras de control	205
Forma de las barras de control	Cruciforme
Absorbedor de neutrones	B ₄ C
Mecanismo de las barras de control	Movimiento eléctrico fino, Scram hidráulico, GD ₂ O ₃
Sistema de enfriamiento primario	
Tipo	Recirculación interna, sistema de bombeo
Presión de operación	73.1 [kg/cm ²]
Temperatura de admisión del agua de alimentación	215.5 [°C]
Temperatura del vapor de salida	287.4 [°C]
Número de bombas de recirculación	10
Masa del flujo de recirculación	52,200 [T/h]
Vasija de presión del reactor	
Altura interna	21 [m]
Diámetro interno	7.1 [m]
Espesor mínimo de la pared	174 [mm]
Materiales	Revestimiento de acero inoxidable
Contención	
Tipo	Concreto reforzado
Vasija de contención	Laminada con acero
Presión de diseño	3.16 [kg/cm ²]
Altura	36.1 [m]
Diámetro interno máximo	29 [m]

⁴⁷ Fuente: <http://www.nuc.berkeley.edu/designs/abwr/abwr.html> y <http://www.toshiba.co.jp/product/abwr/english/products/reactor/abwr01.htm>

Turbina

Número

Valor máximo a 722 [mmHg]

Velocidad

Presión de admisión

Temperatura de admisión

1

1381 [MWe]

1500 [rpm]

69.2 [kg/cm²]

283.7 [°C]

A continuación se muestra la figura 2.3 con el esquema de un reactor ABWR.

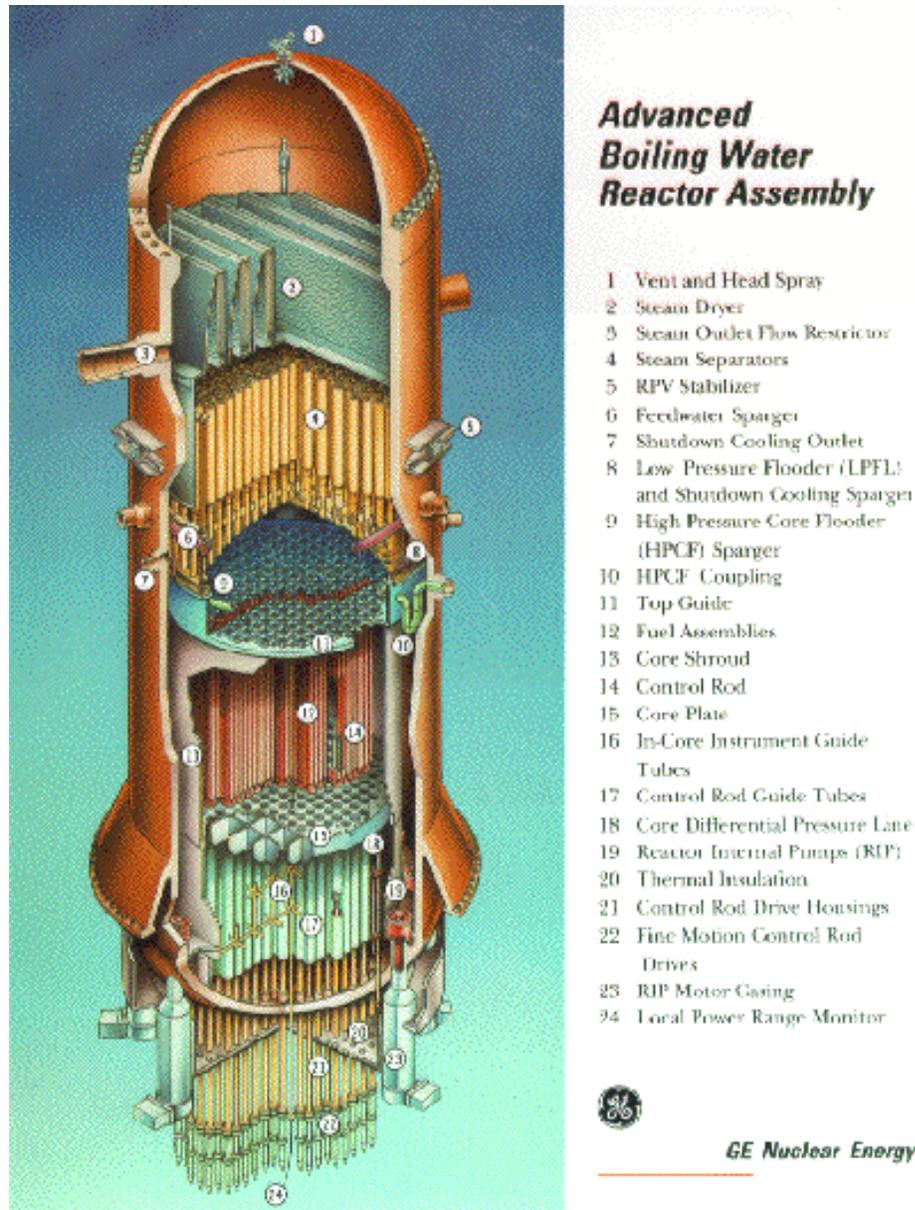


Figura 2.3 Reactor ABWR⁴⁸.

⁴⁸ Fuente: <http://www.nuc.berkeley.edu/designs/abwr/abwr.html>

Vasija de presión del reactor y sus componentes

En un ABWR, el agua refrigerante es reciclada dentro de la vasija de presión del reactor (RPV) por bombas internas instaladas dentro de la vasija misma. El RPV contiene los ensambles de combustible, las barras de control y los componentes del reactor. Está hecho de acero de aleación baja y su superficie interior está revestida con materiales resistentes a la corrosión. Los elementos internos incluyen el separador de vapor, el secador y las estructuras de apoyo principales.

La vasija de presión de un reactor ABWR tiene 21 metros de altura por 7.1 metros de diámetro y está diseñada para una vida útil de 60 años. La mayor parte de la vasija, incluyendo los 4 anillos que van del cinturón principal a la cabeza inferior, están hechos en una sola pieza forjada. La vasija no tiene ningún inyector mayor de 2 pulgadas de diámetro en la parte baja de la cima del núcleo, porque los lazos de recirculación externos han sido eliminados. Gracias a estas dos nuevas características, más del 50 % de las soldaduras y todas las tuberías y apoyos en el sistema primario han sido eliminados y con ello, la fuente más grande de exposición ocupacional en el BWR.

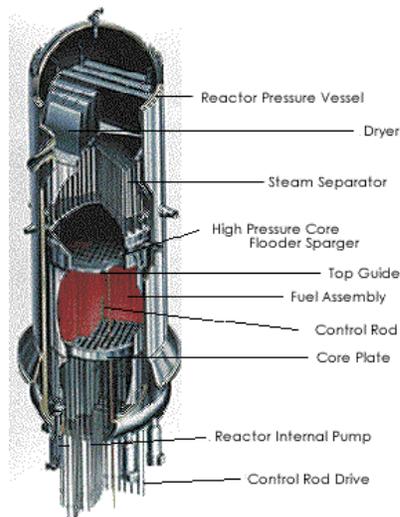


Figura 2.4 Vasija de presión del reactor⁴⁹.

⁴⁹ Fuente : Ídem.

Núcleo del reactor y combustible nuclear

El núcleo del reactor comprende los ensambles de combustible y las barras de control. Cada barra en los ensambles de combustible contiene pastillas de uranio de bajo enriquecimiento dentro de un revestimiento de circonio. El reactor incluye junto a los ensambles de combustible arreglos de barras de control soportadas por sujetadores superiores e inferiores y por espaciadores.

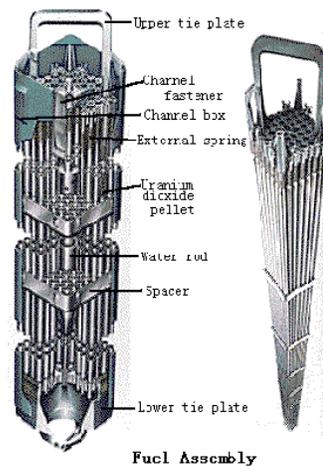


Figura 2.5 Ensamble de combustible⁵⁰.

Materiales

Utilizando sus 30 años de experiencia en el funcionamiento de reactores BWR, General Electric ha tenido especial cuidado en seleccionar el material adecuado. El cobalto ha sido eliminado del diseño. El acero usado en el sistema primario está hecho de material de grado nuclear (aleaciones bajas en carbón) que es resistente a fracturas ocasionadas por tensiones de corrosión intergranular.

Barras de control y sistema impulsor de barras de control

El material en las barras de control absorbe neutrones, refrena y controla la reacción en cadena de fisión nuclear del reactor. Las barras tienen un corte transversal cruciforme y son

⁵⁰ Fuente : Ídem.

insertadas hacia arriba, en la base del RPV, en los espacios para barras de control en el ensamble de combustible. En el ABWR, la posición de cada barra es regulada por su sistema impulsor de barras de control de movimiento fino, que es actuado por un sistema impulsor inversor durante la operación normal. También se aplica un sistema de *scram* (apagado súbito del reactor) hidráulico.

Los impulsores de Barras de Control de Movimientos Finos, (FMCRD) por sus siglas en inglés, están siendo utilizados en el ABWR. Día a día esta operación es realizada por un motor eléctrico de pasos que mueve el impulsor en incrementos de 0.75" (comparado al impulsor de pistón de cierre que tenía incrementos de 3" en el BWR, de ahí el nombre de "movimiento fino").

Las barras de control son impulsadas hidráulicamente pero pueden ser impulsadas también por un motor eléctrico como una reserva. El FMCRD es tan confiable que no es necesario inspeccionarlo durante la vida de la planta. Por lo tanto, sólo es necesario remover 3 impulsores para su inspección durante una salida de operación, lo cual implica grandes ahorros de tiempo. Típicamente 30 impulsores de pistón de cierre son revisados en cada interrupción de operación. Adicionalmente, el FMCRD tiene una purga continua con agua limpia para mantener la radiación a niveles bajos.

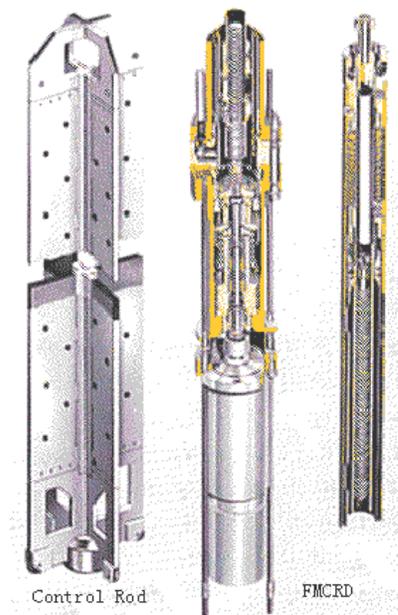


Figura 2.6 Barras de control y sistema impulsor FMCRD⁵¹.

⁵¹ Fuente: Ídem.

Sistemas de control digital y de instrumentación

Los sistemas de control y de instrumentación combinan el estado del arte digital y la tecnología de fibras ópticas. El ABWR tiene cuatro divisiones separadas de lógica de sistemas de seguridad y control, incluyendo cuatro redes de multiplexión separadas y redundantes para proporcionar el aseguramiento absoluto de la planta. Cada sistema incluye microprocesadores para tratar la información entrante proveniente de sensores y generar señales de control de salida, unidades de multiplexión locales y remotas para la transmisión de información y una red de cables de fibra óptica. Los controladores son tolerantes a defectos y continuamente generan señales para simular datos de entrada y comparar la respuesta contra el resultado esperado. Los controladores para los sensores y el equipo están localizados sobre las tarjetas que se encuentran distribuidas remotamente. En el caso de que un problema sea descubierto por el controlador, una señal es enviada a la sala de control. Dentro de unos minutos, el elemento que funciona mal puede ser substituido por una pieza de recambio.

Multiplexión y fibra óptica

La multiplexión y la fibra óptica han reducido dramáticamente la cantidad de cables en la planta. Esto tiene otra ventaja; acorta la ruta de cableado en la instalación, reduciendo un mes de tiempo en la construcción de la planta.

Diseño de sala de control

La planta entera puede ser controlada desde una consola. Los paneles en la sala controlan los sistemas de seguridad de la Isla Nuclear y el balance de la planta. El CRT permite al operador llamar cualquier sistema, subsistema y/o componente solamente con tocar una pantalla. Es posible manejar un sistema entero mediante una orden del sistema maestro.

A continuación se muestra la figura 2.7 con la sala de control de un reactor ABWR.

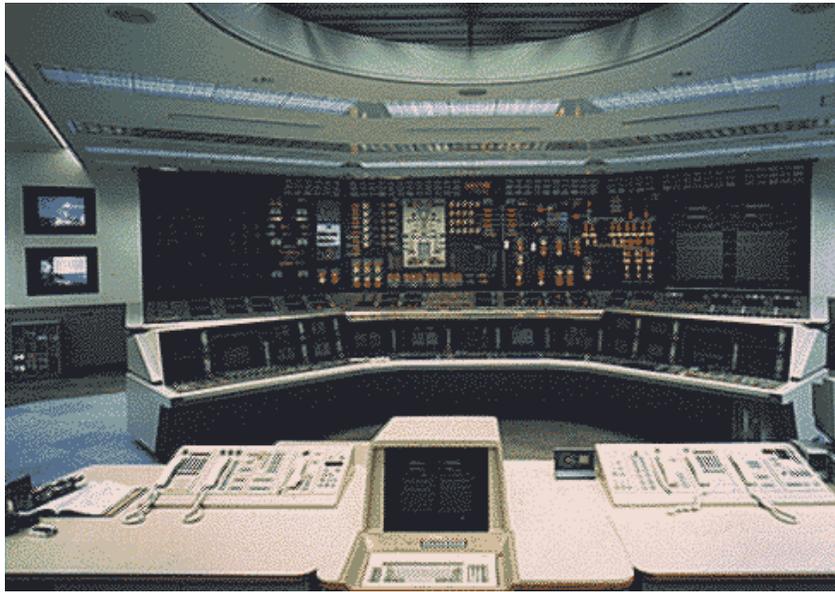


Figura 2.7 Sala de control de un ABWR⁵².

Disposición de planta

El ABWR es diseñado con base a condiciones que cubren casi todos los sitios disponibles nucleares en el mundo, incluyendo los sitios con alto potencial sísmico. Presenta el reactor y el edificio de turbina "en línea" y ninguna de las instalaciones principales es compartida con otras unidades. La contención es una vasija de concreto armado, (RCCV) por sus siglas en inglés, con un escape de acero, rodeada por el edificio del reactor que actúa como una contención secundaria. Una presión negativa se mantiene dentro del edificio del reactor para dirigir cualquier liberación radioactiva, de la contención, a un sistema de tratamiento de gas. El edificio del reactor y la contención están integrados para mejorar la respuesta sísmica del edificio sin incrementar la carga sobre la capacidad de las paredes.

La construcción de la planta aprovecha grandes módulos que son prefabricados y montados en el sitio. Grúas de 1000 toneladas levantarán estos módulos y los colocarán verticalmente en la planta. El empleo de RCCV en la construcción modular y otras técnicas reduce el tiempo de construcción de 66 a 50 meses.

⁵² Fuente: Ídem.

Se brindó atención particular al diseño de la planta para facilitar el mantenimiento. Se consideraron monorraíles para poder desplazar el equipo a un cuarto de servicio convenientemente localizado a través de una escotilla. En el diseño, las bombas internas del reactor fueron retiradas y el FMCRD para mantenimiento ha sido automatizado. El manejo de dispositivos, como en el caso del FMCRD, se realiza remotamente desde fuera de la contención. En caso de mantenimiento, la bomba o el impulsor son puestos sobre un dispositivo de transporte y llevados a través de la escotilla hacia cuartos de servicio dedicados, uno para el RIP y otro para los FMCRDS, donde el equipo puede ser descontaminado y revisado en un ambiente protegido. La operación entera es realizada de manera rápida, eficiente y con prácticamente ninguna irradiación al personal.

Sistema de recirculación externa

Una de las características únicas del ABWR es la eliminación del sistema de recirculación externa. Las bombas de recirculación externas y la tubería han sido substituidas por diez bombas de recirculación internas montadas en la cabeza inferior de la vasija. Estas bombas internas del reactor, RIP por sus siglas en inglés, son las versiones mejoradas de aquellas usadas en Europa para la cual hay más de 1000 años-bomba de experiencia de operación. La fiabilidad y la durabilidad de estas bombas han resultado ser tan buenas que sólo dos deben ser retiradas durante la interrupción para mantenimiento. Los motores de las RIP, continuamente son purgados con agua limpia para mantenerlos libres de radiaciones provenientes de la vasija, de modo que reduzcan los niveles de radiación alrededor de las bombas.

Sistemas simplificados activos de seguridad

Otra característica única del ABWR es su sistema simplificado activo de seguridad. El ABWR tiene cuatro divisiones completamente independientes y redundantes de sistemas de seguridad que están mecánicamente separadas y no tienen conexiones comunes como en el BWR. Están aisladas electrónicamente de modo que cada división tiene acceso a las fuentes redundantes de alimentación y para añadir seguridad, tienen su propio generador diesel de emergencia. Las divisiones están físicamente separadas, cada una está localizada en un cuadrante diferente del edificio del reactor, separadas por paredes resistentes al fuego. Un incendio, una inundación o la

pérdida de poder que incapacitarían una división no tienen ningún efecto sobre la capacidad de los otros sistemas de seguridad.

Finalmente, cada división contiene tanto sistemas de alta como de baja presión y cada una tiene su propio intercambiador de calor dedicado a controlar la refrigeración del núcleo y retirar el calor de decaimiento. Uno de los sistemas de alta presión es el enfriador de aislamiento del núcleo del reactor, RCIC por sus siglas en inglés, que es impulsado por el vapor del reactor y provee la protección necesaria en caso de un apagón en la subestación.

Los sistemas de seguridad tienen la capacidad de mantener el núcleo del reactor protegido en cualquier momento. A causa de esta capacidad y los márgenes térmicos generosos incorporados en los diseños de combustible, la frecuencia de operación de los impulsores y por tanto el número de salidas de operación de la planta se ha reducido enormemente (a menos de una vez por año). En caso de un accidente de pérdida del refrigerante, la respuesta de la planta ha sido totalmente automatizada y no requiere la acción de un operador durante 72 horas, la misma capacidad que para las plantas pasivas.

Seguridad y fiabilidad

Uno de los más grandes contribuyentes a la frecuencia de daño en el núcleo (CDF) de un BWR común, es un apagón de la subestación. Para evitar esta situación en el ABWR, se tiene un sistema de seguridad de vapor a alta presión. Es decir, no se confía en la alimentación y se proporcionan diversas protecciones contra las fallas comunes. Para añadir protección, el ABWR tiene una turbina de combustión local, dedicada a proporcionar una fuente de poder de emergencia para cualquiera de las divisiones de sistemas de seguridad.

Como el ABWR tiene mayores márgenes de diseño, la frecuencia de interrupciones de operación del reactor o la iniciación de un sistema de seguridad se han reducido enormemente. Prácticamente ningún acontecimiento puede modificar directamente la CDF del ABWR. Además, el impacto de tales fallas o accidentes, se ha mitigado gracias a que en ningún momento el núcleo queda desprotegido de cualquier accidente de base de diseño; porque hay un tercer sistema de alta presión (comparado con los dos del BWR anterior) para proporcionar las diversas protecciones y

porque cada sistema de seguridad está dedicado a la capacidad de retiro de calor del núcleo y de asegurar la recuperación del accidente.

El ABWR viene equipado con características para mitigar pasivamente las consecuencias de un accidente severo. Una de éstas es un sistema que automáticamente desborda el área de contención debajo de la vasija del reactor al suelo. El calor por radiación de los restos principales derrite una válvula fusible que libera el agua de la alberca de supresión del ABWR apagándolos y limita la cantidad de los gases no condensables que son generados durante el accidente. El ABWR también incluye un sistema para prevenir una falla catastrófica en la contención. Cuando las presiones de contención están cerca de los límites de diseño, un disco de ruptura localizado en una ventilación se abre, esto crea un camino por encima de la alberca de supresión para que el vapor y el calor sean liberados hacia la atmósfera, hasta que un operador cierre en forma manual la válvula de ventilación mientras que la mayor parte de productos de fisión son retenidos o conservados en la alberca de supresión.

Duración de las salidas de operación por recarga de combustible

El ciclo de operación de un reactor de tipo ABWR es de 18 meses con capacidad de extensión de hasta 24 meses, mientras que la duración de la recarga de combustible para cada ciclo es de tan solo 43 días. Esta duración de salida de operación está calculada para mantenimiento normal, no así para trabajos mayores en la turbina o el generador. Una serie de características de diseño que aceleran los trabajos de recarga de combustible y acortan el tiempo de salida de operación por este concepto son: el movimiento automático de la plataforma de combustible, que aminora las maniobras y estrategias de recarga en el núcleo del reactor, menos retiros de sistemas de impulsión de barras de control, la automatización del FMCRD, del RIP y de los tiempos de arranque, todo lo cual mejora el factor de disponibilidad.

Factor de disponibilidad

La tecnología ABWR tiene una serie de características de diseño que reducen el número y la duración de las salidas de operación forzadas, tiene mayor protección de salidas y del factor de planta. Dos de las mayores contribuciones para mejorar el factor de disponibilidad son: el uso de

materiales avanzados y sistemas de recirculación mejor diseñados. Un ABWR tiene una disponibilidad de alrededor de 87%. A continuación se muestran las imágenes de la construcción de un reactor ABWR en Japón y una tabla con las características prominentes de la tecnología.

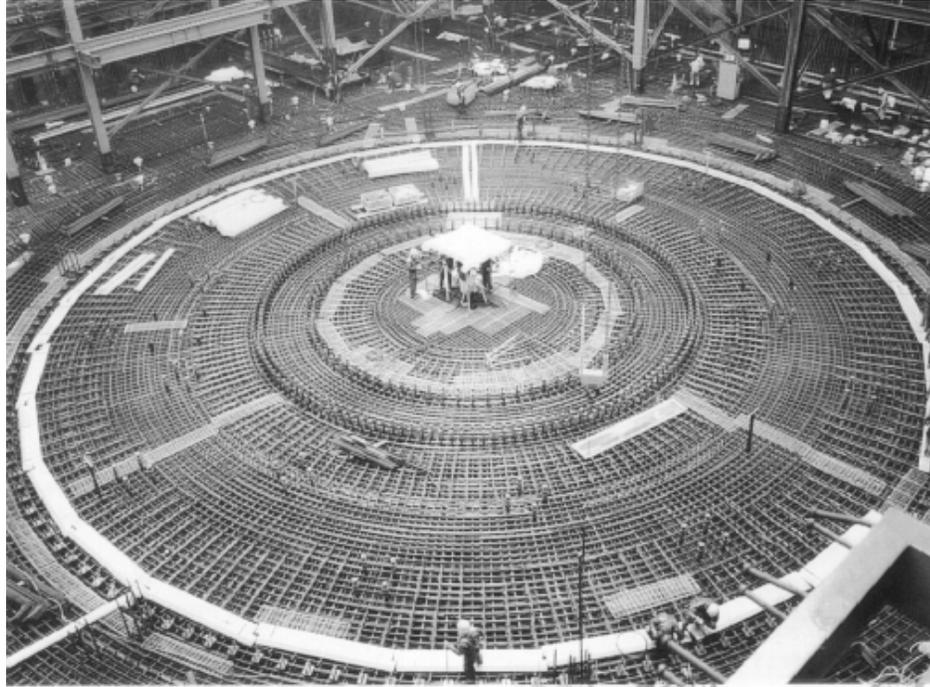


Figura 2.8 Imagen de la construcción de un ABWR en Japón (a)⁵³.

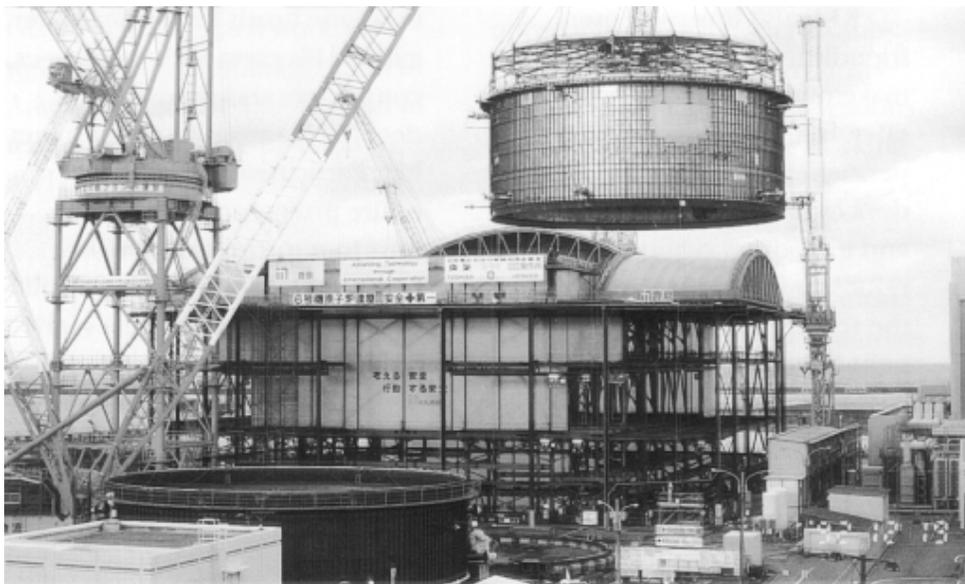


Figura 2.9 Imagen de la construcción de un ABWR en Japón (b).

⁵³ Fuente: <http://www.toshiba.co.jp/product/abwr/english/products/reactor/abwr01.htm> (a) y (b).

Características principales del ABWR	
Fácil de operar Ambiente amigable Sistema de control y monitoreo centralizado Operación mayormente automatizada	Alto desempeño de operación Control de potencia estable sobre un amplio rango asegurado por flujo de recirculación Operación diaria de seguimiento de carga
Mejoramiento de la calidad el agua Material bajo en cobalto	Alta confiabilidad Componentes de la planta probados en la práctica Transmisión óptica multiplexada Control digital integrado
Eficiencia superior Sistema de configuración simplificada con ciclo directo Período de construcción más corto Alta eficiencia de planta	Seguridad inherente Retroalimentación negativa Retroalimentación doppler Uso de tecnología probada

Tabla 2.1 Características principales del ABWR⁵⁴.

⁵⁴ <http://www.toshiba.co.jp/product/abwr/english/products/reactor/abwr01.htm>

3 Propuesta.

3.1 Introducción.

En nuestro país, cada vez es más urgente la realización de reformas en materia energética y la reestructuración de la planta productiva en lo que respecta a la generación de energía eléctrica con la finalidad de responder a las exigencias actuales y futuras de consumo, competitividad y eficiencia. En este contexto es de suma importancia el aprovechamiento al máximo de los recursos económicos, naturales y humanos disponibles, por lo que las nuevas tecnologías de generación eléctrica deben ser, no sólo técnica y económicamente competitivas, sino sustentables y que cuenten con un consenso social.

De acuerdo al programa de expansión del sector eléctrico mexicano⁵⁵, en los próximos diez años se requerirá aumentar la capacidad de generación en aproximadamente 25,000 [MWe], de los cuales 7,300 se consideran capacidad en construcción o comprometida, mientras que 17,700 se obtendrán de proyectos de capacidad adicional no comprometida. De esta última cifra, 8,265 [MWe] corresponden a tecnología libre aun no definida y en particular corresponden 1,070 al Estado de Veracruz.

Por otra parte, la operación de los dos reactores de la CNLV ha representado un éxito en cuanto a la asimilación tecnológica por parte de los ingenieros mexicanos. Además de que la

⁵⁵ “Prospectiva del Sector Eléctrico 2004-2013”. Secretaría de Energía, Dirección General de Planeación Energética. México 2004.

central cumple con los estándares de calidad y seguridad exigidos tanto por el Organismo Internacional de Energía Atómica como por la Asociación Mundial de Operadores de Plantas Nucleares. En el año 2003 el factor de planta de la CNLV fue de 87.8% mientras que el promedio de todo el parque eléctrico nacional fue de tan solo 52.2%. Por lo que de las opciones disponibles actualmente, la tecnología nuclear resulta ser un candidato idóneo para cubrir parte de la capacidad no comprometida. La determinación de la tecnología a emplear se debe efectuar a la brevedad posible.

El propósito de este trabajo de tesis es realizar un análisis de las implicaciones técnicas, económicas, financieras y ambientales de la construcción de un nuevo reactor nuclear con tecnología ABWR en la CNLV, con la finalidad de incrementar su capacidad de generación al SEN y satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica del país, asimismo presentar una propuesta formal de inversión a la infraestructura del sector con bases en el desarrollo sustentable y la protección del medio ambiente.

Por otro lado la energía nuclear ha demostrado ser una fuente de energía limpia y segura ya que el proceso mediante el cual se genera electricidad no emite gases de efecto invernadero a la atmósfera, lo que promueve el cuidado del medio ambiente, tema que es relevante en la actualidad en el ámbito internacional con la reciente ratificación del Protocolo de Kyoto. Asimismo, ventajas adicionales de la energía nucleoelectrónica son: su bajo costo de generación eléctrica y su seguridad, además del alto factor de disponibilidad de dichas centrales.

La propuesta que es objeto de este trabajo consiste principalmente en la ubicación de un nuevo reactor nuclear con tecnología ABWR y la ubicación de una obra de toma y una de descarga dentro del predio de la CNLV, lugar que ya ha sido estudiado con anterioridad por la CFE y que cuenta con las condiciones sísmicas y geomorfológicas⁵⁶ ideales para la construcción de una unidad de este tipo. Actualmente dentro de la CNLV se encuentran dos unidades con una capacidad real de 688.44 [MWe] cada una y en conjunto de 1,365 [MWe] netos, de concretarse esta propuesta, con la construcción y puesta en operación de una nueva unidad con un reactor de

⁵⁶ Geomorfología, estudio científico de la forma del terreno y de los paisajes. El término suele aplicarse a los orígenes y a la morfología dinámica de las superficies de la Tierra, pero abarca también la morfología del fondo marino. La geomorfología es el estudio del aspecto geológico del terreno visible.

tipo ABWR con una capacidad de 1,356 [MWe], la capacidad nominal total de la CNLV sería de 2,721 [MWe], lo que representaría alrededor del 6% de la capacidad efectiva instalada y alrededor de 9% de la generación total de electricidad de la CFE incluyendo a los productores independientes de energía⁵⁷.

3.2 Implicaciones técnicas.

Como ya se ha mencionado con anterioridad, para efectos de esta propuesta, se tomará en cuenta un reactor nuclear con tecnología ABWR, en la figura 3.1 se presenta el ciclo de generación de energía eléctrica de un reactor avanzado de agua hirviente ubicado en la CNLV. Dicho reactor es fabricado por Hitachi-Toshiba en Japón y por General Electric (GE) en los EU. En la tabla 3.1 se muestran los principales parámetros técnicos de esta tecnología⁵⁸.

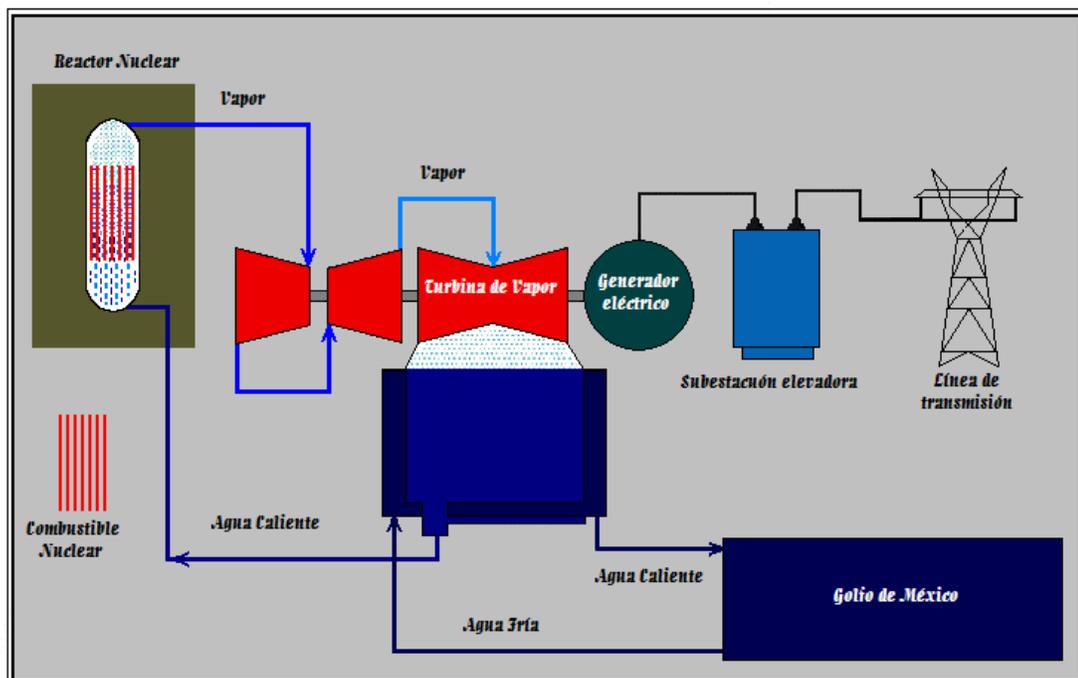


Figura 3.1 Ciclo de generación de energía eléctrica ABWR⁵⁹.

⁵⁷ Datos de CFE, tomando en cuenta un factor de planta de 85% para la tecnología ABWR.

⁵⁸ Ortega R. F., Martín del Campo C., François J. L., *Costos y Parámetros de plantas nucleoeléctricas para el COPAR de generación 2004*. Informe Técnico No. UNAM/FI/DIE/N3-04. Diciembre de 2004.

⁵⁹ Fuente: COPAR de Generación 2004, CFE.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
Potencia térmica	3926	[MWt]
Potencia eléctrica bruta	1356	[MWe]
Potencia eléctrica neta	1300	[MWe]
Eficiencia bruta	34.54	[%]
Eficiencia neta	33.11	[%]
Pérdidas por usos propios	4.13	[%]
Régimen térmico neto	10873	[MJ/MWhe]

Tabla 3.1 Parámetros técnicos ABWR⁶⁰.

Ubicación geográfica de las instalaciones

En la figura 3.2 se muestra un mapa de la CNLV con la ubicación propuesta del nuevo reactor, de la obra de toma y de la obra de descarga, así como de la ubicación de un edificio para tratamiento y contención de residuos de medio y bajo nivel para ampliar la capacidad de las instalaciones actuales.

En esta figura, los edificios en color verde son las instalaciones actuales mientras que los edificios en rojo son las instalaciones propuestas, al noreste de la central se encuentra la ubicación para el edificio del reactor, al cual se ha nombrado Unidad 3, se ubicó en esa zona debido a la disponibilidad de terreno, a que el suelo está formado por basalto y a que las curvas de nivel de la carta topográfica mostrada en la figura 3.3 indican que no hay variaciones graves en el terreno, lo que facilitaría las obras civiles durante el proceso de construcción, misma situación que ocurre en la ubicación del edificio para tratamiento y contención de residuos de medio y bajo nivel.

A continuación se muestran las figuras 3.2 y 3.3 con la ubicación de las instalaciones propuestas y la carta topográfica modificada del sitio.

⁶⁰ Ortega, Martín del Campo, François, *Costos y Parámetros de plantas nucleoelectricas para el COPAR de generación 2004*.

3. Propuesta.

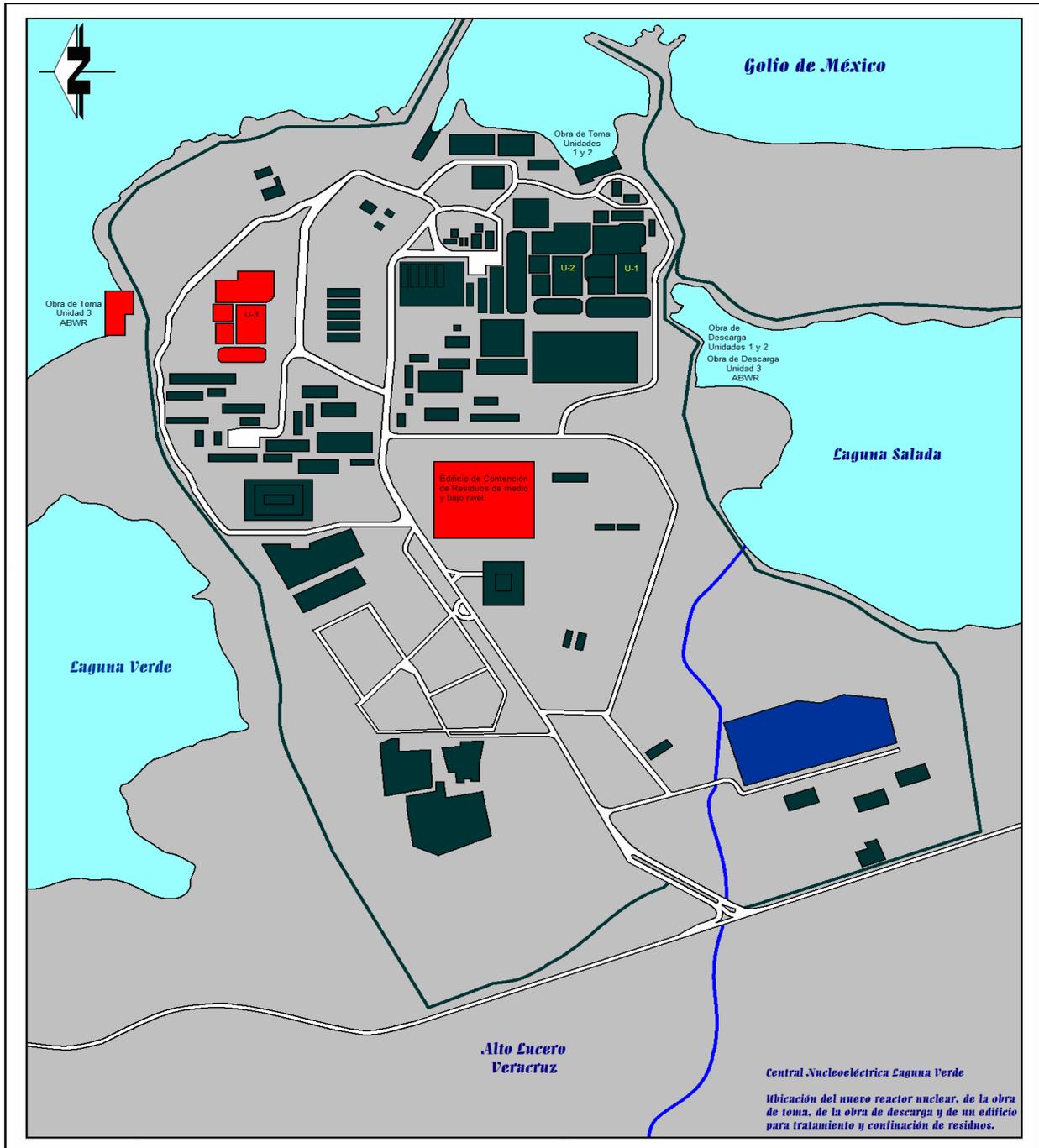


Figura 3.2 Ubicación de las instalaciones propuestas⁶¹.

⁶¹ Fuente: Modificado de acuerdo a la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil, CFE.



Figura 3.3 Carta topográfica del sitio⁶².

Al norte de la Unidad 3, se ubica la obra de toma que, al igual que la de las unidades 1 y 2, obtiene agua proveniente del Golfo de México; dado que en la actualidad resulta conveniente para la eficiencia de una nueva unidad, el construir una obra de toma sumergida, para efectos de este trabajo, se propone una tubería larga sumergida en el Golfo que toma agua del fondo, donde ésta es más fría. A pesar de que se requeriría una mayor potencia de bombeo, se compensaría con la mejora en la eficiencia de la unidad, sobre todo si se toma en cuenta que evita el problema que existe actualmente en ciertas épocas del año en las unidades 1 y 2 donde aparece una recirculación de agua caliente en la obra de toma actual.

Por otro lado, para la obra de descarga de agua proveniente del ciclo de enfriamiento y precisamente para evitar la recirculación de agua, se propone un canal de descarga que atraviesa la central y que se une con el canal de las otras dos unidades. Los detalles de estas obras se pueden observar en las figuras 3.4 y 3.5 respectivamente.

⁶² Fuente: Carta Topográfica Alto Lucero, Veracruz, INEGI (1995).

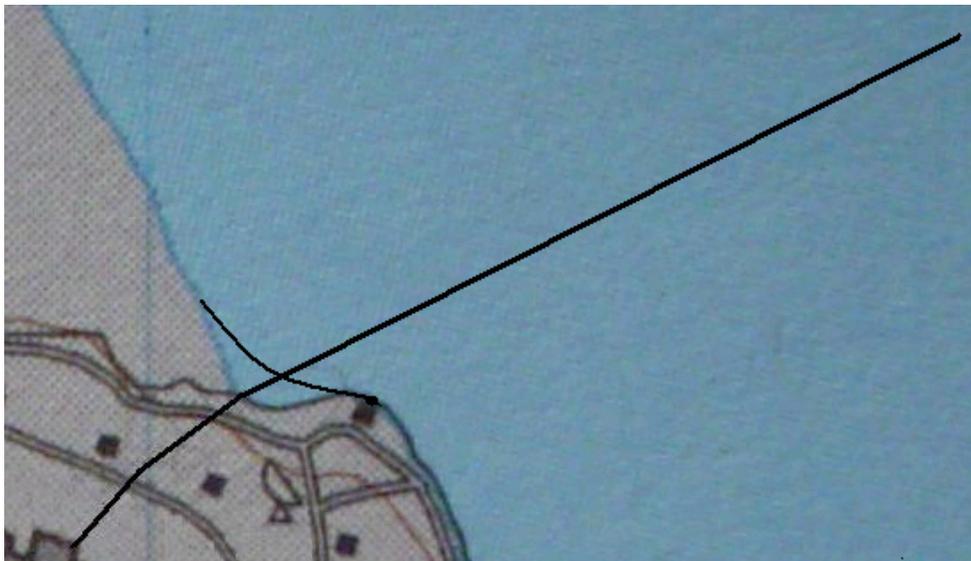


Figura 3.4 Obra de toma⁶³.

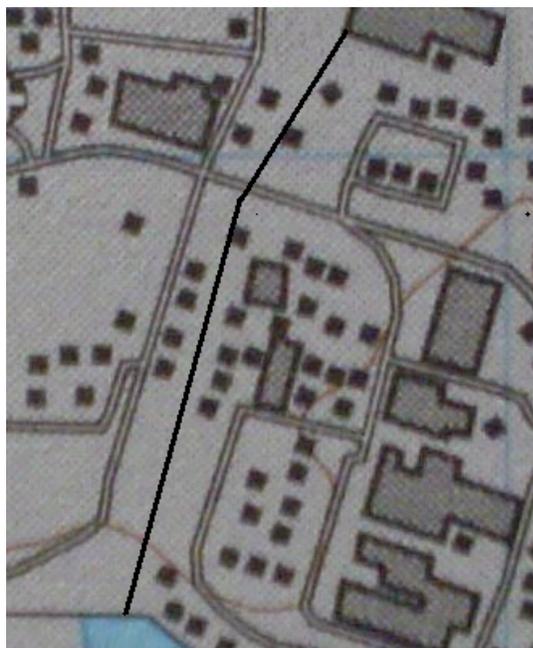


Figura 3.5 Obra de descarga⁶⁴.

Edificio de contención de residuos de medio y bajo nivel

Otra implicación técnica de esta propuesta es la proyección de los residuos radioactivos de medio y bajo nivel de la CNLV, para ello es necesario establecer la ubicación de un almacén

⁶³ Fuente: Ídem.

⁶⁴ Fuente: Ídem.

definitivo para estos desechos dentro del predio de la central con objeto de satisfacer las necesidades de almacenamiento de la planta en los 60 años de su vida útil. Para esto se requiere estimar los volúmenes producidos anualmente, los almacenados hasta la fecha y los estimados a mediano y largo plazo, así como el eventual desmantelamiento de cada reactor al término de su vida útil. Actualmente la CNLV produce un promedio de 250 [m³/año] de desechos radioactivos de medio y bajo nivel, constituidos por desechos sólidos secos, sólidos húmedos y líquidos. En los últimos 3 años, la central ha alcanzado una eficacia de reutilización de efluentes del 95%⁶⁵.

Los desechos radioactivos de la central se dividen en dos grandes grupos: los desechos sólidos húmedos que se generan durante el tratamiento de los desechos radioactivos líquidos y los desechos sólidos secos que son básicamente el resultado de operaciones de mantenimiento. El volumen acumulado por las dos unidades hasta diciembre del año 2003 es de 2,893 [m³], los cuales son colectados, procesados, acondicionados en contenedores y almacenados temporalmente en la misma central; encontrándose que del total, el 51.46% son desechos sólidos secos, el 35.83% desechos líquidos y el 12.71% desechos sólidos húmedos. Para su almacenamiento se emplean bidones de 200 [lts] ó 0.2 [m³] de capacidad para los sólidos secos y húmedos y contenedores de alta integridad (HIC) de 4 [m³] de capacidad para los líquidos.

En esta propuesta se recomienda a la CNLV iniciar un programa de concientización del personal para la reducción de desechos así como el empleo de nuevas tecnologías para la reducción del inventario de desechos radioactivos, considerando metodologías aceptadas y aprobadas a nivel mundial como el secado y la súper compactación, con el propósito de alcanzar para la Unidad 3, objeto de esta propuesta, una producción de residuos sólidos igual o inferior a 75 [m³/año-reactor], que corresponde aproximadamente a la media que establece la *World Association of Nuclear Operators (WANO)*⁶⁶.

Tomando en cuenta una producción anual de 75 [m³/año] del reactor ABWR propuesto y considerando un valor aproximado de residuos por concepto de desmantelamiento de la unidad se tiene:

⁶⁵ Paredes, L. C., Sánchez, S., *Proyección al 2035 de los desechos radioactivos de nivel bajo e intermedio en México*, CIC, Cancún, México, 2004.

⁶⁶ WANO, <http://www.wano.org.uk/>

CONCEPTO	VALOR	UNIDADES
Producción Anual	75	[m ³]
Vida del reactor	60	Años
Producción Total	4500	[m ³]
Desmantelamiento	15000	[m ³]
Total	19500	[m ³]

Tabla 3.2 Estimación de desechos radioactivos por el reactor ABWR⁶⁷.

Una implicación indispensable de esta propuesta es la construcción del edificio de confinamiento de residuos radioactivos que de acuerdo con los resultados de la tabla 3.2, debe tener una capacidad de almacenamiento de alrededor de 20,000 [m³] al final de la vida útil del reactor ABWR de la Unidad 3; cabe mencionar que en el cálculo se utilizó un periodo de vida de la unidad de 60 años previniendo una posible ampliación de la licencia de operación de 40 a 60 años.

Por otro lado se debe considerar que el edificio se propone dentro de la central debido a la estabilidad geológica del sitio y que éste debe garantizar la integridad de los desechos radioactivos por lo menos durante 500 años.

3.3 Implicaciones económicas.

Otro punto importante a tratar en esta propuesta es el de las implicaciones económicas relacionadas con la construcción del reactor nuclear, en esta sección se tratarán principalmente los costos totales de generación que están compuestos por la suma de los costos de inversión, de combustible, de operación y mantenimiento y adicionales, asimismo es conveniente mencionar que en esta parte, los costos son expresados en moneda de 2004. El objeto de esta sección es consolidar una base de información para evaluar económicamente la propuesta de este trabajo de tesis.

⁶⁷ Elaboración propia con datos de: Paredes, L. C., Sánchez, S., *Proyección al 2035 de los desechos radioactivos de nivel bajo e intermedio en México*, CIC, Cancún, México, 2004.

En la tabla 3.3 se muestran los principales parámetros que serán utilizados en esta propuesta económica.

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR ⁶⁸
Tasa de Descuento	%/año	12%
Moneda	USDLS	Dól. 2004

Tabla 3.3 Parámetros económicos⁶⁹.

Costos de Inversión

En cuanto a la inversión, se distinguen cuatro costos unitarios:

1. Costo directo:

Es la suma, en moneda constante, de las erogaciones correspondientes de una central (no incluye el costo de la subestación eléctrica), dividida entre la capacidad de la misma, lo cual es equivalente a que todos los costos de inversión de la obra fueran erogados instantáneamente⁷⁰.

2. Costo indirecto:

Son los costos de ingeniería, administración y control de la obra, ocurridos en las oficinas centrales de la CFE.

3. Costo instantáneo:

Es el resultado de añadir al costo directo el costo indirecto.

4. Costo actualizado al inicio de la operación:

A partir del "costo directo más indirecto" y mediante el uso de una tasa real de descuento del 12% anual, se calcula el valor de la inversión actualizada al inicio de la puesta en operación de la central. Esta tasa de descuento incluye el costo de los intereses devengados durante el proceso de construcción y otros conceptos.

En la determinación del costo instantáneo de inversión para la instalación de un reactor nuclear, los costos de capital variaban entre 1200 y 1600 [USD/kWe] entre el 2000 y el 2003. Sin embargo, en un estudio más reciente, la Universidad de Chicago en el 2004, reporta un costo de 1247 [USD/kWe] para un reactor de 1144 [MWe]. Éste incluye costos directos e indirectos, contingencias, costos del propietario y son para una planta única⁷¹.

⁶⁸ COPAR de generación 2004, CFE.

⁶⁹ Ortega, Martín del Campo, François, *Costos y Parámetros de plantas nucleoelectricas para el COPAR de generación 2004*.

⁷⁰ Conocido en inglés como *overnight cost*.

⁷¹ Chicago, 2004, "The Economic Future of Nuclear Power", A study conducted at the University of Chicago, Agosto 2004. http://www.anl.gov/Special_Reports/NuclEconSumAug04.pdf

Por otro lado, el 21 de octubre de 2004 GE proporcionó a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) la información de que el costo de inversión para una planta ABWR de 3926 [MWt] y 1356 [MWe] varía entre 1350 y 1430 [USD/kWe]. Este último costo es el que se ha utilizado en esta propuesta y se ha desglosado en forma aproximada, usando los porcentajes mencionados en la referencia más reciente⁷² y suponiendo que la ingeniería preliminar de la planta está terminada. En la tabla 3.4 se muestra el costo unitario de inversión.

CONCEPTO	VALOR	UNIDAD
Costo directo	857	[USDLS/kW]
Costo Indirecto	573 ⁷³	[USDLS/kW]
Costo Instantáneo	1430	[USDLS/kW]
Interés durante la construcción	448	[USDLS/kW]
Costo actualizado	1878	[USDLS/kW]
Tiempo de construcción	60	Meses
Vida de la planta	40	Años

Tabla 3.4 Costos de Inversión ABWR⁷⁴.

En la determinación del tiempo de construcción y la distribución de pagos del proyecto, se llegó a la conclusión de que el tiempo de construcción de la planta desde la preparación del sitio hasta la entrega de electricidad a la línea sería de 60 meses. En este caso se considera que el tiempo de construcción⁷⁵ es de 42 meses, tiempo mayor que los 36.5 y 38.3 meses que duraron las construcciones de los reactores ABWR que operan en Japón desde 1996, mientras que el objetivo dado por GE⁷⁶ es de 39 meses.

Tomando en cuenta el calendario de construcción mostrado en la figura 3.6, se construyó el esquema de pagos que se muestra en la gráfica 3.1, la curva “S” que se muestra en esta gráfica corresponde a dicho esquema⁷⁷.

⁷² Costos de Capital, Chicago 2004.

⁷³ Incluye contingencia y costo del propietario

⁷⁴ Ortega, Martín del Campo, François, *Costos y Parámetros de plantas nucleoelectricas para el COPAR de generación 2004*.

⁷⁵ Desde el primer concreto hasta la carga de combustible.

⁷⁶ <http://www.toshiba.co.jp/product/abwr/english/products/reactor/abwr01.htm>

⁷⁷ COPAR de generación 2004, CFE.

3. Propuesta.

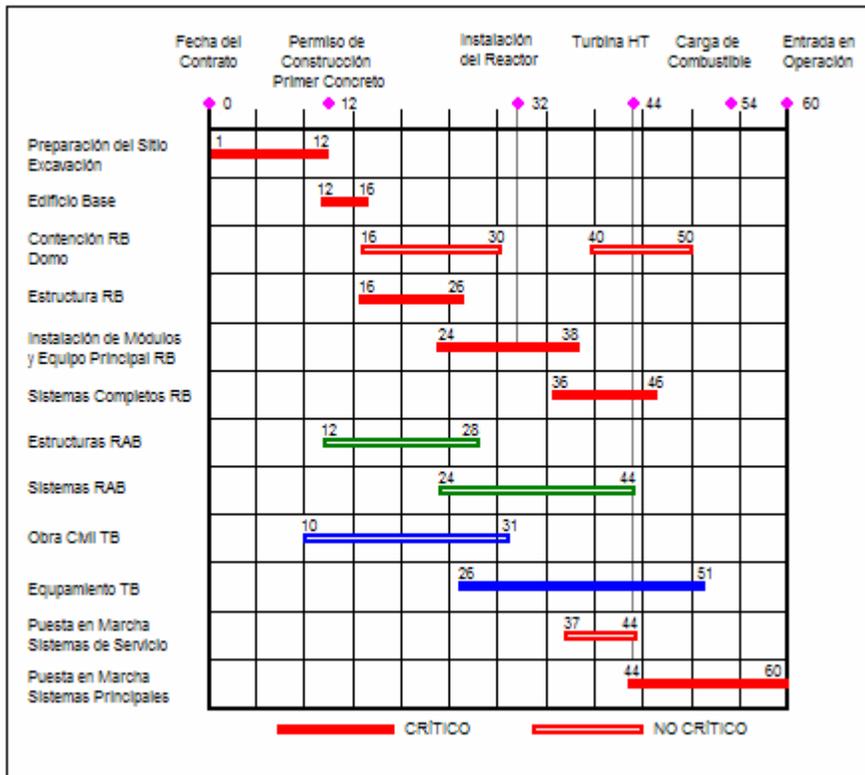
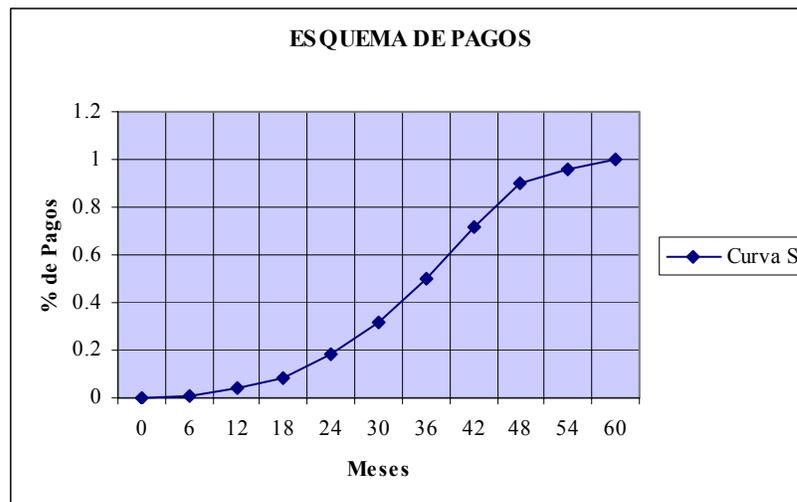


Figura 3.6 Calendario de Construcción⁷⁸.



Gráfica 3.1 Esquema de pagos⁷⁹.

⁷⁸ Fuente: GRNS-GEN IV Meeting, Gen IV Economic Crosscut Group, Washington D.C., April 2002.

⁷⁹ Fuente: Ortega, Martín del Campo, François, *Costos y Parámetros de plantas nucleoelectricas para el COPAR de generación 2004*.

En la tabla 3.5 se puede ver la curva “S” ajustada en pagos semestrales al periodo de construcción, el porcentaje del costo instantáneo que corresponde a cada periodo y el valor presente de este pago llevado a la fecha de arranque. Con estos datos se calcula el costo actualizado que es de \$1,878.60 por [kW]. Asimismo el tiempo de vida de una planta de la generación anterior contemplando una extensión aprobada por Organismos Reguladores es de 40 años⁸⁰, este tiempo es estándar en los estudios de costos de plantas nucleares avanzadas utilizando un factor de planta promedio durante la vida útil de 85%. Se calcula un costo nivelado de generación por concepto de Inversión de Capital de 28.5 [USDLS/MWh]⁸¹.

AÑOS	% CURVA “S”	% PAGO	\$/kW	CURVA “S”	VP PAGO
0.5	0.01	0.010	\$14.30	\$14.30	\$25.20
1.0	0.04	0.030	\$42.90	\$57.20	\$71.44
1.5	0.08	0.040	\$57.20	\$114.40	\$90.01
2.0	0.18	0.100	\$143.00	\$257.40	\$212.62
2.5	0.32	0.140	\$200.20	\$457.60	\$281.27
3.0	0.5	0.180	\$257.40	\$715.00	\$314.71
3.5	0.72	0.220	\$314.60	\$1,029.60	\$394.63
4.0	0.9	0.180	\$257.40	\$1,287.00	\$305.10
4.5	0.96	0.060	\$85.80	\$1,372.80	\$96.10
5.0	1	0.040	\$57.20	\$1,430.00	\$60.53
		1.000	\$1,430.00		\$1,878.60

Tabla 3.5 Distribución de pagos semestrales⁸².

Costos de combustible

Algunos de los parámetros del combustible considerados fueron extraídos de los trabajos realizados por la Gerencia de Evaluación y Programación de Inversiones de la CFE⁸³, siendo típicos de la operación y suministro de combustible nuclear de la CNLV. Estos parámetros fueron actualizados con los nuevos costos de los componentes del ciclo de combustible así como la

⁸⁰ Redding, 2003, Redding J., Muench C. y Graber R, “The Business Case for Building New Nuclear Power Plants in the US”, Proceedings of ICAPP’03, Cordoba, Spain, May 4-7, 2003, paper 3188.

⁸¹ Ortega, Martín del Campo, François, *Costos y Parámetros de plantas nucleoelectricas para el COPAR de generación 2004*.

⁸² Ídem.

⁸³ Ibars 1998, Ibars E., Villalvazo I. y Villanueva C., “Evaluación del Costo Unitario Nivelado de Generación de la Central Laguna Verde 3, según el Modelo COPAR para el ABWR”, CFE, Subdirección de Programación, Reporte Interno G3210/98/28, Nov. 1998.

metodología recomendada por la Agencia Internacional de Energía Atómica⁸⁴, para el análisis de costos de ciclos extendidos de reactores avanzados. Los cálculos fueron efectuados utilizando el modelo de ciclo de equilibrio desarrollado por el Grupo de Ingeniería Nuclear de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, tomando en cuenta un factor de capacidad de 85% y ciclos de 18 meses. Con esto resulta una fracción de recarga de 220 ensambles, equivalente a 25.2% del núcleo.

La metodología recomendada y trabajos recientes indican que el valor nivelado del costo de la recarga de equilibrio debe obtenerse dividiendo el valor presente del costo de la recarga entre el valor presente del costo de la energía generada a lo largo del tiempo de residencia en el núcleo de la recarga de equilibrio. Esto debe hacerse para tomar en cuenta los intereses generados durante el tiempo de suministro de la recarga y los intereses perdidos durante la generación y venta de la energía eléctrica, ya que ambos representan periodos largos de tiempo en relación con los tiempos de suministro y generación de las plantas convencionales.

Finalmente los precios de los componentes del ciclo de combustible se han ajustado a los precios actuales del mercado internacional, tomados como precios base, considerando que en los nuevos contratos efectuados por la CNLV, se eliminan las pérdidas en fabricación, e inclusive se disminuyen considerablemente los tiempos anticipados de los pagos.

En la tabla 3.6 se muestran los principales parámetros de combustible considerados en esta propuesta.

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Potencia Térmica Específica	[MWt/TMU]	24.94
Comb. Carga Inicial	-	872
Peso del Ensamble	[kgU/ensamble]	180.5
Num. de Ensambls de Recarga	-	220
Enriquecimiento Recarga	[%U ²³⁵]	3.95
Fracción de Descarga	[%/100]	0.2520
Enriquecimiento Alimentación	[%U ²³⁵]	0.711
Enriquecimiento Colas	[%U ²³⁵]	0.30

⁸⁴ IAEA 1992, "Water Reactor Fuel Extended Burnup Study", Technical Report Series No. 343, IAEA, Vienna, 1992.

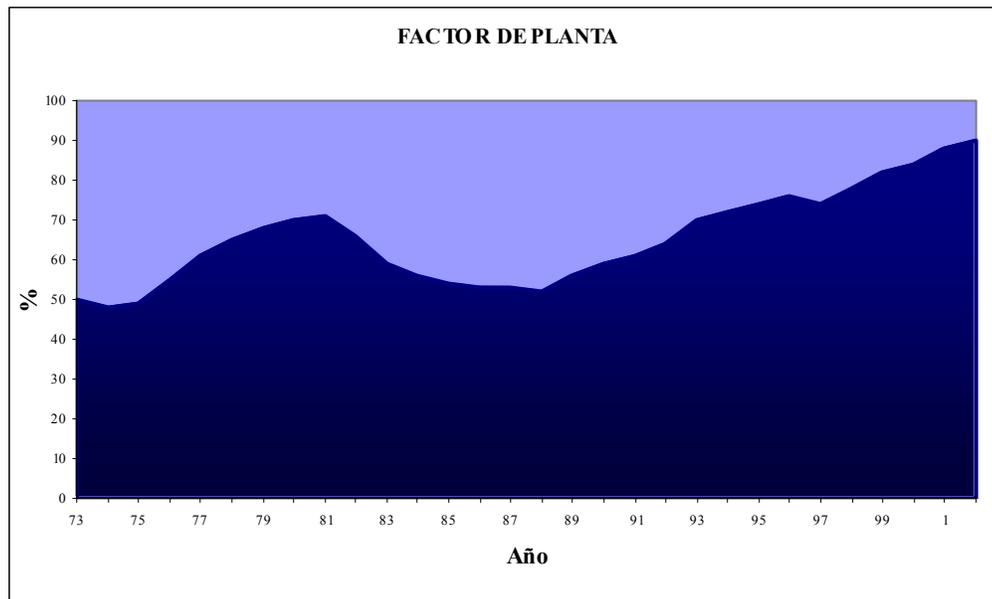
Quemado a la Descarga	[MWd/MTU]	46500
Quemado Incremental	[MWd/MTU]	11732
Duración del Ciclo	[Meses]	18
Duración de la Recarga	[Días]	30
Uranio	[DLS/kgU]	61
Escalación Combustible	[%/año]	1
Conversión	[\$/kgU]	Incluida
Enriquecimiento	[DLS/kgU]	110
Fabricación	[DLS/kgU]	220
Combustible Irradiado	[DLS/kgU]	500
Pago Uranio	[Meses]	-9
Pago Conversión	[Meses]	N.A.
Pago Enriquecimiento	[Meses]	-6
Pago Fabricación	[Meses]	-3
Pago Comb Irradiado	[Meses]	72
Pérdidas Conversión	[%]	0
Pérdidas Fabricación	[%]	0
Poder Calorífico	[MJ/gUe]	4017.60
Consumo Específico Neto	[g/MWh]	2.71
Precio Externo de Referencia	[DLS/gUe]	1.67
Precio Combustible Nivelado	[DLS/gUe]	1.72
Precio del Combustible	[DLS/MJ]	0.00043
Costo Recarga Equilibrio	[DLS/MWh]	6.36
Costo de Combustible Nivelado	[DLS/MWh]	6.54

Tabla 3.6 Parámetros de Combustible⁸⁵.

Costos de Operación y Mantenimiento

En la gráfica 3.2 se muestra la evolución del factor de planta en centrales de EU. La razón de estos incrementos periódicos se debe a las mejoras en los procedimientos de operación y mantenimiento, menor impacto de la reglamentación, mejor gestión y comportamiento del combustible y mayor confiabilidad de los materiales y equipos.

⁸⁵ Ortega, Martín del Campo, François, *Costos y Parámetros de plantas nucleoelectricas para el COPAR de generación 2004*.



Gráfica 3.2 Factor de planta EU⁸⁶.

En un comunicado dirigido a la CFE, GE reportó un factor de planta de 90% para el ABWR. Dicho factor es el esperado para las plantas nucleares avanzadas, obtenido por muchas plantas (no avanzadas) que están en operación en varios países del mundo. Es conveniente mencionar que para efectos de esta propuesta, se considerará para el reactor ABWR, un factor de planta de 85%, lo que hace que los cálculos subsecuentes sean conservadores.

Respecto al quemado (energía obtenida por unidad de masa) del combustible, el ABWR está diseñado para ciclos de operación de 18 ó 24 meses y tiempos de recambio de combustible cada vez más cortos de 30 a 40 días. El tiempo de 30 días es un objetivo a conseguir en los reactores ABWR. Las mejoras en el diseño y la gestión del combustible nuclear han incrementado también el quemado del combustible de descarga, así como la extensión de los ciclos de operación. Las mejoras en la confiabilidad de este tipo de plantas han reducido el número de salidas forzadas de la planta.

Adicionalmente se han simplificado los programas de mantenimiento debido a que muchos equipos se han substituido por otros con mejores diseños o han sido eliminados. Los

⁸⁶ Fuente: Scully Capital, 2002, “Business Case for New Nuclear Power Plants: Bringing Public & Private Resources Together for Nuclear Energy”, Briefing for NEARC, Scully Capital, Nuclear Energy, October 1, 2002.

costos de operación y mantenimiento indican costos del orden de 170 millones de dólares anuales. En estos se toman en cuenta los cambios regulatorios y mejores técnicas de operación y mantenimiento de las plantas. En la tabla 3.7 se muestran los principales parámetros de operación y mantenimiento.

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Factor de planta	[%/año]	85 ⁸⁷
O y M fijos	[DLS/MW año]	61,090
O y M variables	[DLS/MWh]	0.32
O y M total	[DLS/MWh]	8.52 ⁸⁸

Tabla 3.7 Parámetros de operación y mantenimiento⁸⁹.

Costos Adicionales

Los costos adicionales identificados, con relación a la tecnología nuclear son los siguientes: el desmantelamiento de la planta al final de su vida y los costos por la gestión de los residuos radiactivos de medio y bajo nivel. Los valores calculados se muestran en la tabla 3.8.

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Primera Carga de Combustible	[DLS/kWh]	No aplica
Desmantelamiento	[DLS/MWh]	0.08
Gestión de Residuos	[DLS/MWh]	0.02

Tabla 3.8 Parámetros adicionales⁹⁰.

Para los costos de desmantelamiento se considera un valor de 595 millones de dólares de 2004. También se considera que el cargo por desmantelamiento se realiza a los 40 años de vida de la planta. Este cargo se realiza de acuerdo a un programa de desmantelamiento que dura alrededor de 15 años a partir de la fecha de suspensión de actividad comercial.

⁸⁷ El factor de planta de diseño de 90%.

⁸⁸ No incluye costo de manejo y gestión de los residuos de medio y bajo nivel.

⁸⁹ Ortega, Martín del Campo, François, *Costos y Parámetros de plantas nucleoelectricas para el COPAR de generación 2004*.

⁹⁰ Ídem.

En la tabla 3.9 se muestran los resultados obtenidos para un reactor ABWR. Es conveniente mencionar que existe cierta incertidumbre ya que los costos pueden variar dependiendo de las condiciones del mercado, sin embargo la operación de reactores en el mundo y los cambios en la regulación, hacen factibles los supuestos de esta propuesta.

CONCEPTOS	UNIDAD	VALOR
Inversión	[DLS/MWh]	28.57 ⁹¹
Operación y Mantenimiento	[DLS/MWh]	8.54 ⁹²
Combustible	[DLS/MWh]	6.54 ⁹³
Total	[DLS/MWh]	43.65

Tabla 3.9 Resumen de Parámetros.

3.4 Implicaciones financieras.

Una de las implicaciones más importantes de esta propuesta es la financiera, ya que es aquí donde se van a proponer las opciones que pueden seguirse para la realización del proyecto que se ha venido desarrollando. Antes de mencionar los mecanismos financieros que utiliza la Comisión Federal de Electricidad para realizar inversiones en obras para la generación de energía eléctrica, debemos tomar en cuenta la parte jurídica que norma este concepto, el artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, dice textualmente:

- *Corresponde exclusivamente a la Nación generar, conducir, transformar, distribuir y abastecer energía eléctrica que tenga por objeto la prestación de servicio público. En esta materia no se otorgarán concesiones a los particulares y la Nación aprovechará los bienes y recursos naturales que se requieran para dichos fines.*
- *Corresponde también a la Nación el aprovechamiento de los combustibles nucleares para la generación de energía nuclear y la regulación de sus aplicaciones en otros propósitos. El uso de la energía nuclear sólo podrá tener fines pacíficos.*

⁹¹ Incluye 0.08 [DLS/MWh] por concepto de clausura y desmantelamiento de la planta.

⁹² Incluye 0.02 [DLS/MWh] por concepto de manejo y gestión de residuos de medio y bajo nivel.

⁹³ Incluye el manejo y disposición del combustible irradiado.

Del artículo constitucional citado anteriormente, podemos deducir que sólo a la Nación, en este caso a través de la CFE, corresponde la capacidad de operar y administrar una central nuclear, por lo tanto esto repercute en las posibilidades de inversión en esta propuesta. Actualmente CFE tiene aprobados tres esquemas financieros para la inversión en centrales generadoras, las cuales se mencionan a continuación:

1. Inversión Presupuestal:

La CFE por medio de recursos propios realiza la inversión.

2. Endeudamiento financiero de la CFE:

La CFE recurre a un financiamiento externo para cubrir con los costos de inversión, puede hacerlo por el monto total del proyecto o en partes de acuerdo al calendario de pagos.

3. PIDIREGAS:

Proyectos de Impacto Diferido en el Registro del Gasto cuyo marco legal está determinado en la Ley General de Deuda Pública y en la Ley de Presupuesto, Contabilidad y Gasto Público Federal: realización de proyectos de infraestructura productiva de largo plazo que consisten en un manejo contable que considera como pasivo directo los montos de financiamiento a pagar durante el ejercicio anual corriente y el ejercicio siguiente, lo demás es considerado pasivo contingente siendo el sector privado quien mediante estos esquemas realiza la inversión.

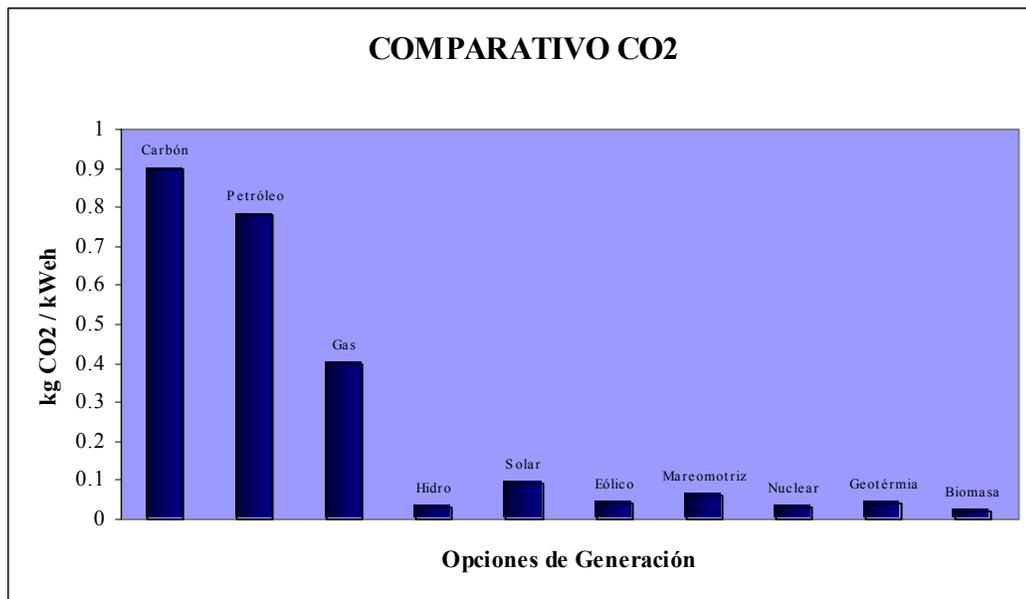
▪ **Obra pública financiada (OPF):**

Después de una licitación y por medio de un contrato la CFE otorga al ganador la concesión de construcción de una central, siendo condición que al finalizar ésta y después del periodo de pruebas correspondiente, se realice una transferencia de propiedad, es decir que después de pagar al particular el monto del contrato, la Comisión Federal de Electricidad adquiere la propiedad de la central y procede a operarla.

De acuerdo a lo estipulado en el artículo 27 constitucional y tomando en cuenta que el combustible que se utiliza en un reactor nuclear de tipo ABWR es uranio enriquecido, la opción del Productor Independiente de Energía Eléctrica no podría ser tomada en cuenta ya que corresponde exclusivamente a la Nación el aprovechamiento de los combustibles nucleares para la generación de energía eléctrica. Por lo que para efectos de la realización de esta propuesta se considera que la opción de Obra Pública Financiada es la más adecuada considerando un menor impacto para las finanzas de la CFE, siempre y cuando la empresa constructora tenga la solidez financiera para afrontar los gastos del proyecto desde el inicio hasta la entrega de la planta operando.

3.5 Implicaciones ambientales.

Todas las opciones de generación de energía eléctrica afectan o pueden afectar al medio ambiente, incluso aquellas que son de tipo renovables, según lo señala la gráfica 3.3. Sin embargo es en este rubro en donde las centrales nucleoelectricas tienen la principal ventaja en relación a las otras opciones, ya que al no quemar combustibles fósiles ó hidrocarburos para la producción de energía eléctrica, éstas no emiten gases de efecto invernadero a la atmósfera. La energía nucleoelectrica produce un impacto ambiental cuantificable y tangible, que a veces se magnifica emocionalmente, pero que la hace una de las opciones más sustentables ambientalmente.



Gráfica 3.3 Comparativo producción de CO₂ para diferentes tipos de centrales⁹⁴.

De la gráfica 3.3 podemos deducir un ejemplo ilustrativo de la emisión anual de CO₂ de tres tipos centrales para facilitar la comparación entre cada una de ellas. Para el ejemplo se seleccionaron los siguientes tipos de centrales; una central carboeléctrica, una de ciclo combinado y una central nucleoelectrica. Los resultados se muestran en la tabla siguiente.

⁹⁴ Fuente: SENER, <http://www.sener.gob.mx>

CENTRAL	CAPACIDAD POR UNIDAD	CAPACIDAD TOTAL	EMISION ANUAL DE CO ₂
Carboeléctrica ⁹⁵ Central dual c/desulfurador	4 x 350 [MWe]	1400 [MWe]	8,278,200,000 [kg CO ₂ AÑO]
Ciclo Combinado 2 x 1 “G” ⁹⁶	2 x 750 [MWe]	1500 [MWe]	4,730,400,000 [kg CO ₂ AÑO] ⁹⁷
Nuclear (ABWR)	1 x 1356 [MWe]	1356 [MWe]	504,838,800 [kg CO ₂ AÑO] ⁹⁸

Tabla 3.10 Comparación Producción de CO₂⁹⁹.

De la tabla anterior podemos observar que para capacidades de generación similares, la cantidad de CO₂ emitida al medio ambiente es muchas veces menor en la opción de la Central Nucleoeléctrica, por lo que resulta evidente que la tecnología nuclear es la mejor alternativa para el país por su bajo impacto a la atmósfera y al medio ambiente.

También es necesario mencionar que el CO₂ que se atribuye a las centrales nucleares no procede de la operación de las plantas sino que proviene tanto del ciclo del combustible (extracción, procesamiento, enriquecimiento y transporte) como de los equipos y maquinaria que operan en dichas centrales.

3.6 Rentabilidad económica.

Es primordial el análisis de la generación de energía eléctrica por reactores nucleares tomando en cuenta el factor de planta de esta tecnología que en comparación con el de otros tipos de centrales resulta ser el más alto, alrededor de 85%, como se puede observar en la gráfica 3.4. Esto sin tomar en cuenta el factor de planta reportado en centrales de los EU en donde hay registros de hasta 92% y de la propia CNLV con factores de hasta 87.8%.

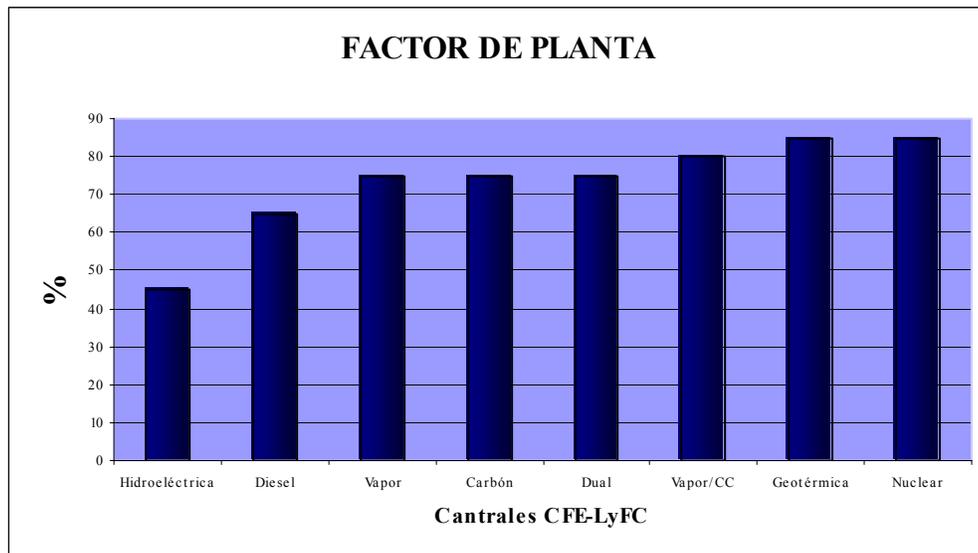
⁹⁵ La central carboeléctrica opera con carbón importado.

⁹⁶ Número de turbinas de gas por cada turbina de vapor (1x1 ó 2x1) y modelo de turbina de gas (F ó G).

⁹⁷ Tomando en cuenta un factor de planta de 80%.

⁹⁸ Tomando en cuenta un factor de planta de 85%.

⁹⁹ Fuente: Elaboración propia con datos de SENER, <http://www.sener.gob.mx>



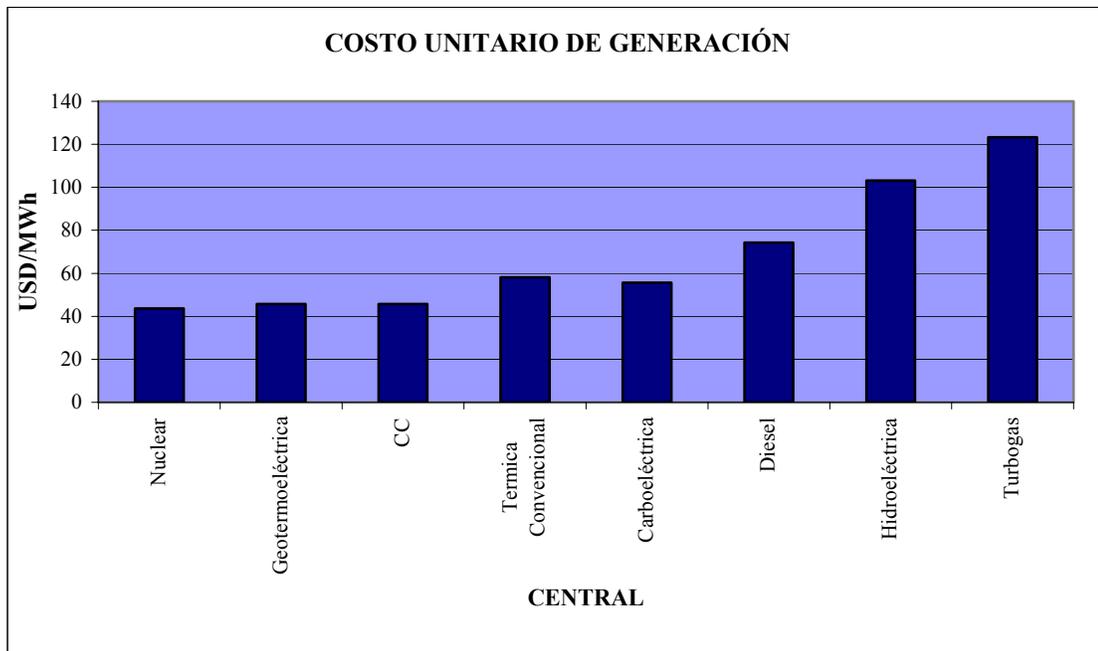
Gráfica 3.4 Factor de planta para diferentes tipos de centrales¹⁰⁰.

Tomando en cuenta el factor de planta de 85% para un reactor de tipo ABWR con una capacidad de generación de 1300 [MWe] netos, podemos esperar una generación anual neta de 9,280,024 [MWh], mientras que para una central hidroeléctrica de las magnitudes de El Cajón, con una capacidad de 700 [MWe] y con un factor de planta de 50%, podemos esperar una generación neta anual de 3,285,7500 [MWh], es decir que en obras con características similares con un alto costo de inversión y bajos costos de generación, las centrales nucleoelectricas mantienen una ventaja muy grande en el rubro de generación de energía eléctrica debido a su gran factor de planta, situación que se repite frente a otros tipos de generación.

Por otra parte la construcción de una central nucleoelectrica no requiere de la instalación de equipos adicionales para controlar las emisiones de gases de efecto invernadero al medio ambiente, como precipitadores electrostáticos, reductores catalíticos, no catalíticos, quemadores de bajo NO_x o desulfuradores. Otro factor importante que le da rentabilidad económica a las centrales nucleoelectricas es que a diferencia de las fuentes de energía renovables, no se requieren de grandes extensiones de terreno para la instalación de paneles solares o para la construcción de aerogeneradores, además se puede considerar como una fuente de energía continua ya que no depende de la fuerza del viento o de la intensidad de la radiación solar, es

¹⁰⁰ Fuente: Secretaría de Energía; <http://www.sener.gob.mx>

decir, que no sufre el efecto de la intermitencia. En cuanto a costos unitarios de generación el COPAR 2004 reporta los siguientes resultados.



Gráfica 3.5 Costos unitarios de generación¹⁰¹.

En la gráfica 3.5 podemos observar que la tecnología nuclear es la que tiene el costo unitario de generación más bajo de las opciones posibles, haciéndola rentable y económicamente competitiva, incluso frente a las opciones de ciclo combinado y geotermoeléctrica. De todas las secciones anteriores podemos deducir que la construcción de un reactor nuclear en la CNLV presenta una mayor competitividad con respecto a otro tipo de centrales, principalmente en la cantidad de energía eléctrica producida y en los costos unitarios de generación, asimismo se demostró que los costos de inversión se han reducido gracias a un menor tiempo de implementación del proyecto, de 5 años en lugar de 8 y de considerar un alto factor de planta. En los costos de operación y mantenimiento no existen grandes ventajas, no así en los costos de combustible, además el impacto del mayor factor de planta tiende a hacer disminuir los costos de la propuesta, lo que le da al proyecto una rentabilidad económica considerable.

¹⁰¹ Fuente: COPAR 2004 de generación, CFE.

En el COPAR de Generación, las centrales termoeléctricas convencionales a base de combustóleo con dos unidades de 350 [MW], son consideradas como centrales de referencia, por esto el costo total de generación de esta central está asociado a un índice igual a 100. A partir de tal índice se reflejan las diferencias relativas de los costos correspondientes a las diversas tecnologías. En la tabla 3.11 se muestran los costos por [MWh] neto generado por concepto de inversión, combustible y operación y mantenimiento por tipo de tecnología, expresada en [pesos/MWh].

Central	Potencia Bruta [MWe]	Inversión		Combustible ¹⁰²		Operación y mantenimiento ¹⁰³		Total	
		(\$/MWh)	Índice	(\$/MWh)	Índice	(\$/MWh)	Índice	(\$/MWh)	Índice
Térmica Convencional	2 x 350	203.78	100	387.93	100	60.11	100	651.82	100
Turbogas Autoderivada	1 x 42.6	699.17	343	474.32	122	207.62	345	1381.11	212
Ciclo Combinado 2 x 1 "G" ¹⁰⁴	1 x 750	87.70	43	349.16	90	42.10	70	478.96	73
Diesel ¹⁰⁵	3 x 13.5	367.78	180	307.14	79	184.81	307	859.73	132
Carboeléctrica ¹⁰⁶ Central dual c/desulfurador	2 x 350	391.28	192	128.87	33	102.54	171	622.69	96
Nuclear (ABWR) ¹⁰⁷	1 x 1356	318.05	156	73.27	19	97.58	162	488.90	75
Geotermoeléctrica ¹⁰⁸	4 x 26.60	229.62	113	209.21	54	73.28	122	512.11	79
Hidroeléctrica	5 x 300	685.29	336	6.69	2	18.08	30	710.06	109

Tabla 3.11 Costo unitario de generación (precios medios de 2004)¹⁰⁹.

Como podemos observar en la tabla 3.11 la tecnología nuclear es económicamente competitiva incluso frente a las tecnologías de ciclo combinado y geotermoeléctrica, además su bajo costo de generación la hace una de las opciones más rentables de las disponibles en la actualidad.

¹⁰² El costo del combustible se deriva del escenario medio de evolución de los precios (28/02/2004).

¹⁰³ El costo de operación y mantenimiento incluye el correspondiente al agua, excepto para las centrales hidroeléctricas que se considera combustible.

¹⁰⁴ Número de turbinas de gas por cada turbina de vapor (1x1 ó 2x1) y modelo de turbina de gas (F ó G).

¹⁰⁵ Los motores de combustión interna son de dos tiempos.

¹⁰⁶ La central carboeléctrica opera con carbón importado.

¹⁰⁷ El costo unitario de inversión incluye un cargo por desmantelamiento de 0.9 [pesos/MWh], el costo del combustible incluye un cargo por manejo de combustible irradiado de 10.75 [pesos/MWh].

¹⁰⁸ El costo del combustible se refiere a la inversión, operación y mantenimiento del campo geotérmico.

¹⁰⁹ COPAR 2004 de generación, CFE.

4 Análisis de la propuesta.

4.1 Impactos de la propuesta.

La Economía Veracruzana¹¹⁰

Veracruz es un Estado que sobresale por su vocación agrícola, forestal y pesquera, pero también cuenta con una gran estructura productiva industrial que lo coloca como líder nacional en ramas como la petroquímica básica, que equivale al 93.2% del total nacional, y la generación de energía eléctrica. El Estado ocupa el sexto lugar en la economía nacional; en el año 2000 el Producto Interno Bruto estatal fue de 197, 237,788 miles de pesos (21,915 millones de dólares), que representó una aportación del 4.0% al PIB nacional. El 63.1% de esta cifra se genera en el sector servicios, le sigue en importancia el sector industrial y manufacturero con el 29.0% y el sector primario que genera el 7.9%. Esta estructura es similar a la de la producción nacional, aunque en Veracruz es mayor la aportación del sector primario.

Las principales actividades productivas de Veracruz son la agricultura, la ganadería, la industria metálica básica, los alimentos, bebidas, tabaco, petroquímica y electricidad. Como ya se ha mencionado en los capítulos anteriores, esta propuesta consiste básicamente en la construcción de un nuevo reactor nuclear de tipo ABWR en la CNLV, situación que impactaría directamente la economía del municipio de Alto Lucero y del Estado de Veracruz. Para analizar los impactos directos e indirectos de la propuesta se redactan los siguientes apartados.

¹¹⁰ Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave, <http://www.veracruz.gob.mx>

Impactos Directos¹¹¹

En cualquier lugar, la implementación de tecnologías modernas en la creación de infraestructura es tal vez una de las actividades que mayores impactos produce en la vida económica y en el medio ambiente. Al analizar los efectos directos de la realización de esta propuesta deben distinguirse tanto los alcances regionales de dichos impactos como la distribución temporal, o los periodos, durante los cuales se podrían ejercer los presupuestos. Por otro lado, deben también separarse los efectos asociados a las etapas de diseño y construcción de los que corresponden a la fase de operación de la planta. De acuerdo a la información económica de esta propuesta, la construcción de un nuevo reactor ABWR en la CNLV reporta un costo de inversión de 2,547 millones de dólares¹¹². Esta inversión equivale aproximadamente al 11.62% del PIB del Estado de Veracruz en el año 2000.

Los impactos económicos derivados de la construcción, podrían tener resultados en términos de un desarrollo estable y sostenido en la región, por lo que un reto importante sería aprovechar este proyecto como el detonador de este desarrollo a largo plazo, basado en una estrategia planeada y concertada con el gobierno y la sociedad del Estado. Los efectos directos más importantes se ubican durante el periodo de construcción, particularmente entre el cuarto y quinto año, y estos van relacionados con la generación de empleos y con la demanda de materiales y equipos, los que en su mayoría se concentran en las industrias de la construcción, del hierro y acero, de productos metálicos estructurales y de maquinaria y equipo no eléctrico. Se estima que alrededor del 60% de la inversión inicial se eroga entre proveedores de bienes y servicios nacionales¹¹³, y aún suponiendo que éstos se importaran o se produjeran fuera del Estado, esta entidad podría resultar beneficiada con un 30% del gasto realizado en la construcción de la planta, es decir, con alrededor de 764 millones de dólares.

Por las características de la tecnología y por la magnitud del costo inicial, los impactos directos de la operación de la planta son menores a los de la etapa de construcción; sin embargo,

¹¹¹ CFE, *Estudio de impactos socioeconómicos de la construcción y operación de una nueva Central Nucleoeléctrica*, México, 1994.

¹¹² En moneda de 2004.

¹¹³ CFE, *Estudio de impactos socioeconómicos de la construcción y operación de una nueva Central Nucleoeléctrica*, México, 1994.

tanto la generación de empleos como los servicios a terceros y los materiales necesarios para el mantenimiento serían áreas de oportunidad para la población y las empresas de la zona. Asimismo, a diferencia de lo ocurrido en las unidades uno y dos y tomando en cuenta la experiencia acumulada en la operación de la central se considera que gran parte del diseño e ingeniería requeridos podrían ser realizados por técnicos e ingenieros mexicanos. También se estima que en promedio un nuevo reactor en la central generaría aproximadamente 500 empleos permanentes más otros eventuales o temporales para mantenimiento y recarga de combustible. Además si tomamos en cuenta la existencia de mano de obra calificada y empresas proveedoras estatales se puede afirmar que al menos 95% de los gastos en mano de obra y un 10% de los gastos en equipo y materiales se ejercerían en la entidad, es decir, la derrama económica durante la construcción sería de alrededor de 800 millones de dólares, más las posibilidades de ocupación y bienestar para la población de la zona.

La derrama económica para la región se mediría principalmente a través de los sueldos y salarios percibidos por los trabajadores contratados y por una participación importante en el suministro de los materiales necesarios tanto para la construcción del reactor como para las instalaciones y servicios considerados dentro de los costos indirectos de esta propuesta. Por otra parte, el impacto sobre la demanda de bienes y servicios en la región tendría efectos multiplicadores que se expresarían indirectamente en un crecimiento económico general de la zona.

Impactos Indirectos

Por impactos indirectos se entiende la cadena de reacciones que el proyecto tendría principalmente por el gasto de inversión e ejercer. Esta cadena de reacciones se da tanto por la demanda de insumos, equipo y mano de obra que el proyecto demanda como por los efectos que tiene sobre la economía el incremento en la producción, en este caso de energía eléctrica. De la experiencia en la construcción de la CNLV y del análisis de la información estatal se infiere que la construcción de dicha planta tuvo impactos importantes, pues la fuerte inversión que representó el proyecto contribuyó a amortiguar la caída en la tasa de crecimiento económico del Estado de Veracruz de 1985 a 1988. La industria de la construcción, sector viable para ser

impactado en la etapa de construcción, creció de 1970 a 1980 con una tasa promedio anual de 7.3%, lo cual en términos absolutos significa que pasó de aportar a la economía del Estado 7,416 millones de pesos en 1970 a 15,507 millones de pesos en 1980¹¹⁴.

Por otro lado, el empleo también se vio afectado con la construcción de Laguna Verde, ya que en la década de los 70s coincidentemente con el inicio de la construcción de la central, la población económicamente activa creció 6.4% y en la de los 80s con una tasa anual de 1.3%, lo anterior significa un aumento de 129,000 personas empleadas de 1970 a 1980 mientras que en la década siguiente el incremento fue de 39,960 personas. Asimismo debido a la construcción de Laguna Verde y a pesar de que las tasas de crecimiento de la vivienda se mantuvieron constantes de 1970 a 1980, tanto a nivel estatal como regional, los municipios de Alto Lucero, La Antigua, Emiliano Zapata y Úrsulo Galván presentaron un aumento considerable en dicha década.

Cabe mencionar que la ampliación de la Central sería un importante estímulo para la creación de nuevas empresas, pues se estima que alrededor de un 17% de las empresas proveedoras inician su operación y surgen durante la construcción y operación de una central. Asimismo permitiría elevar la rentabilidad de las empresas participantes ya que no sólo acumularían experiencia sino que se elevaría su volumen de ventas al ser proveedoras del proyecto. En resumen, la inversión en la planta tuvo impactos importantes a nivel estatal y regional principalmente en aspectos como: crecimiento y estructura económica, empleo, población y vivienda. De acuerdo a la experiencia de Laguna Verde se puede plantear que la instalación de un nuevo reactor, impulsará todos los sectores y aspectos mencionados con anterioridad, apoyando el crecimiento económico de la zona.

Impactos Socioeconómicos¹¹⁵

En este apartado podemos mencionar que la CFE a través de la construcción de la CNLV contribuyó al mejoramiento de la zona ya que realizó fuertes inversiones en educación, servicios de salud, obras públicas y comunicaciones principalmente en los municipios de Actopan, Úrsulo

¹¹⁴ Ídem.

¹¹⁵ CFE, *Factibilidad técnico-económica de la construcción y operación de nuevas unidades nucleoelectricas*, México, 1995 y CFE, *Estudio de impactos socioeconómicos de la construcción y operación de una nueva Central Nucleoelectrica*, México, 1994.

Galván y Alto Lucero. Por lo anterior se puede asegurar que la instalación de un nuevo reactor en la central, traería como consecuencia efectos sociales favorables a esa comunidad. En cuanto al aspecto social se puede observar que en nuestra comunidad existen diversas opiniones, algunas de ellas encontradas, con respecto a la tecnología nuclear y a la construcción de centrales de este tipo, por creencias injustificadas sobre efectos negativos de la energía nuclear y decimos que son injustificadas porque más de 25 años de experiencia operacional acumulada en las dos unidades, ponen de manifiesto la seguridad de la central y esclarece una fuerte necesidad de dotar a la población de información y de una nueva perspectiva cultural.

Actualmente no existen dificultades técnicas que no puedan ser superadas en el diseño y construcción de una central nuclear. Las dificultades prácticas están relacionadas con el interés del público en cuestiones de seguridad, la disposición de desechos y la proliferación nuclear con fines no pacíficos. Sin la aceptación del público, ningún programa de energía nuclear puede ser efectivamente desarrollado, ya sea en aplicaciones energéticas o no energéticas, el encontrar una solución para tal dificultad constituye uno de los mayores retos que se deben superar para efectos de la realización de esta propuesta. La recomendación que se hace a este respecto es iniciar a la brevedad una campaña de concientización de la población a niveles local, regional, estatal y nacional de los beneficios del uso de la tecnología nuclear; misma que debe ser promovida por los gobiernos estatal y federal en conjunto con la CFE y los medios de comunicación con la finalidad de que el nuevo reactor entrara en operación a más tardar en el transcurso de los próximos diez años.

4.2 Beneficios potenciales.

Los resultados de la propuesta desarrollada en este trabajo de tesis, muestran que la tecnología nuclear es sumamente atractiva desde el punto de vista ambiental por su baja emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera y menos atractiva desde el punto de vista económico ya que a pesar de que es muy competitiva, incluso frente a la opción de ciclo

combinado, los costos de inversión son muy elevados. Sin embargo se debe aclarar que a pesar de los altos costos de inversión inicial, la rentabilidad económica a largo plazo compensa dicha inversión ya que la tecnología nuclear posee costos nivelados de generación muy bajos, sin mencionar los beneficios ambientales por su prácticamente nula emisión de contaminantes a la atmósfera.

Con la construcción de un reactor ABWR de 1356 [MWe], la capacidad de generación de la CNLV prácticamente se duplicaría y ésta aportaría alrededor del 9% de la energía generada por la CFE, pudiéndose colocar ésta en la base de la curva de demanda, disminuyendo la necesidad de introducir plantas con altos costos de operación para satisfacer los picos de la demanda de energía eléctrica. Un beneficio potencial de la realización de esta propuesta es la diversificación de fuentes primarias para la generación de energía eléctrica, lo cual disminuiría la dependencia del sector eléctrico de los hidrocarburos, que actualmente es de más del 70%, situación que es apremiante, debido al agotamiento de éstos no sólo en nuestro país sino en el mundo entero. Una utilidad económica y ambiental sería el ahorro de combustibles empleados, ya que como se puede observar en la Tabla 4.1, haciendo una comparación de la cantidad de combustible necesaria para producir 1000 [MWe-Año], la tecnología nuclear al emplear U^{235} representa la opción que menos combustible requiere.

FUENTE	CANTIDAD NECESARIA DE COMBUSTIBLE PARA GENERAR 1000 [MWe-AÑO] ¹¹⁶
U^{235}	3.6 [T]
Petróleo	15 [M barriles]
Carbón	3 [M T]
Gas natural	2400 [M m ³]

Tabla 4.1 Comparación combustible¹¹⁷.

Como se puede apreciar en la tabla anterior, no sólo se reducirían los costos de combustible sino que las emisiones ambientales por el quemado de los mismos disminuirían

¹¹⁶ Incluye factores de planta.

¹¹⁷ Fuente: Ortiz Magaña José Raúl, *Energía Nuclear: Mitos Y Realidades*, Hoy, 2º Congreso Academia de Ingeniería, Agosto de 2005.

notablemente. Por otra parte con la instalación del nuevo reactor, la CFE garantizaría el suministro de energía eléctrica, con la calidad y oportunidad que exige el desarrollo del país y disminuiría la importación de combustibles como carbón o gas natural. Además de las ventajas ambientales, las centrales nucleoelectricas no sólo presentan competitividad en costos de generación sino también en la estabilidad de costos de combustible ya que los precios de los hidrocarburos fluctúan mucho más que los del uranio (Ver Anexo B).

Una implicación adicional de este trabajo es que la realización de la propuesta sea el detonador de un programa nuclear nacional que contemple la construcción de otros reactores en el país, con objeto de modificar la política actual de la CFE de invertir en centrales de ciclo combinado que utilizan gas natural como combustible, dado que México no cuenta con las reservas suficientes para garantizar su operación y que a largo plazo terminaría por ser un importador neto de gas y depender de los costos del mercado, donde la oferta y la demanda terminarían por encarecer el combustible al disminuir las reservas mundiales.

4.3 Perspectivas.

Uno de los objetivos principales de la elaboración de esta propuesta fue realizar una obra de consulta y referencia en la proyección de la posible construcción de un reactor nuclear en la CNLV así como concretar una propuesta de diversificación de fuentes de energía primaria para la generación de energía eléctrica, y la inversión en la infraestructura del sector eléctrico con miras a la protección del medio ambiente.

En lo que se refiere al sector eléctrico, el principal socio comercial de México es Estados Unidos (EU) a quien vende el 90% de sus exportaciones de energía y de quienes obtiene el 70% de sus importaciones. El comercio entre ambas naciones se ha incrementado considerablemente desde la entrada en vigor del Tratado de Libre Comercio (TLC) en 1994, actualmente México está haciendo esfuerzos por diversificar sus exportaciones y negociar otros tratados de libre

comercio, al final del 2001 tenía acuerdos firmados con 31 países. México es un importador de electricidad proveniente de EU, las compras totales para abastecer el mercado en el norte del país, donde la capacidad de generación es inadecuada para satisfacer la demanda, acumuló 524 [GWh] en 1999, hasta enero del 2002 existían 9 interconectores entre ambos países.

Debido al continuo crecimiento demográfico y al desarrollo de los sectores industrial comercial y de servicios en México, la CFE requiere mantener la expansión de su capacidad de generación con el fin de garantizar el suministro de energía eléctrica. Lo anterior aunado a la incorporación de México a la OCDE y a su integración al mercado norteamericano, mediante la firma del TLC, hacen necesaria una adecuada planeación para definir la capacidad y tipo de centrales generadoras a instalar.

En los últimos años, el programa de expansión eléctrica considera que ésta debe darse primordialmente a través de centrales cuya operación esté basada en el uso de gas natural dado que estos minimizaban los costos de inversión y operación. Sin embargo la alta volatilidad reciente de los precios del gas hace cuestionable esta propuesta y da pauta a que se revisen otras opciones, entre ellas la nuclear. Por otro lado México no cuenta con recursos carboníferos de gran magnitud por lo que las plantas duales recibirán carbón importado, y aunque las reservas mundiales son enormes, se esperan problemas por restricciones ambientales, como lo es el Protocolo de Kyoto. En el caso del gas natural, las fuentes exportadoras hacia nuestro país son EU y Canadá cuyos mercados se encuentran en expansión por lo que es difícil pronosticar buenas condiciones de suministro a largo plazo.

En este panorama resulta de interés la opción nuclear donde existe una estabilidad en los precios del combustible y se considera que al comparar los costos de generación con los de otras tecnologías, las centrales nucleares con reactores avanzados, producen electricidad en forma competitiva. Se reconoce que los costos de las tecnologías de generación por medios nucleares son cambiantes en el tiempo, tanto en las inversiones de capital necesarias, como en la operación y mantenimiento de las plantas, incluyendo aquellos de gestión del combustible nuclear. Sin embargo como pudimos observar en la sección económica, estos tienden a disminuir, al tiempo que se gana experiencia en construcción y operación de centrales en todo el mundo, sobre todo en lo relativo a las plantas con reactores avanzados.

Conscientes de esta situación, es posible decir que nuestro país podría verse beneficiado con la implementación de un programa nuclear que inicie la construcción de nuevos reactores en México con la finalidad de incrementar la capacidad de generación del sector eléctrico y satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica en el país. Por último es de considerarse que algunos países como EU y Francia se encuentran a punto de reiniciar importantes programas nucleares y México no puede quedarse atrás por desconocimiento de las nuevas tecnologías.

En 1992, El Consejo Internacional de Sociedades Nucleares (CISN)¹¹⁸ considerando las necesidades actuales y el panorama energético mundial, determinó que en los próximos cincuenta años será demandada una contribución aun más importante que en el presente de la tecnología nuclear. Uno de los factores que el CISN consideró más relevantes en el futuro de la tecnología nuclear es su contribución al mejoramiento de la calidad de vida ya que proporciona electricidad a costos competitivos y minimiza los efectos adversos en el medio ambiente. Además de hacer énfasis en los adelantos tecnológicos en cuestiones de eficiencia y seguridad y la experiencia acumulada a escala mundial.

En los próximos cincuenta años, problemas globales tales como el crecimiento demográfico en los países en desarrollo, el aumento en el consumo de energía y los incrementos de CO₂ en la atmósfera, así como otros problemas del medio ambiente, permiten asegurar el uso de recursos energéticos de bajo impacto ambiental, con alta competitividad económica y de suministro sostenible a largo plazo para satisfacer la demanda mundial de energía, situación que consideramos un área de oportunidad para el despliegue de la tecnología nuclear.

¹¹⁸ International Nuclear Societies Council, Chicago, 1992.

Conclusiones generales.

El medio ambiente está formado por dos elementos básicos de gran importancia; los elementos bióticos y los abióticos que en conjunto forman el sistema terrestre y la biosfera, hogar de los seres vivos. La atmósfera, como parte de este sistema, es una mezcla gaseosa constituida principalmente por nitrógeno y oxígeno que contiene en forma natural los llamados gases de efecto invernadero que son responsables del efecto que lleva el mismo nombre, éstos gases mantienen caliente la baja atmósfera y la superficie terrestre y desempeñan un papel clave en el sistema climático, ya que absorben la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre.

En la actualidad, el incremento de la producción y la posterior emisión hacia la atmósfera de gases de efecto invernadero, como resultado de las actividades humanas en los ámbitos industrial y de generación de energía eléctrica a través de la quema de combustibles fósiles como el carbón, el combustóleo, el coque de petróleo o el gas natural, parece estar modificando la velocidad y la dirección del cambio climático natural. Algunas de las repercusiones sobre el medio ambiente podrían ser un aumento global de la temperatura debido al incremento del efecto invernadero, el incremento del nivel de los océanos por el derretimiento de masas glaciares en los polos y la llamada lluvia ácida que se produce cuando algunos contaminantes se combinan con la humedad atmosférica. Otra consecuencia grave sería el impacto negativo sobre la capa de ozono que consiste en su adelgazamiento, exponiendo a la vida terrestre a un exceso de radiación ultravioleta.

Las crecientes preocupaciones respecto a los efectos ambientales del consumo de combustibles fósiles para la producción de energía eléctrica han fomentado en el mundo el interés por las fuentes poco contaminantes. La energía nucleoelectrica en este aspecto, ha demostrado no sólo ser una fuente de energía primaria limpia y segura sino también ser competitiva técnica y económicamente. Por lo que el desarrollo y despliegue de esta fuente de energía podría ser para muchas naciones, incluyendo a nuestro país, una opción atractiva para contribuir a un suministro energético seguro, limpio y confiable a mediano y largo plazo.

Las centrales nucleoelectricas utilizan la energía liberada en los procesos de fisión nuclear para producir energía eléctrica, es decir, que no utilizan combustibles fósiles como fuente de energía primaria, lo que las exime de emitir gases de efecto invernadero a la atmósfera. En el caso particular de nuestro país, la Gerencia de Centrales Nucleoelectricas de la CFE, cuenta con la CNLV, la única central nucleoelectrica del país que está integrada por dos unidades, cada una con una capacidad efectiva de 682.44 [MWe].

Actualmente los reactores nucleares avanzados incorporan nuevos diseños que son más seguros, económicos y confiables que sus predecesores ya que cuentan con nuevas características y mejoras en conceptos relacionados con la seguridad y la eficiencia general del reactor. Tal es el caso de la tecnología ABWR, reactor refrigerado por agua que se caracteriza por utilizar agua ligera como moderador y refrigerante. El ABWR, desarrollado por General Electric, Toshiba Power y Hitachi LTD, presenta una serie de innovaciones con respecto a su antecesora, la tecnología BWR como el uso de dispositivos de seguridad pasiva independientes que no requieren del suministro de energía eléctrica, el uso de materiales más adecuados como aleaciones de acero de grado nuclear, el uso de un sistema impulsor de barras de control de movimiento fino más preciso que el usado en el BWR, sistemas de recirculación mejorados, sistemas de control redundantes, sistemas de seguridad microprocesados o el uso de cables de control hechos de fibras óptica entre otros.

Debido a estas ventajas la propuesta que es objeto de este trabajo se concentró en la tecnología ABWR, que cuenta ya con algunos años de experiencia en tres centrales que operan en Japón. La propuesta de este trabajo consistió en la construcción de un nuevo reactor nuclear con tecnología ABWR, así como, de una obra de toma, de una obra de descarga y de un edificio para contención de residuos radioactivos de medio y bajo nivel dentro del predio de la CNLV, lugar que ya ha sido estudiado con anterioridad por la CFE y que cuenta con las condiciones sísmicas y geomorfológicas ideales para la construcción de una unidad de este tipo. Los parámetros que se tomaron en cuenta para la ubicación de cada construcción fueron el tipo de suelo, variaciones del terreno, y la disponibilidad de espacio libre dentro de la central.

De concretarse esta propuesta, con la construcción y puesta en operación de una nueva unidad con una capacidad de 1356 [MWe], la capacidad nominal total de la CNLV sería de 2721

[MWe], lo que representaría alrededor del 6% de la capacidad efectiva instalada y alrededor de 9% de la generación total de electricidad de la CFE incluyendo a los productores independientes. En cuanto a las implicaciones económicas, se consideró un costo nivelado de inversión de 28.49 [USD/MWh]. Adicionales al costo de inversión se deben tomar en cuenta los costos de combustible, de operación y mantenimiento y algunos costos adicionales como el desmantelamiento de la planta al final de su vida y los costos por la gestión de residuos radioactivos de medio y bajo nivel. Como costo nivelado de operación y mantenimiento se llegó a un valor de 8.54 [USD/MWh], mientras que para el combustible a un valor 6.54 [USD/MWh], resultando un total y un costo nivelado de generación de 43.65 [USD/MWh].

En cuanto a las opciones financieras del proyecto, se debe tener en cuenta que el artículo 27 constitucional restringe el aprovechamiento de los combustibles nucleares a la Nación, por lo que la operación de la unidad sólo puede ser realizada por la CFE y elimina la opción del Productor Independiente de Energía Eléctrica, sólo restarían dos opciones; la primera sería la inversión presupuestal, es decir que la CFE con recursos propios realice la inversión y la segunda, que al parecer es la más viable, es la de Obra Pública Financiada. Opción que entra dentro del esquema de los PIDIREGAS.

Cuando se habla de las implicaciones ambientales, es conveniente mencionar que todas las opciones de generación de energía eléctrica afectan o pueden afectar al medio ambiente, incluso aquellas que son de tipo renovables, sin embargo, este es un factor en donde las centrales nucleoelectricas tienen la principal ventaja en relación a las otras opciones de generación. La energía nucleoelectrica produce un impacto ambiental cuantificable y tangible, que a veces se magnifica emocionalmente, pero que la hace una de las opciones más sustentables ambientalmente, ya que al no quemar combustibles fósiles para generar energía eléctrica, no emite gases de efecto invernadero a la atmósfera.

En cuanto a los aspectos socioeconómicos podemos mencionar que con la construcción de una nueva unidad, no sólo se generarían miles de empleos sino que también habría una gran derrama económica en el Estado de Veracruz y una gran mejora en sus servicios de educación, de salud, en la construcción de obras públicas y en las comunicaciones.

De las secciones anteriores podemos concluir que en México es necesario diversificar las fuentes de energía primaria para la generación de energía eléctrica, no sólo por el cuidado del medio ambiente sino también para reducir la dependencia de ese sector en los hidrocarburos, fuente que se utiliza para producir alrededor del 60% de la energía eléctrica que genera la CFE y de la cual las reservas no solo nacionales sino también internacionales empiezan a decaer.

La tecnología nucleoelectrica surge de nuevo como una opción para satisfacer las necesidades y la creciente demanda de energía eléctrica en el país, y más aún con las nuevas tecnologías de reactores avanzados, que presentan una serie de ventajas y mejoras con respecto a sus antecesoras en cuestiones de seguridad y eficiencia, como es el caso del reactor propuesto en este trabajo, el ABWR.

Anexo A¹¹⁹.

COSTO UNITARIO DE GENERACIÓN

Tasa de descuento del 12%
(precios medios de 2004)

Central	Potencia bruta (MW)	Inversión		Combustible ^{1/}		Operación y Mantenimiento ^{2/}		Total		
		(\$/MWh)	Índice	(\$/MWh)	Índice	(\$/MWh)	Índice	(\$/MWh)	Índice	
Térmica convencional	2 x 350	203.78	100	387.93	100	60.11	100	651.82	100	
	2 x 180	281.99	138	403.31	104	91.06	151	776.36	119	
	2 x 84	330.98	162	452.65	117	119.08	198	902.71	138	
	2 x 37.5	397.11	195	488.57	126	163.25	272	1,048.93	161	
Turbogás aeroderivada gas	1 x 42.6	699.17	343	474.32	122	207.62	345	1,381.11	212	
Turbogás industrial gas	1 x 85	540.20	265	597.81	154	114.84	191	1,252.85	192	
Turbogás industrial gas "F"	1 x 185	429.89	211	533.03	137	72.20	120	1,035.12	159	
	1 x 253	406.81	200	500.18	129	53.65	89	960.64	147	
Turbogás aeroderivada diesel	1 x 41.4	645.68	317	551.81	142	227.17	378	1,424.66	219	
^{3/} Ciclo combinado gas	1 x 1 "F"	100.40	49	355.64	92	56.99	95	513.03	79	
	2 x 1 "F"	90.30	44	353.64	91	45.46	76	489.40	75	
	1 x 1 "G"	97.77	48	349.85	90	51.57	86	499.19	77	
	2 x 1 "G"	87.70	43	349.16	90	42.10	70	478.96	73	
^{4/} Diesel	2 x 18.7	356.14	175	303.41	78	172.44	287	831.99	128	
	3 x 13.5	367.78	180	307.14	79	184.81	307	859.73	132	
	3 x 3.4	429.78	211	338.87	87	229.47	382	998.12	153	
^{5/} Carboeléctrica	2 x 350	336.19	165	187.70	48	86.59	144	610.48	94	
^{6/} C. dual s/desulfurador	2 x 350	344.42	169	140.32	36	88.16	147	572.90	88	
^{6/} C. dual c/desulfurador	2 x 350	391.28	192	128.87	33	102.54	171	622.69	96	
^{8/7/} Nuclear (ABWR)	1 x 1 356	318.05	156	73.27	19	97.58	162	488.90	75	
^{8/} Geotermoelectrica	Cerro Prieto	4 x 26.95	225.80	111	214.80	55	77.89	129	518.29	80
	Los Azufres	4 x 26.60	229.62	113	209.21	54	73.28	122	512.11	79
Hidroeléctricas	Aguamilpa	3 x 320	1,116.33	548	9.07	2	29.26	49	1,154.66	177
	Agua Prieta	2 x 120	1,544.13	758	2.44	1	59.65	99	1,606.22	246
	La Amistad	2 x 33	557.98	274	20.81	5	95.89	160	674.68	104
	Bacurato	2 x 46	667.87	338	11.32	3	66.86	111	766.05	118
	Caracol	3 x 200	1,034.63	508	12.92	3	32.81	55	1,080.36	166
	Comedero	2 x 50	829.16	407	14.71	4	67.29	112	911.16	140
	Chicoasén	5 x 300	685.29	336	6.69	2	18.08	30	710.06	109
	Peñitas	4 x 105	727.39	357	35.83	9	26.00	43	789.22	121
	Zimapán	2 x 146	1,419.79	697	2.07	1	21.35	36	1,443.21	221

1/ El costo del combustible se deriva del escenario medio de evolución de los precios (28 de febrero de 2004).

2/ El costo de operación y mantenimiento incluye el correspondiente a el agua, excopto para las hidroeléctricas que se considera en el combustible.

3/ Número de turbinas de gas por cada turbina de vapor (1x1 ó 2x1) y modelo de turbina de gas (F ó G).

4/ Los motores de combustión interna son de dos tiempos.

5/ La central "Carboeléctrica" opera con carbón doméstico, las restantes con carbón importado.

6/ El costo unitario de inversión incluye un cargo por desmantelamiento de 0.9 pesos/MWh.

7/ El costo del combustible incluye un cargo por manejo de combustible irradiado de 10.75 pesos/MWh.

8/ El costo del combustible se refiere a la inversión, operación y mantenimiento del campo geotérmico.

¹¹⁹ Fuente: CFE, "Costos y Parámetros de referencia para la formulación de proyectos de inversión", México, 2004.

PARÁMETROS BÁSICOS DEL COSTO DE GENERACIÓN

Central	Potencia bruta (MW)	Eficiencia bruta ^{1/} (%)	Vida útil (años)	Factor de planta	Usos propios ^{1/} (%)
Térmica convencional	2 x 350	37.56	30	0.750	5.8
	2 x 160	36.31	30	0.650	6.2
	2 x 84	32.42	30	0.650	6.4
	2 x 37.5	30.63	30	0.650	8.3
^{2/} Turbogás aeroderivada gas	1 x 42.6	37.55	30	0.125	1.1
^{2/} Turbogás industrial gas	1 x 85	29.76	30	0.125	1.0
^{2/} Turbogás industrial gas "F"	1 x 185	33.31	30	0.125	0.8
	"G"	1 x 253	35.65	30	0.125
^{2/} Turbogás aeroderivada diesel	1 x 41.4	38.08	30	0.125	0.8
^{2/} Ciclo combinado gas	1 x 1 "F"	51.01	30	0.800	2.9
	2 x 1 "F"	51.23	30	0.800	2.8
	1 x 1 "G"	51.79	30	0.800	2.8
	2 x 1 "G"	51.82	30	0.800	2.7
^{3/} Diesel	2 x 18.7	47.61	25	0.650	5.1
	3 x 13.5	47.35	25	0.650	5.7
	3 x 3.4	43.53	25	0.650	7.1
Carboeléctrica	2 x 350	37.24	30	0.750	7.3
C. dual s/desulfurador	2 x 350	38.02	30	0.750	7.3
C. dual o/desulfurador	2 x 350	38.02	30	0.750	11.4
Nuclear (ABWR)	1 x 1 356	34.54	40	0.850	4.1
Geotermoeléctrica					
Cerro Prieto	4 x 26.95	19.02	30	0.850	7.3
Los Azufres	4 x 26.60	18.30	30	0.850	6.1
Hidroeléctricas					
Aguamilpa	3 x 320		50	0.253	0.5
Agua Prieta	2 x 120		50	0.209	0.5
La Amistad	2 x 33		50	0.286	0.5
Bacurato	2 x 46		50	0.331	0.5
Caracol	3 x 200		50	0.288	0.5
Comedero	2 x 50		50	0.312	0.5
Chicoasén	5 x 300		50	0.425	0.5
Peñitas	4 x 105		50	0.520	0.5
Zimapán	2 x 146		50	0.527	0.5

1_/ Ver referencia 8.

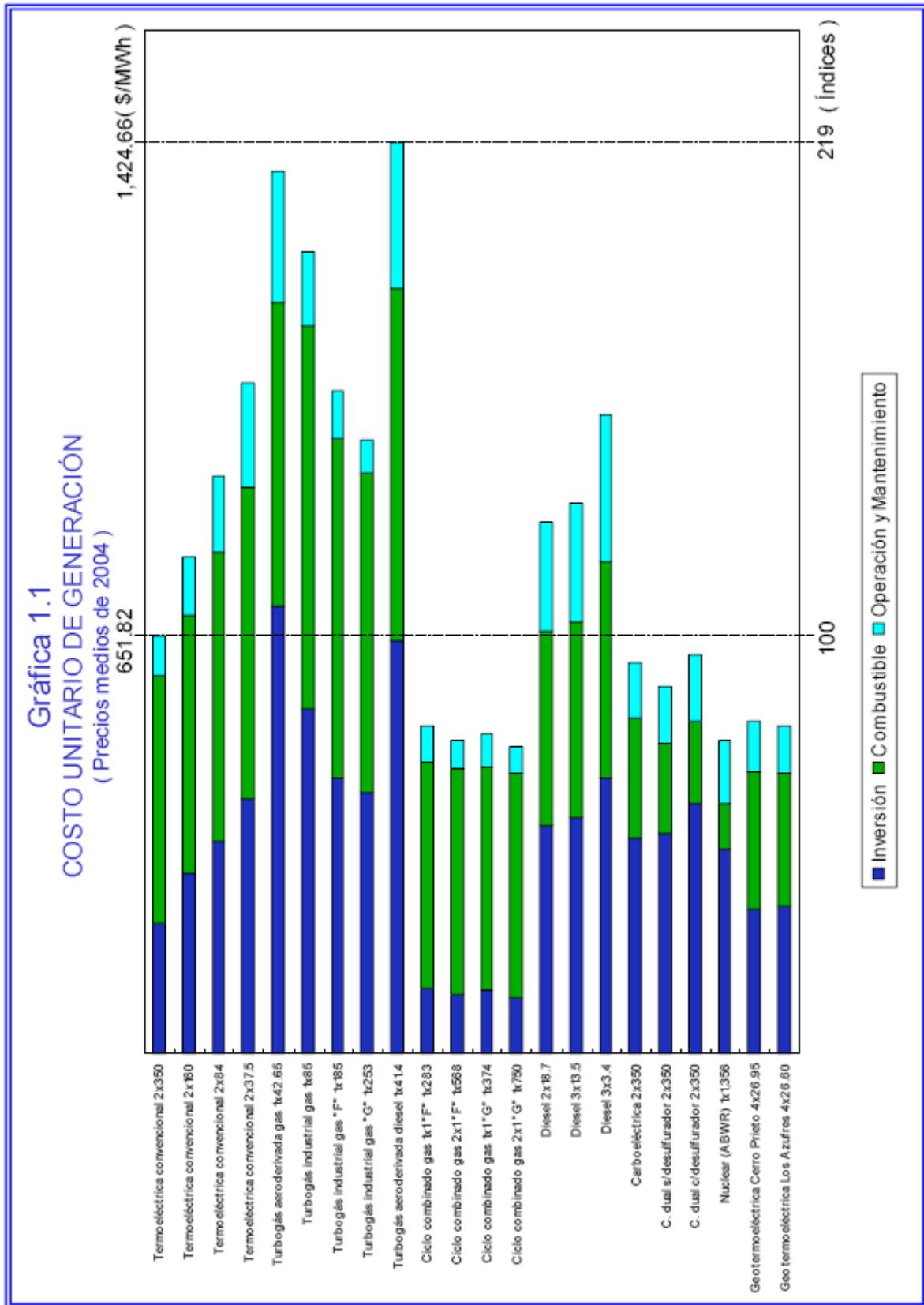
2_/ La potencia y eficiencia están determinadas bajo las siguientes condiciones ISO : Temperatura ambiente de 15 grados centígrados, humedad relativa = 60% y presión atmosférica al nivel del mar.

3_/ La potencia y eficiencia están determinadas bajo condiciones ISO 3046/I-1986: Temperatura ambiente de 25 grados centígrados, humedad relativa de 30% y presión barométrica de 1.0 bar.

**PARÁMETROS BÁSICOS DEL COSTO DE GENERACIÓN
PROGRAMA DE INVERSIÓN**

Central	Potencia bruta (MW)	Programa de inversión (%)								No. de meses	
		Años de construcción									
		-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2		-1
Térmica convencional	2 x 350						1.7	25.5	55.3	17.5	39
	2 x 160							16.1	63.9	20.0	36
	2 x 84							19.2	62.7	18.1	33
	2 x 37.5							8.6	59.4	32.0	30
Turbogás aeroderivada gas	1 x 42.6								100.0	10	
Turbogás industrial gas	1 x 85								100.0	10	
Turbogás industrial gas "F"	1 x 185								100.0	12	
"G"	1 x 253								100.0	12	
Turbogás aeroderivada diesel	1 x 41.4								100.0	10	
Ciclo combinado gas	1 x 1 "F"	1 x 283							73.8	26.2	24
	2 x 1 "F"	1 x 568							62.0	38.0	24
	1 x 1 "G"	1 x 374							73.8	26.2	24
	2 x 1 "G"	1 x 750							62.0	38.0	24
Diesel	2 x 18.7								44.6	55.4	21
	3 x 13.5								25.7	74.3	18
	3 x 3.4								100.0	12	
Carboeléctrica	2 x 350						1.5	42.1	43.2	13.3	42
	C. dual s/desulfurador	2 x 350					1.4	41.8	43.7	13.1	42
	C. dual c/desulfurador	2 x 350					1.0	42.9	46.3	9.8	42
Nuclear (ABWR)	1 x 1356					3.5	16.1	41.7	30.7	8.0	60
Geotermoeléctrica											
Cerro Prieto	4 x 26.95							2.5	60.0	37.6	28
Los Azufres	4 x 26.60							2.5	60.0	37.6	28
Hidroeléctricas											
Aguamilpa	3 x 320			9.3	22.1	23.5	25.3	13.5	6.3	72	
Agua Prieta	2 x 120			5.5	15.0	25.0	29.5	18.0	7.0	72	
La Amistad	2 x 33						20.0	45.0	25.0	10.0	48
Bacurato	2 x 46						20.0	45.0	25.0	10.0	48
Caracol	3 x 200			16.9	18.0	23.1	15.3	14.0	12.7	72	
Comedero	2 x 50					16.8	18.3	27.5	29.9	7.5	60
Chicoasén	5 x 300			11.4	18.7	14.7	21.3	24.9	9.0	72	
Peñitas	4 x 105			14.1	18.8	23.5	17.6	16.0	10.0	72	
Zimapán	2 x 146					10.2	15.4	27.2	38.4	8.8	60

1_/ se refiere exclusivamente a la central.



Anexo B¹²⁰.

CARACTERÍSTICAS Y PRECIOS DE LOS COMBUSTIBLES (precios medios de 2004)

Combustible	Unidad (U)	Poder calorífico superior (MJ/U)	Precios actuales ^{1/}				
			Doméstico		Externo de referencia		
			(\$/U)	(\$/MJ)	(\$/U)	(dól/U)	(\$/MJ)
Combustóleo nacional	barril	6,624.1	261.9	0.03953			
Combustóleo empresas eléctricas USA	barril	6,631.5			276.86	24.72	0.04175
Gas natural nacional	1000ft ³	1,062.2	54.0	0.05082			
Gas natural empresas eléctricas USA	1000ft ³	1,084.3			61.71	5.51	0.05891
Diesel nacional	barril	6,144.2	416.5	0.06779			
Diesel empresas eléctricas USA	barril	6,144.2			374.64	33.45	0.06098
Carbón nacional	ton métrica	19,173.0	366.6	0.01912			
Carbón importado empresas eléctricas USA (0.7% Azufre)	ton métrica	23,811.1			351.76	31.41	0.01477
Carbón importado empresas eléctricas USA (2.0% Azufre)	ton métrica	23,811.1			308.55	27.55	0.01298
Uranio enriquecido	g	4,017.6			26.54	2.37	0.00661
Vapor Cerro Prieto	ton	2,780.1	27.1	0.00974			
Vapor Los Azufres	ton	2,765.0	25.6	0.00925			

1_/ Para el caso del vapor es un costo nivelado, calculado con las inversiones en pozos durante la fase de construcción y en el transcurso de la operación, además de la operación y mantenimiento de pozos.

¹²⁰ Ídem.

**ESCENARIO MEDIO DE EVOLUCIÓN DEL PRECIO
EXTERNO DE REFERENCIA DE LOS COMBUSTIBLES 1_/.**

Tasa de descuento del 12%
(Dólares de 2004)

Año	Combustóleo (barril)	Gas (1000 ft ³)	Diesel (barril)	Carbón (tonelada métrica)			Uranio enriquecido (g)
				nacional	importado		
					0.7% Azufre	2% Azufre	
2004	24.72	5.51	33.45	32.73	31.41	27.55	2.37
2005	22.51	5.20	31.24	32.53	31.14	27.32	2.38
2006	21.78	4.79	30.69	32.30	30.91	27.12	2.38
2007	21.62	4.63	30.64	32.24	30.91	27.12	2.39
2008	21.65	4.53	30.74	31.98	30.45	26.70	2.39
2009	21.71	4.44	30.83	31.65	29.74	26.09	2.40
2010	21.79	4.41	30.95	31.10	29.26	25.66	2.41
2011	21.92	4.42	31.14	30.61	28.78	25.26	2.41
2012	22.08	4.46	31.36	30.27	28.55	25.05	2.42
2013	22.23	4.50	31.57	29.90	28.32	24.85	2.42
2014	22.38	4.53	31.77	29.66	28.07	24.62	2.43
2015	22.55	4.57	31.99	29.39	27.60	24.21	2.44
2016	22.71	4.59	32.21	29.19	27.60	24.21	2.44
2017	22.87	4.60	32.43	28.99	27.36	24.00	2.45
2018	23.04	4.61	32.65	28.80	27.13	23.80	2.45
2019	23.20	4.61	32.87	28.62	26.90	23.59	2.46
2020	23.36	4.62	33.08	28.44	26.65	23.37	2.47
2021	23.41	4.63	33.12	28.23	26.41	23.16	2.47
2022	23.44	4.63	33.15	28.05	26.17	22.96	2.48
2023	23.46	4.63	33.18	27.89	25.94	22.75	2.48
2024	23.48	4.64	33.21	27.73	25.71	22.56	2.49
2025	23.51	4.64	33.24	27.54	25.48	22.35	2.50
2026	23.54	4.64	33.29	27.38	25.48	22.35	2.50
2027	23.57	4.64	33.33	27.22	25.22	22.13	2.51
2028	23.60	4.65	33.37	27.05	24.98	21.92	2.52
2029	23.63	4.65	33.41	26.89	24.75	21.72	2.52
2030	23.66	4.66	33.46	26.73	24.75	21.72	2.53
2031	23.68	4.66	33.47	26.52	24.54	21.53	2.54
2032	23.69	4.66	33.48	26.32	24.33	21.34	2.54
2033	23.69	4.66	33.49	26.12	24.13	21.17	2.55
2_/ Nivelado	22.58	4.74	31.76	30.82	29.21	25.62	2.42

1_/ Los precios corresponden al escenario de combustibles del 25 de febrero de 2004, Gerencia de Estudios Económicos.

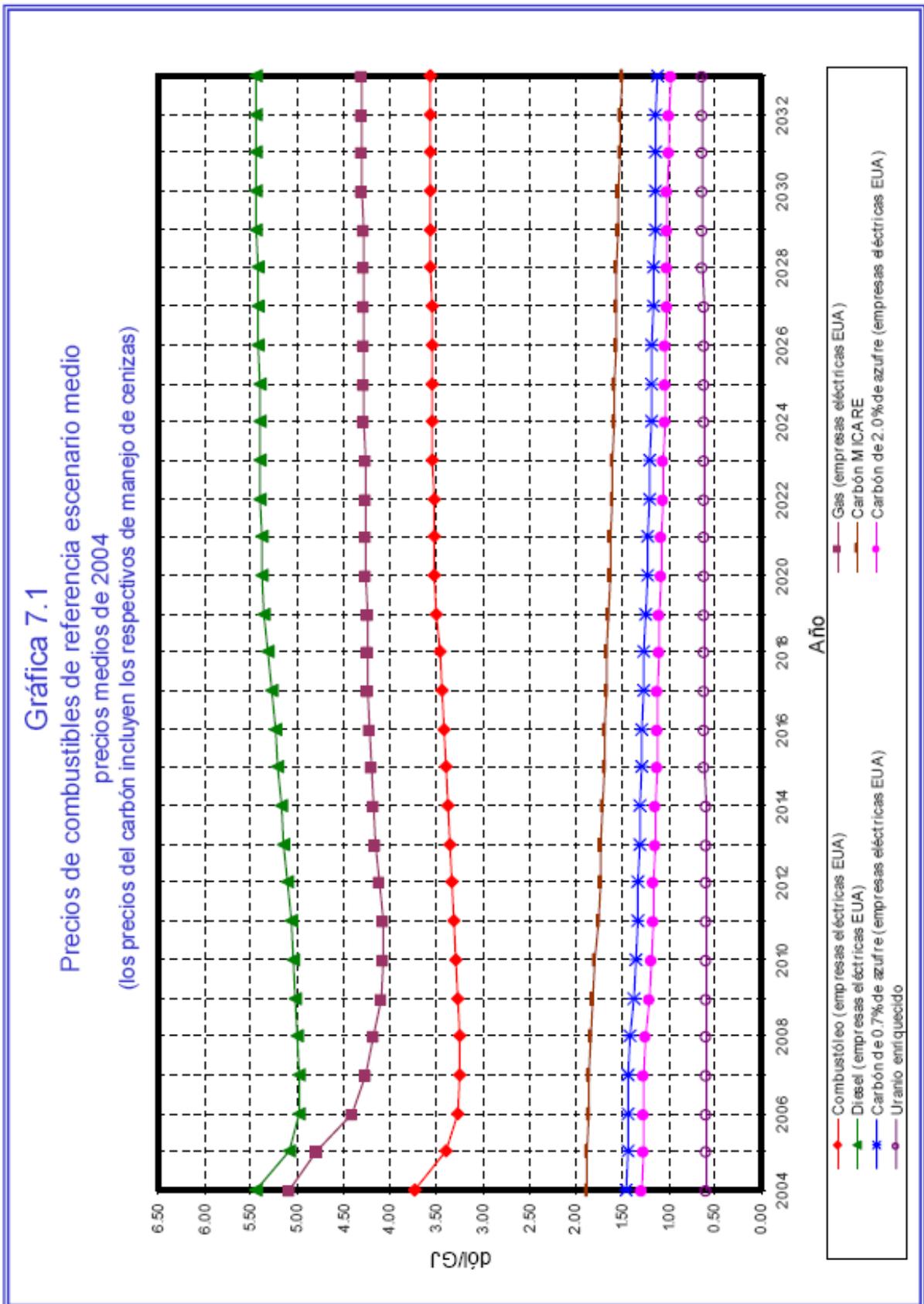
2_/ Nivelado a 30 años, excepto para la nuclear que es a 40 años.

**PRECIOS NIVELADOS DE LOS ESCENARIOS EXTERNOS
DE REFERENCIA DE LOS COMBUSTIBLES 1_/_.**

Tasa de descuento del 12%
(Dólares de 2004)

Periodo nivelado (años)	Combustóleo (barril)	Gas (1000 ft ³)	Diesel (barril)	Carbón (tonelada métrica)			Uranio enriquecido (g)
				nacional	importado		
					0.7% Azufre	2% Azufre	
<u>Escenario bajo</u>							
5	18.12	3.61	25.23	32.08	30.65	26.89	2.36
10	17.90	3.41	25.09	31.53	29.97	26.29	2.36
15	17.95	3.37	25.22	31.07	29.47	25.85	2.35
20	18.03	3.36	25.35	30.77	29.15	25.57	2.35
25	18.07	3.35	25.41	30.58	28.94	25.38	2.35
30	18.10	3.35	25.45	30.46	28.80	25.27	2.34
<u>Escenario medio</u>							
5	22.62	4.99	31.49	32.40	31.01	27.20	2.38
10	22.37	4.79	31.36	31.82	30.29	26.57	2.39
15	22.42	4.75	31.50	31.38	29.83	26.17	2.40
20	22.50	4.74	31.64	31.11	29.53	25.91	2.41
25	22.55	4.74	31.71	30.94	29.34	25.73	2.41
30	22.58	4.74	31.76	30.82	29.21	25.62	2.41
<u>Escenario alto</u>							
5	27.12	6.37	37.76	32.64	31.28	27.44	2.42
10	26.83	6.18	37.63	32.12	30.63	26.87	2.47
15	26.88	6.14	37.77	31.69	30.18	26.47	2.51
20	26.97	6.13	37.93	31.44	29.90	26.23	2.54
25	27.03	6.13	38.01	31.27	29.71	26.06	2.57
30	27.06	6.12	38.07	31.15	29.59	25.96	2.58

1_/_/ Los precios corresponden al escenario de combustibles del 25 de febrero de 2004, Gerencia de Estudios Económicos.



Referencias.

Bibliográficas

- Bolin, B., et al, *The Greenhouse Effect, Climatic Change and Ecosystem*, (s.f.).
- CFE, *Central Laguna Verde*, México, 1999.
- CFE, Central Laguna Verde, *Del fuego a la energía nuclear*, México 2002.
- CFE, *Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión en el Sector Eléctrico*, 2004.
- CFE, *Estudio de impactos socioeconómicos de la construcción y operación de una nueva Central Nucleoeléctrica*, México, 1994.
- CFE, *Factibilidad técnico-económica de la construcción y operación de nuevas unidades nucleoeléctricas*, México, 1995 y CFE, *Estudio de impactos socioeconómicos de la construcción y operación de una nueva Central Nucleoeléctrica*, México, 1994.
- Dickinson, R.E., *How Climate Change? The Climate System and Modelling of Future Climate*, Scope, No. 29, John Wiley & Sons, Chisester, 1989, p. 208.
- GRNS-GEN IV Meeting, Gen IV Economic Crosscut Group, Washington D.C., April 2002.
- IAEA 1992, “Water Reactor Fuel Extended Burnup Study”, Technical Report Series No. 343, IAEA, Vienna, 1992.
- Ibars 1998, Ibars E., Villalvazo I. y Villanueva C., “Evaluación del Costo Unitario Nivelado de Generación de la Central Laguna Verde 3, según el Modelo COPAR para el ABWR”, CFE, Subdirección de Programación, Reporte Interno G3210/98/28, Nov. 1998.
- Ibars, 1999, Ibars E. y Villanueva C., “Costo de Combustible de Recarga y Manejo de Combustible Irradiado de la Central Laguna Verde 3, según el Modelo de COPAR’98 para el ABWR”, X Congreso de la Sociedad Nuclear Mexicana, Acapulco, Gro., 1999.
- INEGI, Carta Topográfica Alto Lucero.
- International Energy Agency, *World Energy Outlook*, Francia, 2002.
- International Nuclear Societies Council, *Panorama de los próximos 50 años de la energía nuclear*, Chicago, 1992.
- Jacobson H., et al, *A Framework for Research on the Human Dimensions of Global Environmental Change*, (s.f.).

- Jaeger, J., Barry, E.G., *The Effects of Human Activity on the Climate of the Earth*, Cambridge University Press, 1990 P. 336.
- Ludevid Anglada, Manuel, *El cambio global en el medio ambiente*, Ed. Alfaomega, México, 1998.
- Ortega R. F., Martín del Campo C., François J. L., *Costos y Parámetros de plantas nucleoelectricas para el COPAR de generación 2004*, Informe Técnico No. UNAM/FI/DIE/N3-04. Facultad de Ingeniería – UNAM, Diciembre de 2004.
- Ortiz Magaña José Raúl, *Energía Nuclear: Mitos Y Realidades, Hoy*, 2º Congreso Academia de Ingeniería, Agosto de 2005.
- Paredes, L. C., Sánchez, S., *Proyección al 2035 de los desechos radioactivos de nivel bajo e intermedio en México*, CIC, Cancún, México, 2004.
- Raiswell, et al., *Química ambiental*, Ediciones Omega, Barcelona, 1983.
- Ramanathan, V., et al ii, *Trace Gas Trends and Their Potential Role in Climate Change*, Journal of Geophysical Research No.81, 1985.
- Redding, 2003, Redding J., Muench C. y Graber R, “*The Business Case for Building New Nuclear Power Plants in the US*”, Proceedings of ICAPP’03, Cordoba, Spain, May 4-7, 2003, paper 3188.
- Scully Capital, 2002, “*Business Case for New Nuclear Power Plants: Bringing Publica & Private Resorces Together for Nuclear Energy*”, Briefing for NEARC, Scully Capital, Nuclear Energy, October 1, 2002.
- Secretaría de Energía, Dirección General de Planeación Energética, *Prospectiva del Sector Eléctrico 2004-2013*, México 2004.

Electrónicas

- **BBC**

<http://www.bbc.co.uk>

- **Biblioteca virtual**

<http://www.bibliotecavirtual.com>

- **Chicago, 2004, “The Economic Future of Nuclear Power”, A study conducted at the University of Chicago, Agosto, 2004.**

http://www.anl.gov/Special_Reports/NuclEconSumAug04.pdf

- **CFE**

<http://www.cfe.gob.mx>

- **Enciclopedia Encarta 2004, Microsoft Corporation.**

- **Gobierno del Estado de Veracruz**

<http://www.veracruz.gob.mx>

- **NUC Berkeley**

<http://www.nuc.berkeley.edu/designs/abwr/abwr.html>

- **Organismo Internacional de Energía Atómica**

<http://www.oiea.org>

- **Secretaría de Energía**

<http://www.sener.gob.mx>

- **Toshiba Electric Corp**

<http://www.toshiba.co.jp/product/abwr/english/products/reactor/abwr01.htm>

- **World Nuclear Association**

<http://www.world-nuclear.org/info/reactors.htm>

- **World Association of Nuclear Operators**

<http://www.wano.org.uk>