

1. Generación de energía eléctrica nacional.

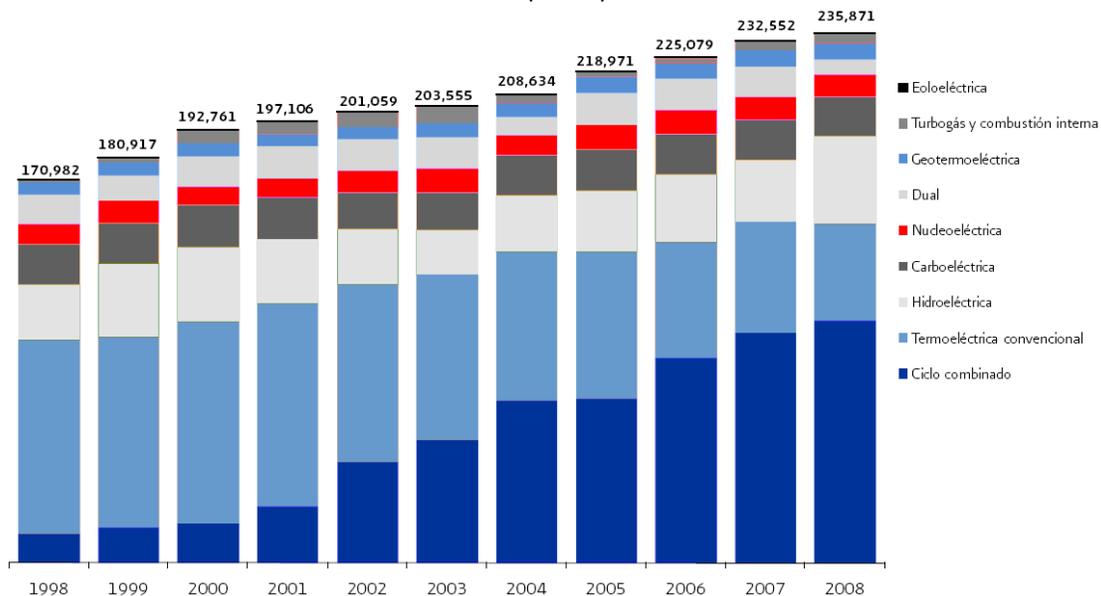
La generación de energía eléctrica nacional está integrada por dos categorías; la generación que es producida por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y la extinta Luz y Fuerza (LFC), y la generación por parte de los permisionarios que considera las modalidades de autoabastecimiento, cogeneración, productores independientes, usos propios continuos y exportación.

En 2008 la generación de energía eléctrica ascendió a 269,260 GWh,¹ de los cuales la CFE y la extinta LFC aportaron el 59.4%, los productores independientes de energía el 28.2%, autoabastecimiento el 4.7%, cogeneración 4.6%, exportación 2.8% y usos propios continuos el 0.4%.²

1.1 Generación de energía eléctrica para el servicio público.

La generación de energía eléctrica para el servicio público en 2008 ascendió a 235,871 GWh, es decir, registró un incremento de 1.4% respecto al 2007. La generación de electricidad en centrales hidroeléctricas fue la que presentó el mayor dinamismo, al incrementar su generación en 11,850 GWh, es decir, 43.8% más que en 2007, para alcanzar 38,892 GWh. (Véase gráfica 1).

Gráfica 1. Generación bruta en el servicio público por tipo de planta, 1998-2008. (GWh)



FUENTE: SENER. Prospectiva del sector eléctrico 2009-2024. 2009

1 Prospectiva del Sector Eléctrico 2009-2024, SENER 2009, México. Pág. 102.

2 Ídem.

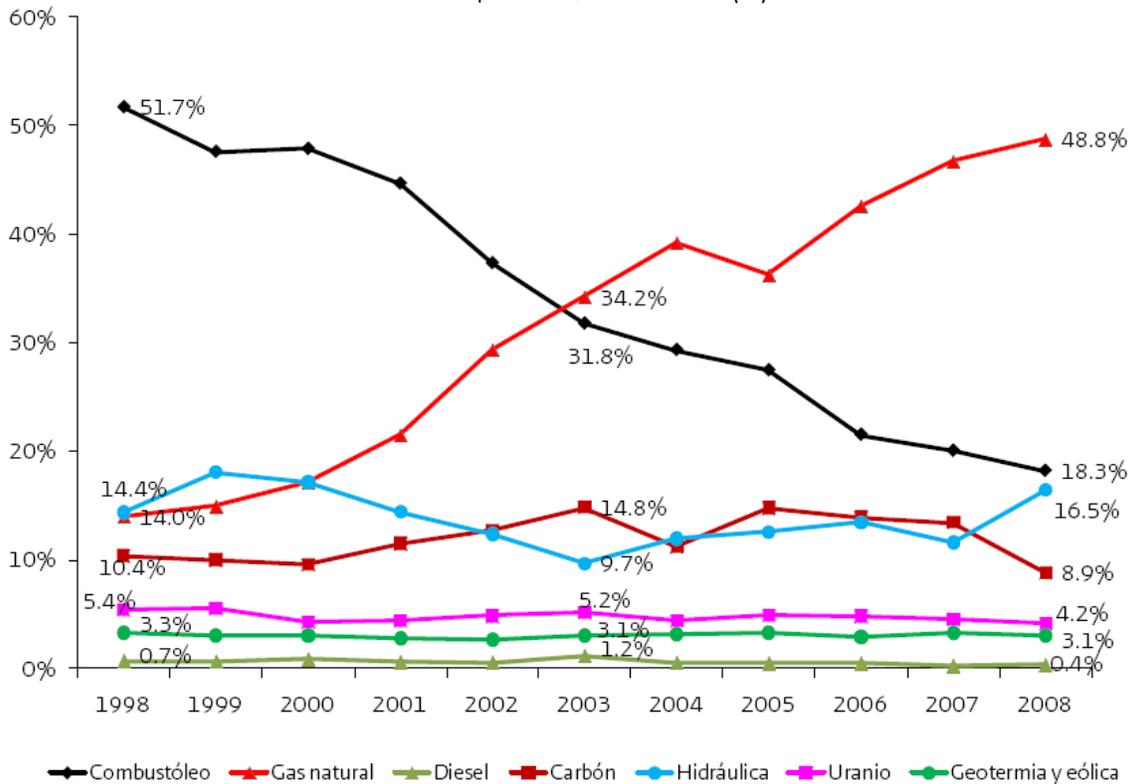
La generación eléctrica con base en hidrocarburos representa 65.8% de la generación eléctrica total. En 2008, la brecha entre la generación de las centrales de ciclo combinado (107,830 GWh) y la generación eléctrica de las centrales de combustóleo y/o gas (vapor), turbogas y combustión interna (47,362 GWh) continuó ampliándose. Cabe señalar que la participación de este tipo de centrales ha disminuido de 51.2% en 1998 a 20.1% en 2008 como resultado de un mayor despacho de centrales de ciclo combinado y el continuo retiro de unidades generadoras que utilizan combustóleo. En el caso de las centrales carboeléctricas y la central dual, su participación en la generación total se ubicó en 10.5% y la central nucleoeléctrica en 4.2%.

En lo que se refiere a las centrales basadas en fuentes renovables, a pesar del decremento de -4.7% en la electricidad generada por la geotermia, la generación renovable aumentó impulsada por las centrales hidroeléctricas y eólicas, con 43.8% y 2.5%. En total, la electricidad proveniente de fuentes renovable se ubicó en 46,202 GWh, lo que representa el 19.6% del total generado para servicio público en el país. La participación porcentual de cada fuente respecto al total es la siguiente: centrales hidroeléctricas 16.5%, centrales geotérmicas 3.0%, eólicas 0.1%.

Referente al consumo de combustibles para generación eléctrica, las centrales eléctricas utilizan diferentes combustibles: las centrales de vapor consumen combustóleo y/o gas natural; las centrales de ciclo combinado consumen gas natural; las centrales de turbogas consumen gas natural o diesel, las duales consumen carbón y combustóleo y las centrales de combustión interna en su mayoría consumen diesel.

Desde el punto de vista del tipo de combustible utilizado para la generación eléctrica, el consumo del gas natural se ha incrementando considerablemente. En 1998 la generación con base a gas natural representaba el 14%, 10 años después aumentó al 48.8% de la generación total. Mientras que la generación con base en el combustóleo en 1998 era del 51.7%, y para 2008 pasó a una participación del 18.3% (véase gráfica 2).

Gráfica 2. Participación por combustible y fuente primaria en la generación bruta del servicio público, 1998-2008. (%)



FUENTE: SENER. Prospectiva del sector eléctrico 2009-2024. 2009.

A partir del 2000, con la entrada en operación del primer productor independiente de energía, se marcó la tendencia al mayor consumo de gas natural por parte del sector eléctrico y al menor consumo de combustóleo para generar electricidad. Esto se debió a que el gas natural, respecto al resto de los combustibles utilizados para la generación de energía eléctrica, es el más “limpio”, presenta una eficiencia térmica elevada y es más atractivo por sus costos de inversión y plazos de construcción cortos, los cuales dependen de la existencia de equipos y de los precios del gas natural.

El uso del gas natural en franca mayoría en nuestro país, se debe a la política empleada con respecto a la repotenciación de algunas termoeléctricas las cuales se convierten en ciclos combinados con el afán de “dar mayor vida” a la planta generadora en cuestión.

1.2 Combustibles de origen fósil para la generación de energía eléctrica.

Las combustibles de origen fósil son:

1.2.1 Carbón.

El carbón es una roca de fácil combustión que contiene más del 50% de su peso, y más de 70% de su volumen, de material carbonoso, incluyendo la humedad inherente, formada por compactación y endurecimiento de restos de plantas diversamente alteradas.

El carbón de origen nacional se utiliza en su totalidad en la Centrales Río Escondido de 1200 MW y Carbón II de 1400 MW. La Central Dual Petacalco tiene posibilidad de utilizar ya sea combustóleo y/o carbón.

Actualmente se emplea carbón importado. Esto es debido a que México no posee yacimientos carboníferos con costos de extracción competitivos. Así que se acude a la importación.

1.2.2 Combustóleo y Diesel.

El combustóleo (combustible residual de petróleo) se emplea en unidades generadoras de carga base, localizadas principalmente cerca de los puertos o en la proximidad de las refinerías:

Entre las principales se encuentran Tuxpan con 2100 MW y Manzanillo con 1900 MW. La capacidad instalada a base de combustóleo ha ido disminuyendo considerablemente, en 1998 era del 51.7%, y para 2008 pasó a una participación del 18.3%.

El Diesel se emplea en unidades que operan durante las horas de demanda máxima, para abastecer zonas aisladas y por restricciones de disponibilidad de gas. Toda la producción nacional de combustóleo se usa para la producción de energía, es la más cara y tiene problemas ecológicos, el incremento en el precio del petróleo, ha causado que el quemar diesel y combustóleo para la generación eléctrica sea poco competitivo e inteligente frente a otras fuentes de energía. Es por eso que actualmente los nuevos proyectos en el sector eléctrico están encaminados en un gran porcentaje al uso de gas natural en plantas de ciclo combinado, mientras que en países de la unión europea se está recurriendo a fuentes de energía como la nuclear y las energías renovables como la eólica, y solar principalmente.

1.2.3 Gas Natural.

El gas natural es un energético de importancia creciente en el mundo debido a que, la energía eléctrica generada con gas natural a través de la tecnología de ciclo combinado es una de las más baratas, sin olvidar que el gas natural se quema de forma más limpia y produce menor contaminación que otros hidrocarburos.

El gas natural ha cobrado especial importancia en los ciclos combinados recientes. Adicionalmente por restricciones ecológicas, se ha incrementado su uso en centrales termoeléctricas convencionales ubicadas en las grandes ciudades como el D.F. y Monterrey. A fin de hacer competitivo el equipo existente respecto a nuevas tecnologías, se han convertido centrales termogas a ciclos combinados. Hubo programas de repotenciación de centrales como Manzanillo, Tula, Valle de México, por mencionar algunas.

En México existen fuentes adicionales de gas natural aún sin explotar, las cuales requieren de estudios y proyectos a largo plazo. Los depósitos de gas extranjeros se contratan a precios competitivos, pero siempre a merced de los productores extranjeros y al orden de la oferta y la demanda.

1.3 Energías Renovables en México. El Estado Actual y el Potencial.

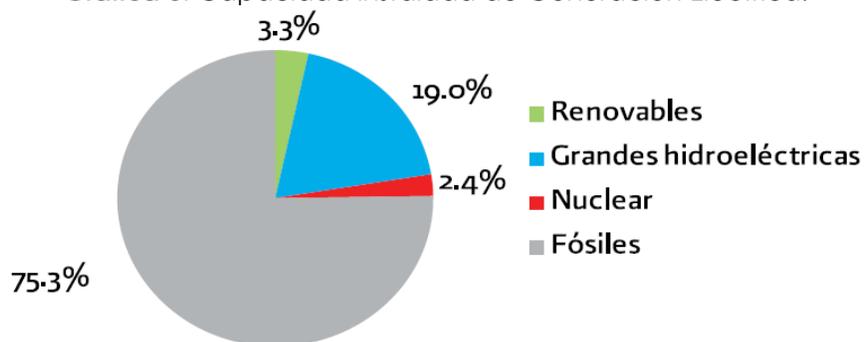
La energía en cualquiera de sus formas no puede crearse ni destruirse; sólo se puede cambiar de una forma a otra (primera ley de la Termodinámica). Aunque la energía no se pierde, sí se degrada en un proceso irreversible (segunda ley de la Termodinámica). Por ello, en rigor la energía no puede considerarse renovable. Lo que puede renovarse es su fuente, por ejemplo el viento, o una caída de agua. Sin embargo, el uso del lenguaje ha llevado a las fuentes renovables de energía a denominarse simplemente energías renovables. En el presente documento se utiliza el término energías renovables en esta acepción común.

Las energías renovables son aquellas cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por la humanidad, y que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua. Las fuentes renovables de energía perdurarán por miles de años. Las energías renovables se pueden clasificar de distintas formas: por su origen primario de la energía, por el nivel de desarrollo de las tecnologías, y por las aplicaciones de las energías.

De acuerdo con la Prospectiva del Sector Eléctrico, la tendencia decreciente en la participación relativa de las energías renovables en la matriz energética del servicio público nacional continuará durante los próximos años. Sin embargo, si se toman en cuenta los proyectos de autoabastecimiento y cogeneración, la participación de las energías renovables aumentará en los próximos años, lo que permitiría alcanzar el 26%³ de participación en la capacidad instalada.

Actualmente, México cuenta con alrededor de 1,924.8 MW⁴ de capacidad instalada de generación eléctrica con base en energías renovables, que incluye la capacidad destinada al servicio público, cogeneración y autoabastecimiento, representando el 3.3%⁵ de la capacidad instalada en el servicio público del país.

Gráfica 3. Capacidad instalada de Generación Eléctrica.



FUENTE: SENER. Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables. 2009.

En México, los hidrocarburos (Incluyendo petróleo crudo y condensados, gas natural asociado y gas natural no asociado) mantienen la mayor participación en la oferta interna bruta de energía primaria, mientras que la contribución de las Energías renovables es marginal, empleándose principalmente para calefacción y para la generación de electricidad.⁶

Sin embargo, han acontecido incrementos importantes, impulsados por la SENER conjuntamente con CFE, en materia de hidroelectricidad, eoloelectricidad y geotermia.

En la siguiente tabla se muestra la capacidad instalada total, a partir de fuentes renovables, por tipo de tecnología utilizada:

3 Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México. SENER 2009. México. Pág. 16.

4 Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables. SENER 2009. México. Pág.18.

5 Ídem.

6 www.cfe.gob.mx, CFE 2005, México.

Tabla 1. Capacidad y Generación Eléctrica en México por Tipo de Energía (2008).**

Tecnología	Desarrollador	Capacidad		Generación	
		Anual (MW)	%Total	Anual (GWh)	%Total
Eoloeléctrica	CFE	85.250	0.15	231.505	0.09
Eoloeléctrica	Permisarios	0	0	0	0
Total Eoloeléctrica		82.250	0.15	231.505	0.09
Pequeña hidroeléctrica	CFE	270.128	0.46	1309.525	0.53
Pequeña hidroeléctrica	LFC	23.330	0.04	52.988	0.02
Pequeña hidroeléctrica*	Permisarios	83.492	0.14	228.053	0.09
Total Hidroeléctrica		376.950	0.65	1590.566	0.64
Geotermoeléctrica	CFE	964.500	1.66	7057.768	2.86
Biomasa y biogás*	Permisarios	498.116	0.86	819.345	0.33
Total		1924.816	3.31	9699.184	3.93
Total servicio público y permisarios	58105.537	100%	246785	100%	
<i>Participación Renovables</i>			3.31%		3.93%

* Incluyen proyectos Híbridos.

**Proyectos en operación al cierre del 2008.

FUENTE: SENER. Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables. 2009.

A continuación se describirá de manera somera las características principales de las distintas tecnologías para el aprovechamiento de las energías renovables, su situación actual y su potencial en México.

1.3.1 Energía Eólica.

Tecnología

Las turbinas eólicas transforman la energía cinética del viento en energía mecánica, ya sea para mover directamente una máquina tal como una bomba de agua, o bien para impulsar un generador eléctrico. Existen turbinas de muchos tamaños, desde unos 500 W, hasta más de 7 MW. Las de mayor tamaño están destinadas principalmente a granjas eólicas marinas. En el transcurso de las últimas dos décadas la tecnología de las turbinas eólicas ha avanzado radicalmente y sus costos se han reducido hasta hacerse competitivos con las tecnologías convencionales en contextos geográficos favorables.

Costos

El costo de las turbinas eólicas es de aproximadamente US\$1,700 por kW. El costo de la electricidad generada depende de la velocidad del viento y de su distribución a lo largo del año. En condiciones óptimas, con costos de alrededor de 5 centavos de dólar por kWh, esta tecnología resulta competitiva con muchas de las tecnologías convencionales de generación de electricidad.⁷

⁷ Banco Mundial Cit. en Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México. SENER 2009. México. Pág. 18.

Estado Actual

La energía eólica se ha desarrollado a pasos acelerados en el Mundo durante los últimos años. En el año 2008, la capacidad instalada mundial llegó a los 120,800 MW. Tan sólo en el año 2008, se instalaron más de 27,000 MW de nueva capacidad eólica.⁸ En México existen en la actualidad 170 MW de capacidad eólica en operación,⁹ que se dividen en:

- 85 MW en los proyectos La Venta I y La Venta II operados por la CFE en el Istmo de Tehuantepec.
- 80 MW en el proyecto de autoabastecimiento Parques Ecológicos de México, que entró gradualmente en operación desde enero del 2009.
- 0.6 MW en una turbina de la CFE en Guerrero Negro, Baja California Sur.
- 2 MW en pequeños aerogeneradores en sitios aislados de la red.
- 3 MW en pequeñas aerobombas (turbinas eólicas que impulsan bombas hidráulicas).

Figura 1. Central Eólica de La Venta II.



FUENTE: SENER. Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México 2009.

8 Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México. SENER 2009. México. Pág. 18.

9 Balance Nacional de Energía 2007 y Reforma, 2009 Cit. en Ídem.

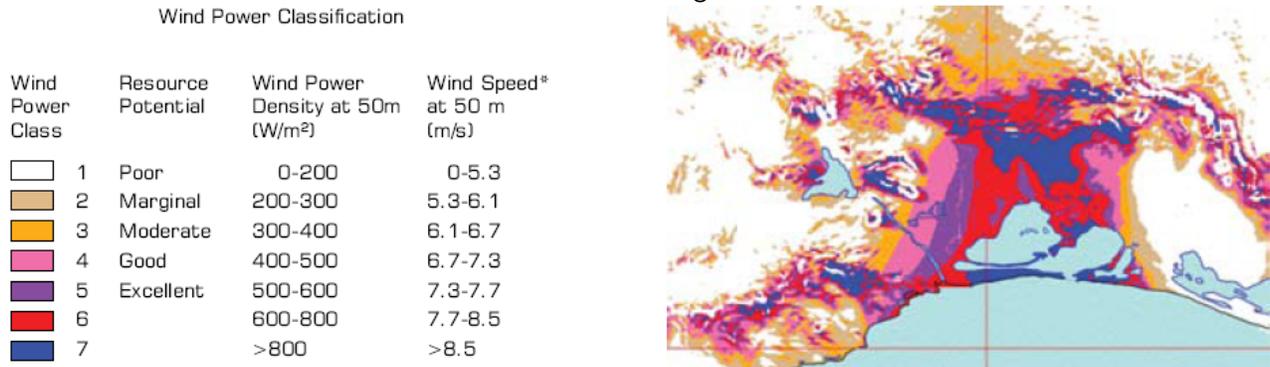
Potencial

Los estudios del *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) y diversas instituciones mexicanas como la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES), la Asociación Mexicana de Energía Eólica (AMDEE), el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) han cuantificado un potencial superior a los 40,000 MW¹⁰, siendo las regiones con mayor potencial, el Istmo de Tehuantepec y las penínsulas de Yucatán y Baja California.

Las condiciones eólicas en el Istmo de Tehuantepec son de las mejores a nivel mundial. En Oaxaca hay zonas con velocidades del viento medidas a 50 m de altura superiores a 8.5 m/s, con un potencial de 6,250 MW, y otras con velocidades entre 7.7 y 8.5 m/s, con un potencial de 8,800 MW.

En Baja California, las mejores zonas están en las sierras de La Rumorosa y San Pedro Mártir (274 MW). Yucatán (352 MW) y la Riviera Maya (157 MW) tienen suficiente potencial para sustituir plantas que operan con combustóleo, diesel y generadoras de turbogas.

Gráfica 4. Potencial de la Energía Eólica en Oaxaca.



*Wind speeds are based on a Weibull k value of 1.8

FUENTE: Wind Energy Resource Atlas of Oaxaca, (NREL), 2003.

Figura 2. Campo Eoloeléctrico La Venta.



FUENTE: www.cfe.gob.mx.

Proyectos en desarrollo

En el 2005 la CFE inició la construcción en la Venta, Oaxaca, de la primera planta eólica de gran escala en México (83 MW) que entró en operación en Octubre de 2006. Adicionalmente, la SENER tiene programada la construcción de otros 505 MW de capacidad eólica (en la modalidad de productor independiente) en la misma región en los próximos años, con lo que se espera tener instalados 588 MW en 2014.

¹⁰ Wind Energy Resource Atlas of Oaxaca, National Renewable Energy Laboratory (NREL) 2003, Estados Unidos de América.

Existen siete permisos otorgados por la Comisión Reguladora de Energía (CRE) para proyectos privados de autoabastecimiento con tecnología eólica que aportarán en los próximos años un total de poco más de 950 MW¹¹ al Sistema Eléctrico Nacional.

Tabla 2. Proyectos Eólicos de la Cartera del Sector Energía.

Centrales Eólicas	Capacidad [MW]	Generación GWh/año
La Venta II	83	325
La Venta III	101	363
La Venta IV	101	363
La Venta V	101	350
La Venta VI	101	350
La Venta VII	101	350
Total	588	2,101

FUENTE: Prospectivas del Sector Eléctrico 2005-2014, SENER 2005.

Las posibilidades de desarrollo de la energía eólica en el corto y en el mediano plazo en México dependen no sólo del potencial físico del recurso, sino también de la capacidad industrial y de la capacidad del sistema eléctrico para absorber la electricidad generada sin poner en riesgo la seguridad y la estabilidad del sistema. La factibilidad económica de estos proyectos dependerá de los mecanismos regulatorios y del acceso a los instrumentos internacionales relacionados con la mitigación del cambio climático.

Existe también potencial técnico y económico para el desarrollo de sistemas eólicos en aplicaciones fuera de la red eléctrica, tales como la generación de electricidad y el bombeo de agua por medio de aerobombas.

1.3.2 Energía Solar.

Tecnología

Existen dos tecnologías para la generación de electricidad a partir de radiación solar: la fotovoltaica y la de concentración solar. Otras tecnologías, tales como la tecnología de torre de aire (energy tower), que aprovecha de manera indirecta la radiación solar, están en una etapa conceptual de desarrollo.

Las celdas fotovoltaicas transforman directamente la radiación solar en electricidad, por medio de un fenómeno físico denominado efecto fotovoltaico. Las celdas fotovoltaicas se pueden utilizar en conexión con la red eléctrica, o bien en sitios aislados, por medio de sistemas que incluyen baterías.

¹¹ Prospectivas del Sector Eléctrico 2005-2014, SENER 2005.

Figura 3. Celdas Fotovoltaicas.



FUENTE: www.wikipedia.com.es

En las centrales de concentración solar, la radiación solar calienta un fluido, que a su vez mueve una máquina térmica y un generador eléctrico. El calentamiento del fluido se hace por lo general por medio de dispositivos ópticos que concentran la radiación solar, logrando altas temperaturas, del mismo modo en que con una lupa se puede quemar un pedazo de papel. Una de las versiones de esta tecnología consiste en espejos parabólicos que concentran la radiación solar en un tubo en el cual circula un fluido (véase la figura 4), mientras que en la otra versión un conjunto de espejos concentran la radiación en una torre denominada torre solar.

Las centrales de concentración solar tienen la ventaja adicional de que pueden permitir, mediante inversiones adicionales, almacenar la energía en forma de calor, de manera que es posible generar electricidad aún cuando no hay radiación solar. Ambas tecnologías, la fotovoltaica y la de concentración solar, se han desarrollado aceleradamente en los últimos años, alcanzando eficiencias de más de 15%.

Figura 4. Central solar de canal parabólico Kramer Junction, California.



FUENTE: SENER. Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México 2009.

Costos

Entre las distintas tecnologías para la generación de electricidad a partir de la radiación solar, las centrales de concentración solar tienen los menores costos de inversión, con aproximadamente US\$2,200/kW.¹² Los sistemas fotovoltaicos en conexión con la red cuestan US\$8,000/kW, y los sistemas fuera de red el doble.¹³ Los costos de la electricidad generada son todavía demasiado altos para poder ser competitivos con otras tecnologías: entre 12 y 18 US¢/kWh para centrales de concentración solar, entre 0.26US¢/kWh (Mx\$2.85) y 0.36 US¢/kWh (Mx\$3.94) para sistemas fotovoltaicos en conexión a la red eléctrica en México, suponiendo un costo de inversión de US\$7,490.90/kW (Mx\$82,400) y entre 40 y 60 US¢/kWh para sistemas rurales fotovoltaicos. Se espera, sin embargo, que estos costos disminuyan significativamente en el transcurso de los próximos lustros.

Estado Actual

De 1993 a 2003, la capacidad instalada de sistemas fotovoltaicos se incrementó de 7 a 15 MW, generando más de 8,000 MWh/año para electrificación rural, bombeo de agua y refrigeración. Para sistemas termosolares, al 2003 se tenían instalados más de 570 mil metros cuadrados de calentadores solares planos, con una radiación promedio de 18,841 kJ/m² y día, generando más de 270 GJ para calentar agua.¹⁴

En México, prácticamente todos los sistemas fotovoltaicos se encuentran en comunidades rurales aisladas de la red eléctrica, y muchos de ellos fueron instalados por medio de programas gubernamentales de electrificación rural. Se estima que la capacidad total de estas instalaciones es de 18.5 MW y que generan en promedio 0.032 TJ/año.¹⁵

Gracias a nuevas regulaciones que hacen posibles las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red eléctrica, ya existen en México algunos proyectos de este tipo, y hay interés de diversos actores por desarrollar más proyectos, en particular en Baja California. Sin embargo, la viabilidad económica depende fuertemente de los costos de inversión y la tarifa contra la cual el sistema compete.¹⁶

Por lo que se refiere a la tecnología de concentración solar, existen planes para la construcción de una instalación de este tipo en Agua Prieta, Sonora. Dicha instalación funcionaría en combinación con una central de ciclo combinado de gas natural.

12 Proyecciones para el año 2010 propuestas por el Banco Mundial, 2006. Cit. en Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México. SENER 2009. México. Pág. 22.

13 Banco Mundial, 2008. Cit. en ídem.

14 Balance Nacional de Energía, www.anes.org, ANES 2005, México.

15 Balance Nacional de Energía 2007 Cit. En Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México. SENER 2009. México. Pág. 23.

16 CONUEE/ GTZ, 2009 Cit. En ídem.

Potencial

La irradiación solar global en México es en promedio de 5 kWh/día/m², pero en algunas regiones del país se llega a valores de 6 kWh/día/m².¹⁷ Suponiendo una eficiencia del 15%, bastaría un cuadrado de 25 km de lado en el desierto de Sonora o Chihuahua para generar toda la energía eléctrica que requiere hoy en día el país. Por ello, el potencial técnico se puede considerar prácticamente infinito.

El potencial económico y financiero, sin embargo, se limita a nichos específicos debido a los altos costos de las tecnologías. Para comunidades aisladas de la red eléctrica, el alto costo de extensión de la red implica que la tecnología fotovoltaica sea en la mayoría de los casos la más económica para satisfacer aplicaciones energéticas de alto valor y poco consumo de energía, tales como iluminación y aparatos electrónicos.

Por lo que se refiere a la generación de electricidad en conexión con la red eléctrica, existen nichos de mercado financieramente viables para consumidores residenciales de electricidad de una capacidad de al menos 700 MW.¹⁸

Figura 5. Planta híbrida San Juanico.



FUENTE: www.cfe.gob.mx.

La CFE cuenta con una planta híbrida en San Juanico, Baja California Sur, conformada por 17 kW fotovoltaicos, 100 kW eólicos y motogenerador diesel de 80 kW.

Proyecto de concentración solar Agua Prieta II: El proyecto de concentración solar Agua Prieta II contribuirá a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, mediante la instalación de un sistema solar integrado de ciclo combinado (ISCCS) con tecnología de canales parabólicos solares. La capacidad neta del campo solar es de 10 MWT, estando el campo solar al 100% de carga integrado al ciclo combinado. El proyecto, conocido como Agua Prieta II, está planeado para ubicarse en el Estado de Sonora y contará con un donativo del Fondo para el Medio Ambiente Mundial, a través del Banco Mundial, por 49.35 millones de dólares.

¹⁷ Mulás et al., 2005. Cit. En Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México. SENER 2009. México. Pág. 25.

¹⁸ CONUEE/ GTZ, 2009 Cit. En ídem. Pág. 26.

1.3.3 Energía Hidráulica.

Tecnología

La tecnología más usada en la actualidad para aprovechar la energía del movimiento del agua es la turbina hidráulica. Existen distintos tipos de turbinas; dependiendo de las características de cada sitio (por ejemplo, sitios con gran caída y bajo caudal, o de baja caída y gran caudal), se selecciona el tipo más adecuado. Las turbinas hidráulicas se utilizan por lo general para la generación de electricidad, aunque también pueden impulsar directamente maquinaria industrial. Además de las turbinas, existen otras tecnologías como las ruedas hidráulicas y las bombas de ariete, utilizadas para aplicaciones de pequeña escala tales como el bombeo de agua.

Las centrales hidroeléctricas constan, por lo general, de una presa que permite almacenar el agua de una estación a otra. Sin embargo, existen también pequeñas centrales hidroeléctricas sin presa, denominadas “al hilo del agua”, que aprovechan en cada momento el caudal disponible. Las grandes presas generan beneficios indudables para los sistemas eléctricos, además de otros beneficios como el riego y el control de inundaciones. Sin embargo, también producen diversos impactos ambientales y sociales.

Figura 6. Pequeña central hidroeléctrica de Las Trojes (8 MW).



FUENTE: SENER. Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México 2009.

Costos

Las centrales hidroeléctricas tienen costos relativamente bajos y compiten favorablemente con las tecnologías de energías no renovables. Aunque los costos de inversión varían mucho de un sitio a otro, un valor promedio es US\$2,100/kW,¹⁹ mientras que el costo de la electricidad generada es típicamente de entre 3 y 4 US¢/kWh.²⁰

¹⁹ Banco Mundial, 2006. Cit. En Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México. SENER 2009. México. Pág. 30.

²⁰ REN21, 2008 Cit. En ídem.

Estado Actual

En México la capacidad hidroeléctrica instalada es de 11.4 GW, de los cuales aproximadamente 300 MW corresponden a pequeñas centrales de las empresas públicas, y 90 MW a centrales privadas de autoabastecimiento. La generación es de 27,300 GWh/año.²¹ La Prospectiva del Sector Eléctrico contempla la construcción de nuevas centrales hidroeléctricas con una capacidad de 1,224 MW en el transcurso de los próximos 10 años.

Potencial

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) ha identificado el potencial hidroeléctrico del país en aquellos sitios con una potencia media mayor de 5 MW. Excluyendo las centrales en operación y en planeación, el potencial identificado es de 39 GW.²² Este potencial es meramente indicativo, pues falta definir la factibilidad técnica, económica, ambiental y social para muchos de estos proyectos. Se puede suponer sin embargo que por lo menos el 25% de este potencial sea factible.

Existe además un potencial importante en centrales de menor tamaño, pero, con la excepción de un estudio realizado en una región de los estados de Puebla y Veracruz,²³ este potencial no se ha evaluado. De manera muy preliminar se ha estimado que el potencial nacional para pequeñas hidroeléctricas es de alrededor de 3 GW.²⁴ Al igual que para el caso de la energía eólica, en la medida en que se reconozcan los distintos beneficios de las pequeñas centrales hidroeléctricas, incluyendo su impacto en la mitigación del cambio climático, este potencial será económica y financieramente factible. Existe también un potencial no identificado para la construcción de micro-centrales hidroeléctricas para abastecer de electricidad a comunidades aisladas de la red eléctrica, así como para satisfacer otros servicios energéticos como el bombeo de agua por bombas de ariete.

Figura 7. Chilatán.



FUENTE: www.comexhidro.com

Proyectos en Operación y en Desarrollo

Comexhidro es una empresa dedicada al aprovechamiento energético de presas de riego agrícola ya existentes. Inauguró en el 2003 su primer proyecto, "Las Trojes", en el estado de Colima, una hidroeléctrica de 8 MW de capacidad. En el 2005 entró en operación la hidroeléctrica "Chilatán", ubicada en el estado de Michoacán, con una capacidad de 14 MW. La empresa cuenta con el primer proyecto en ER en América Latina que obtiene los incentivos adicionales provenientes de los bonos de carbono. Además está aprovechando la nueva regulación sobre interconexiones para fuentes intermitentes.

21 Prospectiva del Sector Eléctrico 2008-2017. Cit. En Ídem.

22 REN21, 2009 Cit. En Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México. SENER 2009. México. Pág. 31.

23 CONAE, 1995. Cit. En ídem.

24 Mulás et al., 2005. Cit. En ídem.

1.3.4 Bioenergía.

Tecnología

Utiliza materia orgánica como energético, por combustión directa o mediante su conversión en combustibles gaseosos como el biogás o líquidos como bioetanol o biodiesel. La bioenergía en sus distintas formas se puede aprovechar en aplicaciones térmicas, para la generación de electricidad o para la producción de biocombustibles líquidos para transporte.

La biomasa se utiliza además en varias aplicaciones industriales: la energía contenida en productos de biomasa o derivados de la biomasa tales como el bagazo de caña, el licor negro, el biogás y distintos residuos agrícolas y agroindustriales son utilizados en industrias por medio de calderas y otras tecnologías para la producción de calor y, en algunos casos, electricidad.

Finalmente, la biomasa se utiliza para producir biocombustibles en varios países encabezados por Brasil, Estados Unidos y Alemania. Los principales biocombustibles son el bioetanol (alcohol etílico) y el biodiesel. Ambos se pueden mezclar en proporciones pequeñas (de menos del 10%) con gasolina y diesel, respectivamente, sin necesidad de hacer adaptaciones en los motores de vehículos modernos. El bioetanol se puede producir a partir de cultivos de azúcar (como la caña, la remolacha y el sorgo dulce), cultivos feculentos (como el maíz y la yuca) y materiales celulósicos. El biodiesel, por su parte, se elabora a partir de diferentes especies oleaginosas.

Costos

Las tecnologías para la generación de electricidad y/o calor a escala industrial a partir de la biomasa tienen un costo aproximado de US\$1,500/kW. Los costos correspondientes de la energía son de entre 5 y 12 US¢/kWh para la electricidad, y de entre 1 y 5 US¢/kWh para el calor.²⁵ Finalmente, las plantas de producción de bioetanol y de biodiesel requieren respectivamente de inversiones de US\$390 y \$330 por cada m³ al año de capacidad. Los costos de producción varían mucho de acuerdo con las circunstancias locales, pero las referencias internacionales sugieren valores de entre 25 y 30 US¢/litro para el bioetanol, y de entre 40 y 80 US¢/litro para el biodiesel.²⁶

Estado Actual

En México el bagazo de caña es, después de la leña, la principal fuente de bioenergía, que se utiliza en ingenios azucareros para la producción de calor y de electricidad para consumo del propio ingenio. Se estima que se aprovechan 100 PJ de bagazo al año, equivalentes al 1.2% de la oferta interna bruta de energía.²⁷

25 Banco Mundial, 2006. Cit. en Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México. SENER 2009. México. Pág. 34.

26 REN21, 2008. Cit. En ídem.

27 Balance Nacional de Energía 2007. Cit en ídem.

Actualmente, la bioenergía representa el 8% del consumo de energía primaria en México. Los principales bioenergéticos empleados son el bagazo de caña (usado para la generación eléctrica y/o térmica en la industria azucarera) y la leña (fundamentalmente usada para calefacción y cocción de alimentos). En 2004 se consumieron 92 PJ de bagazo de caña y 250 de leña.²⁸ México produce al año en la industria cañera, 45 millones de litros de bioetanol ²⁹ que actualmente no se usan como combustible sino en la industria química. Al 2005 la CRE autorizó 19 MW para generar 120 GWh/año con biogás, 70 MW para generar 105 GWh/año con bagazo de caña y 224 MW para generar 391 GWh/año con sistemas híbridos (combustóleo-bagazo de caña).

Potencial

El potencial de la bioenergía en México va mucho más allá del limitado aprovechamiento que se hace de ella en la actualidad. El potencial se divide en combustibles de madera (provenientes de bosques naturales o de plantaciones, o subproductos de la extracción forestal y la industria maderera), agrocombustibles y biogás de rellenos sanitarios. A partir de este potencial, sería posible, de manera sustentable, generar aproximadamente 50,000 GWh de electricidad al año a partir de madera en pequeñas centrales eléctricas (20% de la demanda nacional de electricidad).

El potencial técnico de la bioenergía en México se estima entre 2,635 y 3,771 PJ al año, sin embargo, su uso actual es 10 veces menor.³⁰ Del potencial estimado, un 40% proviene de los combustibles de madera, 26% de los agro-combustibles y 0.6% de los subproductos de origen municipal. Se estiman además 73 millones de toneladas de residuos agrícolas y forestales con potencial energético, y aprovechando los residuos sólidos municipales de las 10 principales ciudades³¹ para la generación de electricidad a partir de su transformación térmica, se podría instalar una capacidad de 803 MW y generar 4,507 MWh/año.³² Además, se cuenta con un área agrícola significativa, potencialmente apta para la producción de bioetanol y biodiesel.³³

28 Sistema de Información Energética: sie.energia.gob.mx/sie/bdiController, SENER 2005, México.

29 Calatayud, Liliانا y Jácome, Sergio, 2003, México.

30 Libro Blanco de la Bioenergía en México, Red Mexicana de Bioenergía 2005, México.

31 Ciudad de México, Guadalajara, Puebla, Nezahualcoyotl, Tijuana, Ecatepec, Mérida, Acapulco, Ciudad Juárez, y Tlalnepantla.

32 www.wheelabratortechologies.com/WTI/CEP/nbroward.asp.

33 Libro Blanco de la Bioenergía En México, Red Mexicana de Bioenergía 2005, México.

El Proyecto de Bioenergía de Nuevo León S.A. en Monterrey, aprovecha el biogás liberado por un relleno sanitario para generar energía eléctrica. El proyecto se desarrolló con un apoyo parcial del GEF, a través del Banco Mundial. Los cambios regulatorios y legales en los que está trabajando México permitirán replicar este proyecto en otros rellenos sanitarios del país. La Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) ofrece apoyo para este tipo de proyectos, desde el diseño de rellenos sanitarios, hasta la generación de energía eléctrica. Actualmente cuenta con una cartera de 4 proyectos con estudios de preinversión, y colabora en el desarrollo de otros 6.

El Grupo Energéticos S.A., en colaboración con el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), firmaron un convenio de colaboración para producir biodiesel a partir de grasa animal de desecho de rastros. En julio del 2005, en Nuevo León, se inauguró la planta con una inversión de 1.5 millones de dólares (capacidad de producción inicial de 500 mil litros por mes). El biodiesel se usa como combustible en medios de transporte, en una primera etapa, para camiones industriales en el norte de México. La visión a futuro es comercializar el producto en la Ciudad de Monterrey, ya que la planta tiene un potencial de producción de 1 millón de litros por mes.

1.3.5 Energía Geotérmica.

Tecnología

La geotermia o calor de la corteza terrestre se puede utilizar para generar electricidad o bien para aplicaciones térmicas como calefacción de interiores, balnearios y procesos industriales o agroindustriales. Existen cinco tipos de recursos geotérmicos, y cada uno está asociado con tecnologías específicas para su aprovechamiento: (a) hidrotermales, (b) roca seca caliente, (c) geopresurizados, (d) marinos y (e) magmáticos.³⁴ Los primeros son los que se explotan actualmente en México y en otros países, mientras que los otros cuatro se encuentran en proceso de investigación y desarrollo.

Los recursos hidrotermales se dividen a su vez en recursos de alta entalpía ($T > 200\text{ }^{\circ}\text{C}$) y de baja entalpía ($T < 200\text{ }^{\circ}\text{C}$). Los primeros se pueden utilizar para la generación de electricidad, mientras que los segundos se utilizan normalmente sólo para aplicaciones térmicas.

Costos

La geotermia requiere de altos costos de inversión en exploración, perforación de pozos y en la construcción de la central propiamente dicha. Los costos de inversión son de aproximadamente US\$3,800/kW, y los costos de la electricidad generada de entre 4 y 7 US¢/kWh. Por lo que se refiere a las aplicaciones térmicas de los recursos geotérmicos, sus costos son menores, de entre 0.5 y 2 US¢/kWh.³⁵ Estos costos son competitivos con otras opciones.

34 Mulás et al., 2005. Cit. En Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México. SENER 2009. México. Pág. 36.

35 Banco Mundial, 2006 Cit. En ídem. Pág. 37.

Estado Actual

La capacidad de generación de electricidad a partir de recursos geotérmicos en el Mundo es de poco más de 10 GW.³⁶ Nuestro país cuenta con aproximadamente la décima parte de esta capacidad - 960 MW – y ocupa el tercer lugar mundial. La Prospectiva del Sector Eléctrico contempla la instalación de 233 MW adicionales en el transcurso de los próximos diez años.³⁷ Por lo que se refiere a las aplicaciones térmicas, actualmente se concentran mayormente en balnearios de aguas termales, aunque se reportan casos aislados de calefacción de edificios, secado de madera, invernaderos y cultivo de hongos.³⁸

Potencial

Debido al alto costo de la exploración geotérmica, no se ha realizado una evaluación minuciosa del potencial geotérmico en nuestro país. Se han hecho, sin embargo, algunas estimaciones. Por lo que se refiere a las reservas de alta temperatura (aptas para la generación de electricidad), se ha estimado un potencial de alrededor de 12 GW eléctricos.³⁹ Las reservas de baja temperatura son mucho más cuantiosas (un estudio, por ejemplo, sugiere una cifra de 45 GWe⁴⁰ sumando el potencial de dos regiones en el Centro y Norte del país), lo que implicaría que en estas regiones sería posible aprovechar este potencial prácticamente ilimitado para aplicaciones industriales y residenciales. En suma, el potencial técnico y económico de las aplicaciones eléctrica y térmica no se ha evaluado de manera específica.

Figura 8. Planta Geotérmica: Los Azufres, Michoacán.



FUENTE: SENER. Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México 2009.

36 REN21, 2009. Cit. En Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México. SENER 2009. México. Pág. 37.

37 Prospectiva del Sector Eléctrico 2008-2017. Cit. En ídem.

38 Mulás et al., 2005. Cit. En ídem.

39 Mercado (1976) y Alonso (1985). Cit. En ídem.

40 Mercado et al., 1985. Cit. En ídem.

Tabla 3. Proyectos geotérmicos en etapa de factibilidad de la Cartera del Sector Energía.

Central	Capacidad [MW]	Generación GWh/año
Cerro Prieto V. Baja California	100	813.2
Cerritos Colorados 1ª etapa, Jalisco	26.9	207.1
Cerritos Colorados 2ª etapa, Jalisco	26.9	414.1
Los Humeros II, Puebla	25	207.1
Los Humeros III, Puebla	55.0	207.1
Total	220.0	1,656.3

FUENTE: Prospectivas del Sector Eléctrico 2005-2014, SENER 2005.

1.3.6 Energía oceánica.

La verdad sea dicha, esta forma de energía casi no es explotada en nuestro país, se incluye en este tema de manera meramente ilustrativa para el lector.

Tecnología

Básicamente, hay tres formas de captar la energía oceánica: aprovechamiento del movimiento de las olas, de la marea alta y baja, y la diferencia de temperatura en las diferentes profundidades del mar.

Energía mareomotriz

La energía mareomotriz se debe como su nombre lo indica a las mareas ocasionadas por la fuerza de atracción gravitatoria. La energía mareomotriz es la que resulta de aprovechar las mareas, es decir, la diferencia de altura media de los mares según la posición relativa de la Tierra y la Luna, y que resulta de la atracción gravitatoria de esta última y del Sol sobre las masas de agua de los mares.

Esta diferencia de alturas puede aprovecharse interponiendo partes móviles al movimiento natural de ascenso o descenso de las aguas, junto con mecanismos de canalización y depósito, para obtener movimiento en un eje. Mediante su acoplamiento a un alternador se puede utilizar el sistema para la generación de electricidad, transformando así la energía mareomotriz en energía eléctrica, una forma energética más útil y aprovechable. Es un tipo de energía renovable limpia. La relación entre la cantidad de energía que se puede obtener con los medios actuales y el coste económico y ambiental de instalar los dispositivos para su proceso han impedido una proliferación notable de este tipo de energía.

La central mareomotriz de Rance

En Francia, en el estuario del río Rance, se instaló una central eléctrica mareomotriz, que funcionó durante varias décadas, produciendo electricidad para cubrir las necesidades de una ciudad como Rennes. El coste del KWh resultó similar o más barato que el de una central eléctrica convencional, sin el coste de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera ni consumo de combustibles fósiles.

Los problemas medioambientales fueron bastante graves, como aterramiento del río, cambios de salinidad en el estuario y cambio del ecosistema antes y después de las instalaciones.

Otros proyectos similares, como el de una central mucho mayor prevista en Francia en la zona del Mont Saint Michel, o el de la Bahía de Fundy en Canadá, donde se dan hasta 10 metros de diferencia de marea, o el del estuario del río Severn, en el reino Unido, entre Gales e Inglaterra, no han llegado a ejecutarse por el riesgo de un fuerte impacto medioambiental.

Figura 9. Central mareomotriz de Rance.



FUENTE: www.wikipedia.com.es

En México existe un potencial mareomotriz todavía sin evaluar, aunque en nuestro país se encuentra en el norte del golfo de Baja California, entre la costa y la Isla de San Lorenzo, se forma un canal marítimo con fuerte corriente en una sola dirección llamado “Salsipuedes”, donde tal vez se pudieran instalar turbinas para generar electricidad.

Esta energía se trató de aprovechar en México mediante un dispositivo experimental denominado Sistema de Bombeo por Energía de Oleaje (SIBEO), el cual tiene una elevada eficiencia desde el punto de vista del costo beneficio. El objetivo de este sistema es sanear las aguas de los puertos y de las lagunas costeras de los desechos orgánicos y algunas sustancias químicas, aprovechando el movimiento de las olas del mar.

Energía undimotriz

Otra forma de utilizar las olas es con un pistón, que sube y baja dentro de un cilindro con cada movimiento de las olas. El pistón se encarga de hacer girar el generador.

Hasta ahora, la mayor parte de los sistemas para generar energía con las olas marinas son muy pequeños, pero pueden ser usados, por ejemplo, para auxiliar en la iluminación de una casa o para boyas de advertencia en el mar.

Energía térmica de los océanos

La tercera forma de aprovechar la energía de los océanos es mediante la conversión de la energía térmica de las aguas marítimas. Debido a la diferencia de temperaturas entre el fondo y la superficie del mar. Esto se debe a que agua absorbe una parte del calor del sol y el resto es reflejado. Las aguas profundas del mar son frías y su temperatura disminuye a medida que es mayor la profundidad.

La conversión de la energía térmica oceánica tiene que ver con la explotación de las diferencias de temperatura entre el agua templada de la superficie y las aguas profundas más frías. En las latitudes tropicales y a una profundidad de mil metros, esa diferencia puede llegar a 20 °C, lo cual puede utilizarse para generar electricidad al evaporar y condensar, en forma alterna un fluido de trabajo. El vapor producido mueve una turbina acoplada a un generador de electricidad.

Figura 10. Boya Undimotriz.



Fuente: <http://www.oceanpowertechnologies.com>

México posee aguas aptas para este tipo de aprovechamiento de energía por ejemplo las costas de Guerrero, Oaxaca y Chiapas.

Existen algunas plantas experimentales en Japón y Hawai que utilizan la diferencia de temperatura de las aguas oceánicas para generar energía eléctrica.

De la revisión efectuada a lo largo de este estudio somero de las energías renovables, se puede concluir que México tiene un alto potencial para el aprovechamiento estas energías, pero es marginal su aplicación en el sistema energético mexicano. Se logra percibir además, que a últimas fechas muchas industrias y sociedades se denominan autoabastecidas, o permissionadas produciendo así una gran parte de la energía consumida en el país. Por último, un aspecto de las energías renovables que no se menciona es su cualidad de intermitencia utilizando los mecanismos y tecnologías actuales, lo que disminuye su atractivo para su pleno desarrollo.

También se puede observar que existe una amplia confianza por parte del gobierno en la producción de energía eléctrica mediante hidrocarburos y últimamente mediante gas natural, dependiendo así de la volatilidad de los precios de este combustible y consumiendo el de extracción propia para el consumo nacional de energía. Actualmente 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 esto minimizaba 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.

1.13 Principios básicos de la energía nuclear.

La energía nuclear es aquella que resulta del aprovechamiento de la capacidad que tienen algunos isótopos de ciertos elementos químicos para experimentar reacciones nucleares y emitir energía en la transformación.

Una reacción nuclear consiste en la modificación de la composición del núcleo atómico de un elemento, que muta y pasa a ser otro elemento como consecuencia del proceso. Este proceso se da espontáneamente entre algunos elementos y en ocasiones puede provocarse mediante técnicas como el bombardeo neutrónico u otras.

Existen dos formas de aprovechar la energía nuclear para convertirla en calor: la fisión nuclear, en la que un núcleo atómico se subdivide en dos o más grupos de partículas, y la fusión nuclear, en la que al menos dos núcleos atómicos se unen para dar lugar a otro diferente.

1.13.1 Energía de fusión.

Es el proceso mediante el cual dos núcleos atómicos se unen para formar uno de mayor peso atómico. El nuevo núcleo tiene una masa inferior a la suma de las masas de los dos núcleos que se han fusionado para formarlo. Esta diferencia de masa es liberada en forma de energía. La energía que se libera varía en función de los núcleos que se unen y del producto de la reacción. La cantidad de energía liberada corresponde a la fórmula $E = mc^2$ donde m es la diferencia de masa observada en el sistema entre antes y después de la fusión y "c" es la velocidad de la luz (300,000 km/s).⁴¹

Los núcleos atómicos tienden a repelerse debido a que están cargados positivamente. Esto hace que la fusión sólo pueda darse en condiciones de temperatura y presión muy elevadas que permitan compensar la fuerza de repulsión. La temperatura elevada hace que aumente la agitación térmica de los núcleos y esto los puede llevar a fusionarse. Para que esto ocurra son necesarias temperaturas del orden de millones de grados. El mismo efecto se puede producir si la presión sobre los núcleos es muy grande, obligándolos a estar muy próximos.

La reacción de fusión más sencilla (esto es, la que requiere menos energía) es la del Deuterio (H^2) y el Tritio (H^3) formando Helio. Al contrario que la fisión nuclear, no se ha logrado utilizar la fusión nuclear como medio rentable de obtener energía (o sea, la energía aplicada al proceso es mayor que la obtenida por la fusión), aunque hay numerosas investigaciones en esa dirección.

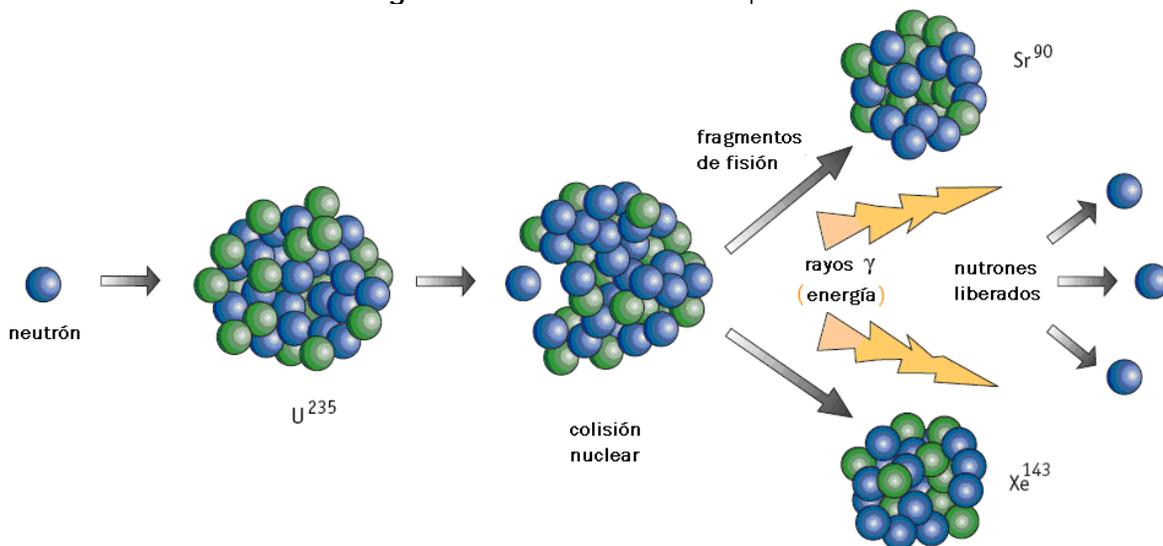
⁴¹ Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. Nuclear Energy Today. 2003. Francia. Pág. 13.

Hasta el momento, la fusión nuclear controlada es utilizada sólo en la investigación de futuros reactores de fusión aunque aún no se han logrado reacciones de fusión que sirvan para generar energía de forma útil.

1.13.2 Energía de fisión.

Ciertos elementos pesados naturales y hechos por el hombre, por ejemplo el uranio y el plutonio, son relativamente inestables. Cuando el núcleo de alguno de estos elementos es impactado por un neutrón que es absorbido, este puede fisionarse o separarse en dos fragmentos, liberando a la vez dos o tres neutrones y energía (ver Figura 11)

Figura 11. Una fisión nuclear típica.



FUENTE: Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. Nuclear Energy Today, 2003.

Después del impacto original los fragmentos de fisión son expulsados, y comienzan a colisionar con los átomos cercanos, después de un instante pierden la mayoría de su energía de movimiento, la cual es convertida en energía calorífica. Este calor es usado a su vez para generar electricidad.

Cuando los neutrones libres, que también son liberados como resultado de la fisión, son absorbidos por otros átomos fisionables cercanos, estos también pueden ser fisionados y liberar a su vez más neutrones, los cuales producen más reacciones y así sucesivamente en lo que es conocido como *reacción en cadena*.

Un moderador es usado para frenar a los neutrones liberados durante la fisión.

Cuando el núcleo de un átomo captura un neutrón y no se fisiona, éste puede cambiar a otro elemento. En una reacción nuclear, esto resulta en la creación de un importante paquete de elementos de larga vida los cuales no se presentan en la naturaleza, o son muy raros, (Ver tabla 4).

Tabla 4. Isótopos importantes formados por la captura de neutrones en un reactor nuclear.

Elemento	Vida media aproximada
Neptunio (Np ²³⁷)	210 000 años
Plutonio (Pu ²³⁹)	24 000 años
<i>Americio (Am²⁴³)</i>	7 400 años

FUENTE: Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. Nuclear Energy Today, 2003.

Todos los elementos listados en la tabla 4 son radioactivos, algunos, en particular el plutonio son capaces de ser usados como combustible nuclear. Debido a su larga vida media y a su alta toxicidad radiológica y biológica, éstos son un componente importante en el desperdicio nuclear y son la razón por la cual algunos desechos deben ser aislados por periodos muy largos.

La fisión nuclear es una fuente extremadamente potente de energía con una muy alta densidad de energía. Comparada con reacciones químicas como la combustión de combustibles fósiles, las reacciones de fisión requieren un volumen mucho menor de material básico para producir una cantidad equivalente de energía. La energía liberada por la fisión de un kilogramo de uranio en un reactor típico es equivalente a la liberada por cerca de 45,000 kg de madera, 22,000 kg de carbón, 15,000 kg de petróleo y 14,000 kg de gas natural licuado.⁴²

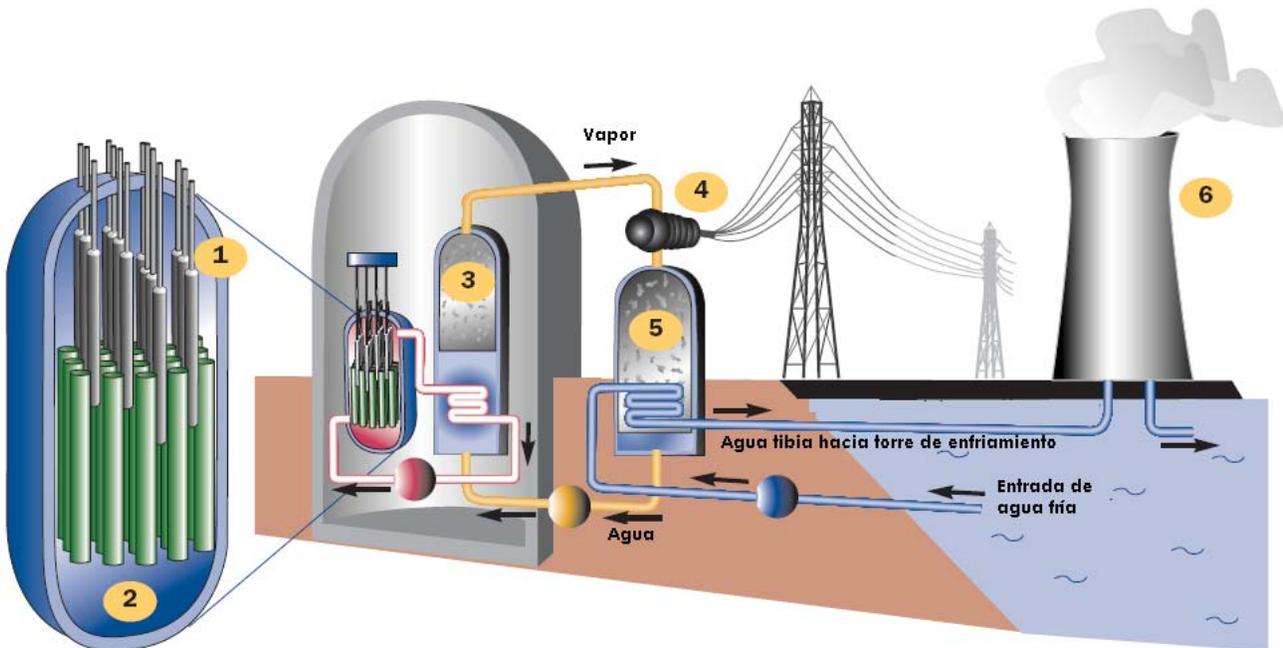
1.14 Componentes básicos de un reactor nuclear.

La tecnología básica para aprovechar la energía de una fisión nuclear es el reactor nuclear. Aunque existan varios tipos de reactores nucleares, todos tienen bastantes componentes en común, ya sea combustible, moderador, refrigerante o barra de control (vea figura 12)

Un reactor nuclear es, en esencia, simplemente una manera de producir calor para hervir agua, que a su vez produzca vapor para así hacer trabajar a las turbinas de los generadores que producirán electricidad.

⁴² Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. Nuclear Energy Today, 2003. Francia. Pág. 15.

Figura 12. Componentes básicos de un reactor nuclear (presurizado).



1. Reactor: El combustible (verde) calienta agua presurizada. Las barras de control (gris) absorben los neutrones para controlar o finalizar la fisión.
2. Refrigerante y moderador: El combustible y las barras de control están rodeados por agua que sirve como refrigerante y moderador.
3. Generador de vapor: Agua caliente del reactor es bombeada a través de un intercambiador de calor para generar vapor a alta presión.
4. Turbina generador: El vapor conduce al generador de electricidad a producir energía eléctrica.
5. Condensador: Remueve el calor para convertir al vapor en agua.
6. Torre de enfriamiento: Remueve el calor remanente para regresar el agua enfriada al ambiente.

FUENTE: Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. *Nuclear Energy Today*. 2003.

1.14.1 Combustible.

El combustible más importante es el uranio, el cual tiene dos isótopos importantes el U^{235} y U^{238} . El primero, es el único material fisionable encontrado en la naturaleza, puede ser fácilmente fisionado cuando es golpeado ya sea por neutrones rápidos o térmicos. Por lo que, casi todos los reactores lo usan como combustible.

Muchos de los combustibles comerciales para reactores son procesados para que contengan una concentración más alta de U^{235} de la que se presenta en la naturaleza, la cual oscila entre el 2 y 5% comparado con el 0.711%⁴³ del que se encuentra en la naturaleza, el combustible que sufre este proceso se dice haber sido enriquecido en U^{235} .

El remanente del combustible, U^{238} generalmente, puede fisionarse sólo cuando es golpeado por neutrones rápidos de ciertas energías, pero cuando la captura de un neutrón ocurre, este eventualmente se transforma en Plutonio 239 (Pu^{239}). Este isótopo del plutonio (uno de muchos), es también capaz de fisionarse bajo el impacto de neutrones rápidos o térmicos, y su contribución a la energía generada de un reactor de agua ligera gradualmente se incrementa hasta representar hasta el 30% de la potencia generada.⁴⁴ Algunos reactores utilizan combustible en el cual el plutonio es incorporado, llamado combustible oxido-mixto (o MOX). Esta es una manera de aprovechar el plutonio que se genera cuando se gasta el uranio como combustible.

1.14.2 Moderador.

Un moderador es necesario para frenar a los neutrones rápidos creados durante la fisión y regular así la ocurrencia de los choques, que causan la fisión. El moderador debe ser un material ligero que le permita a los neutrones frenarse sin ser capturados. Usualmente, el agua común es utilizada, algunas alternativas son el grafito, una forma de carbón, y el agua pesada (D_2O), la cual es agua formada con el más pesado isótopo del hidrógeno que es el deuterio.

1.14.3 Refrigerante.

Un refrigerante es necesario para absorber y remover el calor producido por la fisión nuclear y mantener la temperatura del combustible dentro de límites aceptables. Este puede también transferir el calor para hacer trabajar a la turbina y producir electricidad. Si se usa agua como refrigerante, el vapor producido puede ser alimentado directamente a las turbinas. Alternativamente puede hacerse pasar a través de un intercambiador de calor, el cual removerá el calor y producirá el vapor necesario.

Otros refrigerantes posibles son el agua pesada (D_2O), gases como el dióxido de carbono (CO_2) o el Helio (He), o materiales como el Sodio (Na) o Bismuto (Bi). Un refrigerante puede ser también un moderador; el agua es usada en este modo dual en la mayoría de los reactores modernos.

43 Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. Nuclear Energy Today. 2003. Francia. Pág. 16.

44 Ídem.

1.14.4 Barras de control.

Las barras de control están hechas de materiales que absorben neutrones, por ejemplo el Boro (**B**), la Plata (**Ag**), el Indio (**In**) y el Cadmio (**Cd**). Estas son introducidas dentro del reactor para reducir el número de neutrones y por lo tanto detener el proceso de fisión cuando es requerido, o, durante la operación, para controlar y regular el nivel y distribución espacial de la potencia en el reactor.

1.14.5 Otros componentes.

El combustible junto con la estructura mecánica que mantiene unido al reactor conforman el núcleo del reactor. Generalmente, un reflector de neutrones rodea al núcleo y sirve para regresar tantos neutrones como sean posibles que se hayan fugado del núcleo y así maximizar la eficiencia en su uso. A menudo, el refrigerante y/o moderador sirve como reflector.

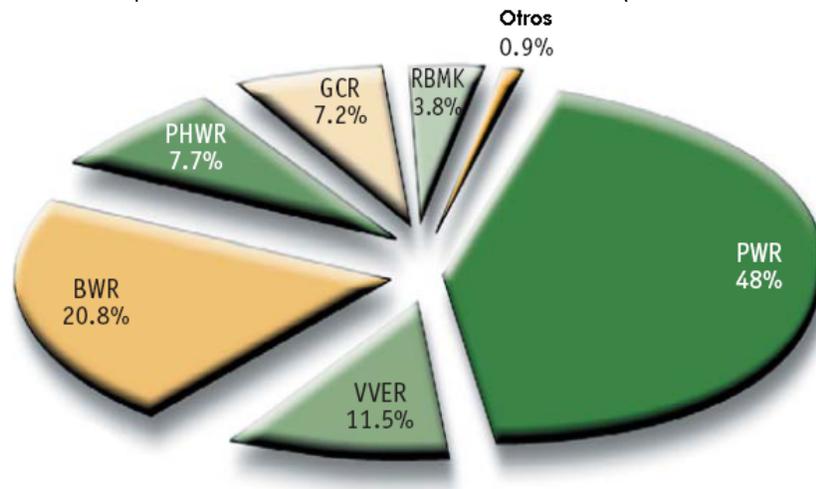
El núcleo y el reflector a menudo son protegidos por un contenedor de acero grueso llamado vasija de presión. La protección contra la radiación es proveída para reducir los altos niveles de radiación producidos por el proceso de fisión. Numerosos instrumentos son insertados dentro del núcleo y sistemas de soporte para permitir el monitoreo y control del reactor, por ejemplo, temperatura, presión, radiación y nivel de potencia.

1.15 Tecnologías de reactores.

Un método muy útil y popular de categorizar reactores es de acuerdo al refrigerante que utilizan. Cerca del 80% de los reactores comerciales en uso a principios del 2003 eran enfriados y moderados con agua ordinaria y son conocidos como reactores de agua ligera (*Light Water Reactor*) o (LWR's) por su nombre en inglés. De éstos, existen dos tipos: los reactores de agua presurizada (*Pressurized Water Reactor*, PWR), que incluyen una variante rusa (VVER), y los reactores de agua hirviente (*Boiling Water Reactor*, BWR). La mayoría del 20% restante de los reactores son enfriados ya sea por agua pesada o gas.⁴⁵ La gráfica 5 muestra los principales tipos de reactores nucleares comerciales en uso mundialmente.

⁴⁵ Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. Nuclear Energy Today. 2003. Francia. Pág. 17.

Gráfica 5. Tipos de reactor en uso mundialmente (a enero del 2003).



FUENTE: Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. Nuclear Energy Today. 2003.

Cada uno de los reactores comerciales principales serán descritos a continuación. Dentro de cada tipo básico hay diferentes diseños resultado de diferentes tipos de manufactura y requerimientos del consumidor.

1.15.1 Reactor de agua presurizada (PWR).

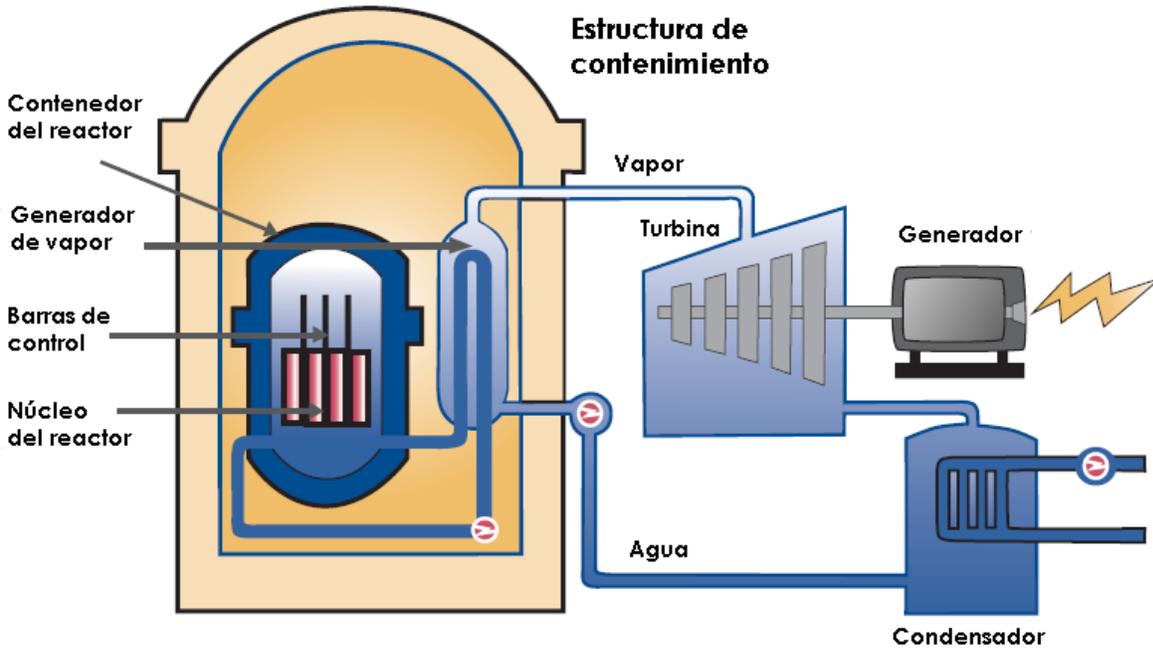
A principios del 2003, había 212 reactores tipo PWR en el mundo, de los cuales 150 se encontraban en Francia, Japón y los Estados Unidos.⁴⁶

Se utiliza agua ordinaria como refrigerante y moderador, El refrigerante se mantiene a alta presión (cerca de los 15.5 MPa o 2,250 psi)⁴⁷ para mantenerlo líquido durante la operación, retenido dentro de una frontera de presión comprimido principalmente por el contenedor del reactor y el sistema de tuberías en el sistema primario. El refrigerante es forzado a circular mediante potentes bombas para que el calor sea transferido al agua hirviendo en un circuito secundario conectado a un generador de vapor. De esta manera el vapor producido mueve la turbina de los generadores produciendo electricidad. (Ver figura 13)

⁴⁶ Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. Nuclear Energy Today. 2003. Francia. Pág. 18.

⁴⁷ Idem.

Figura 13. Un reactor de agua presurizada (PWR).



FUENTE: Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. *Nuclear Energy Today*. 2003.

1.15.2 Los reactores VVER.

Un total de 50 reactores tipo VVER están en operación, de los cuales 26 se encuentran en la Federación Rusa y Ucrania. También se encuentran operando en Armenia, Bulgaria, la República Checa, Finlandia, Hungría y la República Eslovaca.⁴⁸ Su nombre es un acrónimo ruso de Reactor Moderado con Agua, los reactores VVER son, en esencia, reactores PWR de diseño ruso. La primera generación de estos reactores (tipo 440/230) necesitan modificaciones especiales porque sus diseños originales no corresponden a prácticas contemporáneas en seguridad nuclear.

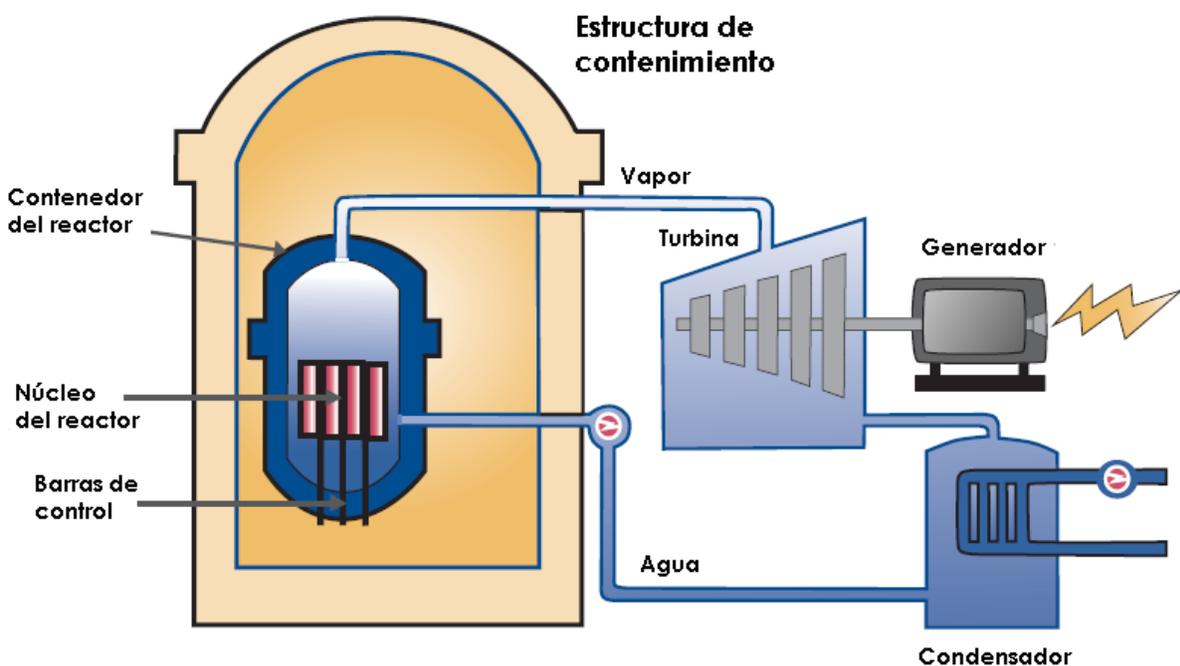
Como resultado, se han tomado decisiones para desmantelar algunas de estas unidades, como en Bulgaria y las República Eslovaca.

⁴⁸ Ibidem 46.

1.15.3 Reactores de agua hirviente (BWR).

Hay 92 reactores tipo BWR operando en nueve países, de los cuales Japón y Estados Unidos cuentan con 64.⁴⁹ En un reactor tipo BWR, agua ordinaria actúa como refrigerante y moderador. El refrigerante se mantiene a una presión más baja que en un PWR (cerca de los 7MPa o 1,000 psi)⁵⁰ permitiendo que el refrigerante hierva mientras este recibe calor del reactor. El vapor resultante es forzado a pasar por una turbina conectada a un generador para producir electricidad (ver Figura 14). Mientras que la ausencia del generador de vapor simplifica el diseño, comparado con el diseño de los reactores PWR, la radioactividad contamina la turbina del generador.

Figura 14. Un reactor de agua hirviente (BWR).



FUENTE: Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. *Nuclear Energy Today*. 2003.

1.15.4 Reactores presurizados de agua pesada (PHWR).

Existen 34 reactores operando alrededor del mundo en seis países, de los cuales 14 operan en su país de origen, Canadá, y el remanente en Argentina, India, Pakistán, la República de Corea y Rumania.⁵¹ Mejor conocidos como reactores CANDU (acrónimo de Canadian Deuterium Uranium), Estos reactores utilizan agua pesada (D_2O), como refrigerante y moderador.

49 Ibidem 46.

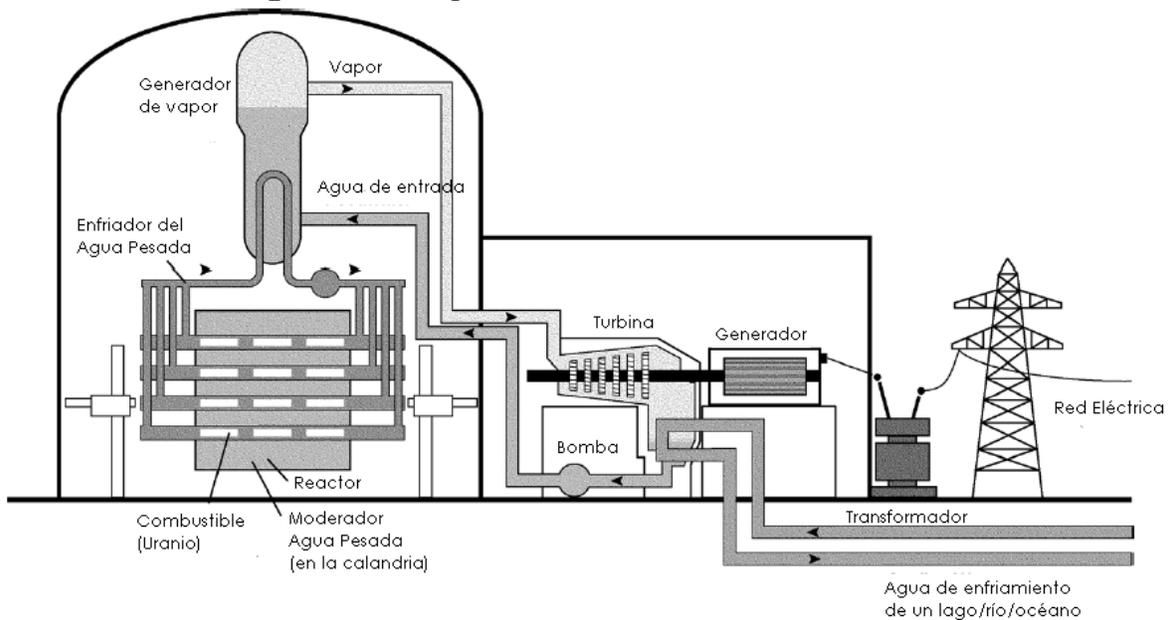
50 Idem.

51 Ídem.

El agua pesada permite que el uranio natural pueda ser usado como combustible, eliminando así la necesidad, y el costo, de enriquecer el uranio. Por otro lado, la producción de agua pesada requiere de una planta dedicada a separar el D₂O del agua ordinaria, aumentando la concentración de D₂O de su concentración natural que es mucho menor al 1%, para así incrementarla hasta el 99% que es usado en este tipo de reactores.

Como en un reactor PWR, el refrigerante se hace pasar a través de un generador de vapor para que así sirva para hervir agua ordinaria en un circuito aparte. Una ventaja del diseño de los reactores CANDU es que el reabastecimiento de combustible puede tomar lugar durante la operación, mientras que los PWR y los BWR deben ser apagados para reabastecerse de combustible. Esta ventaja permite una gran disponibilidad pero también incrementa la complejidad de la operación.

Figura 15. Vista general de una Planta Nuclear CANDU.



FUENTE: CANDU Owner's Group Inc. <http://www.candu.org/> 2010.

1.15.5 Reactores enfriados por gas (GCR).

En lo que respecta a reactores enfriados por gas, 33 operan en el Reino Unido.⁵² Hay dos tipos el Magnox (llamado así por la aleación de magnesio usado para revestir los elementos del combustible) y el reactor avanzado enfriado por gas el (AGR). Ambos utilizan el dióxido de carbono como refrigerante y el grafito como moderador.

⁵² Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-operation and Development. Nuclear Energy Today. 2003. Francia. Pág. 19.

El Magnox utiliza uranio natural como combustible y el AGR, uranio enriquecido. Como el reactor CANDU, estos diseños pueden ser reabastecidos de combustible mientras operan.

1.15.6 Reactor Hirviente de Potencia (RBMK).

Diecisiete reactores RBMK permanecen en operación de los cuales 15 se encuentran en la Federación Rusa y dos en Lituania.⁵³ El nombre es un acrónimo ruso que significa gran reactor hirviente de potencia. Se utiliza agua ordinaria como refrigerante y se utiliza grafito como moderador. Como con los reactores BWR, el refrigerante hierve mientras este pasa a través del reactor y el vapor resultante es echo pasar directamente por la turbina de los generadores.

El RBMK, es un diseño prematuro, fue construido y operado, sin las características de seguridad requeridas en otras partes. El bien conocido accidente de Chernobyl (Ucrania) en 1986 fue un accidente ocurrido a un reactor de este tipo.

Los reactores de este tipo son objeto de grandes medidas de seguridad debido a que no pueden ser mejorados para satisfacer las medidas de seguridad contemporáneas a un costo razonable.

1.15.7 Reactores rápidos de cría.

Los reactores descritos anteriormente son reactores térmicos, en los cuales la mayoría de la fisión es causada por los neutrones térmicos. Los reactores rápidos son diseñados para hacer uso de los neutrones rápidos, con mucha mayor energía cinética. Los reactores rápidos esencialmente crean más neutrones por fisión que un reactor termal y hacen un mejor uso de ellos porque la probabilidad de captura de un neutrón disminuye a mayor energía del mismo. Este exceso de neutrones puede ser aprovechado para convertir materiales fértiles, U^{238} y Th^{232} , a materiales fisibles a través de la captura de un neutrón. Este material fisible creado puede ser a su vez combustible del reactor. Es posible diseñar reactores que produzcan más combustible del que consumen por lo cual se dice que son *reactores de cría*.

Los reactores rápidos de cría al crear combustible de isótopos no fisibles y al mejorar la eficiencia a través del reciclaje, puede potencialmente incrementar la disponibilidad del combustible a nivel mundial y es por esto un elemento clave en la sustentabilidad de la energía nuclear a largo plazo. Los reactores de cría han sido construidos y operados en un número reducido de países, durante el 2002 sólo fueron operados en Francia, India, Japón y la Federación Rusa.

⁵³ Ibídem 52.

1.16 Vida útil de los reactores.

Algunos reactores de primera generación, como los reactores Magnox en el Reino Unido, están aún en servicio, después de 35 años o más, por lo que están a punto de llegar al final de sus vidas operacionales.

Muchos de los reactores de hoy en día fueron construidos en los años setentas y ochentas, por lo que alcanzarán vidas medias de 30 y 40 años alrededor del año 2015. A pesar de esto, estudios basados en la operación y la experiencia en materiales han revelado que no hay ningún problema tecnológico mayor inhibiendo la vida operacional para muchos de estos reactores, particularmente los reactores tipo PWR y los BWR. El monitoreo cuidadoso del rendimiento de una planta, el análisis de la experiencia en la operación, los programas de modernización y la restauración ofrecen buenas perspectivas para la extensión de la vida de muchas de estas plantas. Por ejemplo, en enero del 2003, las autoridades en la seguridad nuclear de los Estados Unidos han dado licencias de extensión a diez reactores para operar por 60 años, 20 años más de su vida operacional aprobada en primera instancia. Otros países como la Federación Rusa están planeando extender las vidas útiles de reactores existentes. En muchos países las decisiones acerca de las vidas medias de los reactores son hechas a través de renovaciones periódicas de licencias de operación, las cuales involucran análisis comprensivo de la seguridad usando los últimos métodos, información y requerimientos de seguridad.

1.17 La economía de la energía nuclear.

La industria núcleo eléctrica desde sus inicios, de 1954 a 1956 y durante unas tres décadas, mantuvo un desarrollo y crecimiento sostenido; sin embargo, a partir de 1986, tuvo un serio revés por causa del accidente de Chernobyl, que llevó a frenar totalmente su crecimiento en Europa Occidental y en Estados Unidos, incluyendo el cierre de centrales en ciertos países como Italia. Entre tanto, su expansión cobró gran impulso en los países asiáticos y de la cuenca del Pacífico Oriental, como Japón, Corea, China y Taiwán, India; así como de Europa Oriental, como Rusia, Ucrania, Bulgaria y Eslovaquia.

Al inicio del siglo XXI, se presenta un progresivo proceso de revalorización del potencial de la energía nuclear, en donde nuevos países se han sumado para implementar sus bases de desarrollo. Los factores técnicos y económicos que la impulsan son:

- a) Inestabilidad ante el alza de los precios de los hidrocarburos en general; y en particular, del gas natural en los Estados Unidos, Brasil y Argentina.
- b) Impactos negativos al medio ambiente por los gases de efecto invernadero (principalmente CO₂) por la quema de combustibles fósiles.

- c) El incremento de la demanda de electricidad por encima del crecimiento de la economía (PIB), en la gran mayoría de los países.
- d) El creciente interés y compra de centrales nucleares en operación por empresas privadas.
- e) Avances tecnológicos, mejoramiento en su operación y administración que propician elevar su factor de planta.
- f) El decremento acelerado de los costos de generación de las nuevas núcleo-eléctricas.
- g) Las iniciativas del congreso de los Estados Unidos para reiniciar la construcción de plantas nucleares.

Las actuales tecnologías de fisión nuclear de Generación III son resultado de los trabajos de investigación por compañías privadas, institutos de investigación, universidades y gobiernos. En algunos casos, se trabaja sobre tecnologías similares en versiones diferentes o en proyectos integrados por varios países.

Todas estas innovaciones se proyectan en seis características:

1. Mecanismos de alta seguridad y bajo riesgo de accidentes.
2. Competitividad económica por su menor inversión en la construcción, operación, mantenimiento y aumento de vida operativa a 60 años.
3. Empleo de materiales más resistentes, seguros y con transportación.
4. Alta seguridad en el manejo de combustibles y sus desechos.
5. Mayor eficiencia del reciclamiento de combustibles.
6. Incremento de la eficiencia de las plantas ⁵⁴

Hacia el 2010, iniciarán su construcción diversos modelos de reactores de Generación III avanzados (Generación III +). Dentro de los más acogidos en el mercado europeo está el reactor EPR (*European Pressurized Water Reactor*) de 1750 MW, desarrollado por Francia y Alemania para actualizar sus plantas nucleoeeléctricas.⁵⁵ En los Estado Unidos, hacia el 2012, estarán en construcción unos 30 reactores, el de mayor demanda es el Westinghouse AP 1000 de 1100 MW con un costo de generación de 3.5 ¢US/kWh.⁵⁶

54 CNEA, 2002. Cit. En Sergio D. Bazán Perkins. La energía nuclear, una alternativa de sustentabilidad para resolver la demanda eléctrica en México (1a parte), UNAM, México, 2005. Pág. 5.

55 IAEA, 2002; WNA, 2003. Cit. En Ídem.

56 FRAMATOME-ANP, 2003. Cit. En íbidem, Pág. 6.

En cuanto a las reservas mundiales de uranio convencional probadas, se estiman en categorías por el costo del concentrado, de menor o igual a 80 \$US/kg de U_3O_8 se tienen 3,107,000 toneladas y de menor o igual a 130 \$US/kg de U_3O_8 se cuenta con 3.933,000 t, distribuidas geográficamente en los cinco continentes. En el 2000, la producción fue de 36,112 t y la demanda de los 438 reactores nucleares comerciales fue de 64,014 t, la diferencia de 27,902 t se cubre de las reservas obtenidas del desarme nuclear.

Para el caso de México, en las estadísticas mundiales se aprecia que desde hace más de una década no figura entre los 38 países que reportan inversión en la explotación de yacimientos de uranio y en la adquisición de tecnología minera para su extracción.⁵⁷

Al año 2000, existieron 21 países con tecnología para producir combustibles nucleares en sus diferentes fases, que garantizan la estabilidad de su precio en el mercado.⁵⁸ Las grandes reservas de uranio y los avances tecnológicos llevan a que se tenga suficiente combustible nuclear para cubrir las necesidades de la humanidad por largo tiempo. La energía nuclear, suponiendo que usemos reactores de neutrones rápidos, durará por varios miles de años, es decir, mientras el sol esté en condiciones de mantener la vida en la Tierra.

1.18 El programa de energía atómica 2010 de los Estados Unidos.

Hacia finales del 2001, los Estados Unidos en respuesta al cambio de los escenarios del mercado de energéticos y de los avances tecnológicos, se decide por la energía nuclear como la mejor opción, que impulsa el mayor desarrollo económico en condiciones de sustentabilidad.⁵⁹

Su programa de Energía Atómica 2010 es un plan energético al 2030. Contempla la entrada en operación comercial a gran escala de los reactores nucleares avanzados de Generación III (Gen. III+) y de Generación IV. Se considera del 2010 al 2020 el ingreso a operación comercial de unos 50 reactores nucleares de generación III +; de 1000 MW ó su equivalente para cubrir 50,000 MW enfriados por agua ligera o vapor, adicionales a los 12,000 MW que se espera incrementar con las actuales plantas. Del año 2015 al 2025, la entrada comercial de reactores nucleares de IV generación que incluye modelos para producir hidrógeno a partir del agua. Finalmente, antes del 2030 se pretende garantizar un mínimo volumen de combustibles nucleares gastados y un menor tiempo de duración, como emisores peligrosos.⁶⁰

57 Uranium, 2000 y 2001. Cit. En Ídem.

58 WNA, 2000. Cit. En Ídem.

59 N EI, 2002c. Cit. En Sergio D. Bazán Perkins. La energía nuclear, una alternativa de sustentabilidad para resolver la demanda eléctrica en México (1a parte), UNAM, México, 2005. Pág.6.

60 U.S. Government, 2003; NEI, 2003ª y 2003b. Cit. En Ibídem, Pág. 7.

Para el desarrollo de los reactores de Generación IV se adicionaron varios países que cuentan con tecnologías del ciclo de combustible nuclear, por ser la principal línea de investigación del programa. En julio de 2001, Argentina, Brasil, Canadá, Francia, Japón, Corea del Sur, Sudáfrica, Reino Unido y Estados Unidos, firmaron una carta formal para identificar y desarrollar tecnologías de la Generación IV sobre una base multilateral.⁶¹

Por parte de América Latina participan Argentina y Brasil, que cuentan con desarrollo tecnológico avanzado en el campo industrial de explotación, producción, enriquecimiento, reconversión y tratamiento de combustible nuclear, con los que han obtenido sus propias patentes y la participación internacional. En este aspecto, México desde 1984, no cuenta con la infraestructura, experiencia, personal técnico y científico especializado en la industria del ciclo de combustibles nucleares; desde que decidió liquidar a su personal con el cierre de Uranio Mexicano (URAMEX). De esta forma, México se excluyó de un campo de desarrollo tecnológico y científico que incluye todas las ramas de desarrollo profesional, desaprovechando las oportunidades del mercado; asimismo debilitó sus posibilidades para participar en proyectos internacionales y de licitación de producción de combustibles nucleares para las nuevas tecnologías de reactores nucleares, por lo menos al nivel de Yellow Cake, que es la materia básica.

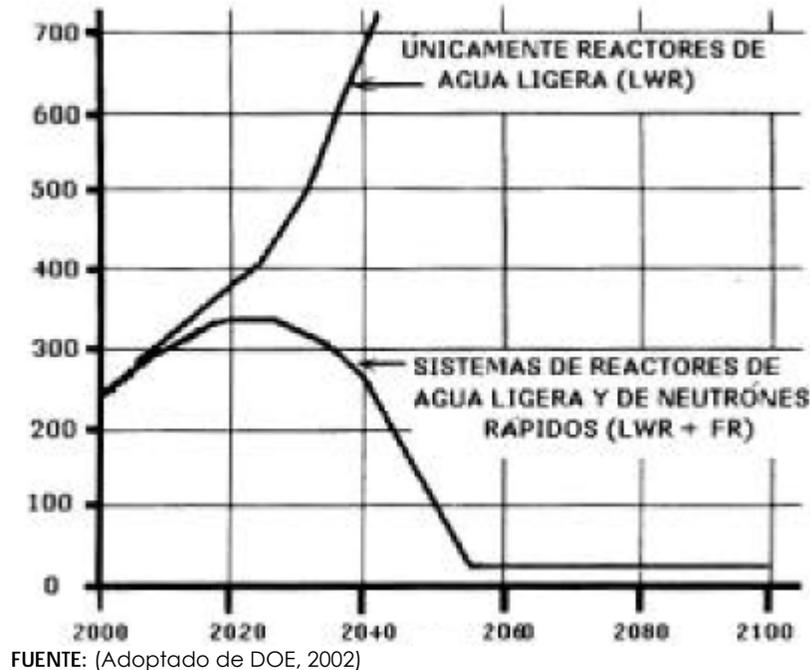
1.19 Disposición de los desechos radiactivos.

La mayoría de los países que cuentan con plantas nucleoelectricas, ocupan los combustibles nucleares una vez para su posterior confinamiento, dentro de las plantas, como es el caso de los Estados Unidos y México. Otros países como Francia, Inglaterra, Suiza y Japón, recuperan y procesan el uranio y el plutonio de los combustibles utilizados, lo utilizan para hacer nuevo combustible y transmutan los inaprovechables a otros de menor vida de toxicidad, reduciendo de esta forma el almacenamiento.

Los reactores nucleares de Generación IV que podrían entrar al mercado del 2015 al 2025, incluyen tres de sus seis modelos básicos, reactores comerciales de neutrones rápidos (*fast reactor*), diseñados para consumir el plutonio y uranio agotado y transmutar los tóxicos, producidos por otras centrales nucleares. De esta forma, se pretende resolver la principal preocupación del empleo de la generación nuclear concerniente a la proliferación y el volumen de residuos que esta industria produce.⁶¹

⁶¹ DOE, 2002b y 2003. Cit. En D. Bazán Perkins. La energía nuclear, una alternativa de sustentabilidad para resolver la demanda eléctrica en México (1a parte), México, 2005, Pág. 7.

Gráfica 6. Decremento del combustible nuclear gastado, almacenado en el mundo al integrar sistemas de reactores rápidos y de agua ligera, proyección al 2100.



De esta manera se resolvería este tema de especial preocupación en los programas nucleares emprendidos por países interesados en este tema.

1.20 Aspectos importantes de la energía nuclear.

En resumen, La fisión nuclear del uranio es la principal aplicación práctica civil de la energía nuclear y se emplea en cientos de centrales nucleares en todo el mundo, en países como Francia, Japón, Estados Unidos, Alemania, Argentina, Brasil, Suecia, España, China, Rusia, Corea del Norte, México, Pakistán e India.

Tiene como principal ventaja que no utiliza combustibles fósiles, con lo que no emite a la atmósfera gases tóxicos o de efecto invernadero. Esto es importante en el momento actual debido al Protocolo de Kyoto que obliga a pagar una tasa por cada tonelada de CO₂ emitido (estrategia seguida para evitar el calentamiento global). Sin embargo, las emisiones contaminantes indirectas derivadas de la construcción de una central nuclear, la fabricación del combustible y la gestión posterior de los residuos radiactivos no son despreciables. Históricamente, las centrales nucleares fueron diseñadas con un uso militar, consiguiendo la fabricación del plutonio necesario para fabricar bombas de implosión como Fat-Man, la bomba atómica lanzada sobre Nagasaki. Más tarde se comprobó que el plutonio fisible generado podía ser utilizado a su vez como combustible de fisión, aumentando enormemente la eficiencia de las centrales nucleares y reduciendo así uno de los problemas de las mismas.

Como cualquier aplicación industrial humana, las aplicaciones nucleares generan residuos, algunos muy peligrosos. Sin embargo, los generan en volúmenes muy pequeños comparados con otras aplicaciones, como la industria petroquímica, y de forma muy controlada. Los residuos más peligrosos generados en la fisión nuclear son las barras de combustible, en las que se generan isótopos que pueden permanecer radiactivos a lo largo de miles de años. Los elementos transuránidos como el curio, el neptunio o el americio son los de mayor preocupación.

También se generan residuos de alta actividad que deben ser vigilados, pero que tienen vidas medias cortas, es decir, duran pocos años y pueden ser controlados. Existen, sin embargo, estrategias para tratar algunos de los residuos de forma más eficiente. Una de ellas se basa en el uso de centrales nucleares de nueva generación (Sistemas Asistidos por Aceleradores o ADS en inglés) usando torio como combustible adicional que degradan los desechos nucleares en un nuevo ciclo de fisión asistida y pasan como una alternativa viable para las necesidades energéticas de la población ante la dependencia del petróleo.

También existen métodos de aprovechamiento de algunos de los residuos peligrosos mediante el reciclado, separando los isótopos que pueden aprovecharse en aplicaciones médicas o industriales.

El tratamiento de los combustibles de fisión, en cualquier caso pasa por el almacenamiento de los residuos que no pudieran ser eliminados en cuevas profundas, los llamados almacenamientos geológicos profundos (AGP) donde el objetivo final es que queden enterrados con seguridad durante varios miles de años aunque esto no puede garantizarse. Otro problema asociado a los reactores de fisión es la susceptibilidad de ser objetivos de los terroristas, igual que lo pueden ser otras instalaciones que fabrican productos tóxicos. Sin embargo, estas instalaciones poseen niveles de seguridad más elevados que la mayoría del resto de instalaciones industriales.

1.20.1 Armas Nucleares.

Las bombas nucleares (bomba atómica) y termonucleares, se fundamentan en una reacción de fisión explosiva y se emplearon por primera vez en Hiroshima y Nagasaki, durante la Segunda Guerra Mundial. Después de la Segunda Guerra Mundial se desarrolló una segunda generación de bombas termonucleares, llamadas bombas de hidrógeno, más potentes y destructivas que las de fisión, que se fundamentan en reacciones de fusión de hidrógeno pesado activadas por una reacción de fisión previa (fecha de la primera detonación de una bomba de hidrógeno: 1 de noviembre de 1952).

Más tarde, a partir del año 1974, se construyeron las llamadas bombas de neutrones, con menor capacidad explosiva aunque con radiación intensiva de neutrones. Con esta generación de bombas nucleares se pretendía disponer de un arma capaz de matar o inhabilitar a las tropas enemigas, con sólo una destrucción limitada de las infraestructuras en el radio de acción de la bomba.

Una bomba desprende su energía de manera abrupta, creando una intensa concentración de calor; aún unos pocos kilogramos, de los cuales sólo una pequeña parte experimenta fisión, pueden destruir una ciudad. Tal desprendimiento repentino no se logra fácilmente. Tecnología bastante sofisticada es necesaria, de otra manera el calor desprendido inicialmente en la reacción en cadena de la fisión, esparrama el combustible y detiene el proceso.

Un reactor nuclear nunca puede explotar como una bomba. Lo más que puede hacer es explotar como un calentador de vapor sin válvulas de seguridad, o más adecuadamente, su combustible se puede fundir convirtiéndose en escoria, como pasó en Three Mile Island. Los reactores con fallas ciertamente pueden ser peligrosos, dado que contienen productos de fisión intensamente radiactivos. Sin embargo, ellos no se pueden convertir en bombas nucleares.

La fisión rápida hace factibles a las bombas (así como reactores de "emisión más rápida", de los cuales Francia ha construido dos). Su reacción en cadena es amortiguada por el isótopo U^{238} , de manera que, contrario al combustible en una estación de energía, donde aún el uranio natural (0.7% de U^{235}) puede ser usado, el utilizado en una bomba debe ser altamente enriquecido en U^{235} . O de otra manera, el plutonio, elemento producido artificialmente, es utilizado, el cual se extrae como un subproducto de los reactores nucleares.

El enriquecimiento es un proceso difícil y costoso, usando centrifugadores de gas o grandes separadores magnéticos, o también usando grandes arreglos de difusión de gas. El plutonio, por otro lado, requiere sólo métodos químicos para separarlo de los productos de fisión altamente radiactivos encontrados en combustible de reactor ya utilizado. Debido a la radiación mortal, tal separación es siempre realizada a control remoto. La posibilidad de que se puedan construir bombas nucleares del plutonio extraído de plantas de energía comerciales ha sido la motivación principal de los esfuerzos internacionales para controlar el crecimiento de tecnología de energía nuclear.

Aún con el combustible purificado, no es fácil construir una bomba nuclear. Una "masa crítica" de combustible es necesaria, y debe ser ensamblada muy rápidamente, de hecho, comprimida a un volumen menor, para permitir que suficiente material de él reaccione antes de que su calor generado destruya todo.

La primera "bomba atómica" lanzada en Japón en 1945, era un cañón de armas modificado, en el cual un pedazo de U^{235} era disparado hacia otro pedazo. Las bombas de plutonio necesitan ser ensambladas aún más rápido y comprimidas aún más, de manera que una carga explosiva esférica haga implosión sobre una esfera de combustible en su centro. La tecnología para hacer esto involucra los secretos nucleares más celosamente controlados, y por supuesto una fuente de neutrones debe ser provista para iniciar la reacción en cadena durante el microsegundo crítico de mayor compresión.

De esta manera los peores temores que despierta la "Amenaza nuclear" pueden ser controlados de una forma disciplinada y con las más altas medidas de seguridad, que este proceso requiere.

1.20.2 Tratado de No Proliferación Nuclear.

El Tratado de No Proliferación Nuclear (NPT, *Nuclear Non-Proliferation Treaty*, en inglés) es un tratado abierto a la firma el 1 de julio de 1968 que restringe la posesión de armas nucleares. La gran mayoría de los estados soberanos (188) forman parte del tratado. Sólo a cinco estados parte se les permite en el tratado la posesión de armas nucleares: los Estados Unidos (firmante en 1968), el Reino Unido (1968), Francia (1992), la Unión Soviética (1968, sustituida en la actualidad por Rusia), y la República Popular de China (1992). La condición especial de estos cinco países, llamados Estados Nuclearmente Armados (NWS o *Nuclear Weapons States*) se definió a partir de que eran los únicos estados que habían detonado un ensayo nuclear hasta 1967. Ellos son también los cinco miembros permanentes del Consejo de Seguridad de Naciones Unidas.

Principales artículos.

El tratado constituye un sistema basado en tres pilares fundamentales: La no-proliferación, el desarme y el uso pacífico de la energía nuclear.

Por el artículo I, los Estados Nuclearmente Armados (NWS) se comprometen a no transferir tecnología nuclear ni tecnología sobre armas nucleares a otros países, ni tampoco a asistir en el desarrollo de tales armas, bajo ninguna circunstancia.

Por el artículo II los Estados No Nuclearmente Armados (NNWS) se comprometen a no tratar de desarrollar armas nucleares y por el artículo III a someterse al régimen de salvaguardias totales de la Agencia Internacional de la Energía Atómica (IAEA ó *International Atomic Energy Agency*), el cuerpo regulador nuclear de Naciones Unidas.

El artículo VI rescata el derecho inalienable de todos los estados a desarrollar la energía nuclear para fines pacíficos y en concordancia con los artículos I y II.

El artículo VI y el preámbulo indican que los Estados Nuclearmente Armados se comprometen de buena fe a iniciar negociaciones para la reducción y liquidación de sus arsenales nucleares. Después de más de 30 años, esto ha quedado tan sólo en una promesa. En el artículo I, los Estados Nuclearmente Armados declaran que "no inducirán a ningún Estado No Nuclearmente Armado a adquirir armas nucleares". La doctrina del ataque preventivo así como otras posturas amenazantes pueden ser vistas como una inducción por las partes no nuclearizadas. El artículo X establece que cualquier estado puede retirarse del tratado si considera que existen "eventos extraordinarios", tales como una "percepción de amenaza", que les fuerzan a hacerlo así.⁶²

Cuadro 1. Estados firmantes del tratado.

Alemania	Colombia	Indonesia	Myanmar	Samoa
Afganistán	Comoras	Irán	Namibia	San Marino
Albania	Corea del Sur	Iraq	Nauru	Príncipe
Andorra	Costa de Marfil	Irlanda	Nepal	Senegal
Angola	Costa Rica	Islas Marshall	Nicaragua	Serbia y Montenegro
Antigua y Barbuda	Croacia	Islas Salomón	Níger	Seychelles
Arabia Saudí	Cuba	Islandia	Nigeria	Sierra Leona
Argelia	Dinamarca	Italia	Noruega	Singapur
Argentina	Dominica	Jamaica	Nueva Zelanda	Siría
Armenia	Ecuador	Japón	Omán	Somalia
Australia	Egipto	Jordania	Países Bajos	Sri Lanka
Austria	El Salvador	Kazajistán	Palau	Sudáfrica
Azerbaiyán	Emiratos Árabes Unidos	Kenya	Panamá	Sudán
Bahamas	Eritrea	Kiribati	Papúa Nueva Guinea	Suecia
Bahrain	Eslovaquia	Kirguistán	Paraguay	Suiza
Bangladesh	Eslovenia	Kuwait	Perú	Suriname
Barbados	España	Laos	Polonia	Swazilandia
Bélgica	Estados Federados de Micronesia	Lesotho	Portugal	Tailandia
Belice	Estados Unidos	Letonia	Qatar	Tanzania
Benín	Estonia	Líbano	Reino Unido	Tayikistán
Bielorrusia	Etiopía	Liberia	República Centrafricana	Timor Oriental
Bolivia	Fiji	Libia	República Checa	Togo
Bosnia-Herzegovina	Filipinas	Liechtenstein	República de Macedonia	Tonga
Botswana	Finlandia	Lituania	República del Congo	Túnez
Brasil	Francia	Luxemburgo	República Democrática del Congo	Turkmenistán
Brunéi	Gabón	Madagascar	República Dominicana	Turquía
Bulgaria	Gambia	Malasia	Ruanda	Tuvalu
Burkina Faso	Georgia	Malawi	Rumania	Ucrania
Burundi	Ghana	Maldívas	Rusia	Uganda
Bután	Grecia	Malí	San Cristóbal y Nieves	Uruguay
Cabo Verde	Granada	Malta		Uzbekistán
Camboya	Guatemala	Marruecos		Vanuatu
Camerún	Guayana Francesa	Mauricio		Vietnam
Canadá	Guinea	Mauritania		Venezuela
Ciudad del Vaticano	Guinea-Bissau	México		Yemen
Chad	Guinea Ecuatorial	Moldavia		Yibuti
Chile	Honduras	Mónaco		Zambia
China	Hungría	Mongolia		Zimbabwe
Chipre		Mozambique		

FUENTE: No-proliferación para la seguridad global. 2010

62 No-proliferación para la seguridad global. <http://npsglobal.org/> consultada el 28 de Marzo del 2010.

Los cinco Estados Nuclearmente Armados han hecho promesa de no utilizar armas nucleares contra Estados No Nuclearmente Armados, salvo en respuesta a un ataque nuclear o un ataque con armas convencionales en alianza con un Estado Nuclearmente Armado. De cualquier forma, estas promesas no han sido formalmente incorporadas al Tratado, y los detalles concretos han cambiado con el tiempo.

Estados fuera del tratado.

Cuatro estados, India, Pakistán, Israel y Corea del Norte se encuentran fuera del tratado, los tres primeros nunca lo han firmado, mientras que Corea del Norte renunció en 2003. India, Pakistán e Israel poseen armas nucleares y, tal cual el texto actual, de acceder al tratado deberían hacerlo como los Estados No Nuclearmente Armados (NNWS), por lo cual deberían desmantelar sus arsenales. Estos países argumentan que el Tratado de No Proliferación crea de hecho un club de países "Nuclearmente ricos" y un gran grupo de países "Nuclearmente pobres" mediante la prohibición de la posesión legal de armas nucleares a aquellos países que las habían probado antes de 1967, pero que el tratado no explica sobre qué fundamentos éticos es válida esta distinción.

Corea del Norte ratificó el tratado, pero revocó su firma en 2003 tras una disputa con los inspectores sobre "inspecciones de instalaciones nucleares no declaradas". Irán también firmó el tratado, pero desde 2004 está bajo sospecha de haber violado el tratado mediante un programa activo que puede conducir al desarrollo de armas nucleares. La AIEA está investigándolo.

En agosto de 2004, oficiales de inteligencia y expertos no-gubernamentales de Estados Unidos concluyeron que los esfuerzos diplomáticos realizados para prevenir la proliferación de armas nucleares en Irán y Corea del Norte habían fracasado.

1.21 Energía nuclear en México.

A principios de la década de los 50, diversos científicos mexicanos comenzaron a promover el uso de la energía nuclear para diversos fines. Uno de los principales promotores fue el doctor Nabor Carrillo Flores, quien representó a México en la prueba atómica del atolón de Bikini en 1946, además de que fue nombrado asesor técnico de la delegación de México en la comisión sobre Energía Atómica para uso pacífico de la ONU.

El doctor Carrillo Flores, rector de la UNAM de 1953 a 1961, así como otros científicos, impulsaron la creación de la Comisión Nacional de Energía Nuclear (CNEN), cuya fundación se dio en 1956, con el objetivo de regular las aplicaciones energéticas y no energéticas, así como los estudios en ciencias nucleares.

En 1972, la CNEN cambió su nombre a Instituto Nacional de Energía Nuclear y en 1979, con la emisión de la ley Nuclear, la institución se transformó para crear la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (que se encuentra en Salazar, Estado de México) y la Comisión Nacional de Energía Atómica, la cual, nunca entró en función. Fue también en 1972 cuando el gobierno federal consideró la energía nuclear como una alternativa para la generación de electricidad.

En ese año, comenzó la construcción de la central nuclear Laguna Verde, núcleo-eléctrica cuya apertura se retrasó durante varios años, hasta que en 1990 se inauguró en la ciudad de Alto Lucero, a unos 80 km al noroeste de la capital de Veracruz.

Cuadro 2. Información básica de la central nuclear Laguna Verde.⁶³

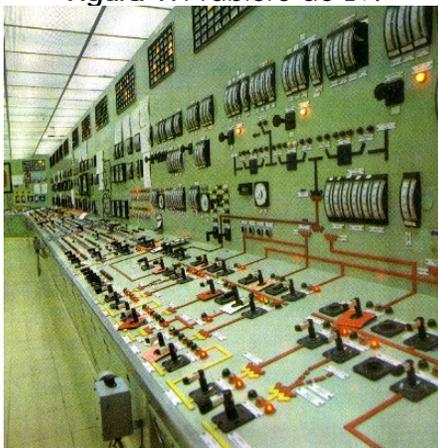
Configuración

La central consta de 2 unidades, cada una con capacidad de 682.44 MWe, equipadas con reactores del tipo Agua Hirviente (BWR-5), y contenciones tipo MARK II de ciclo directo. El sistema nuclear de suministro de vapor fue adquirido a General Electric y el Turbogenerador a Mitsubishi Heavy Industries.

Figura 16. Laguna Verde.



Figura 17. Tablero de LV.



Desde su Operación Comercial, la **Unidad 1** ha generado mas de **78.9 Millones de MWh**.

Desde su Operación Comercial, la **Unidad 2** ha generado mas de **59.2 Millones de MWh**,

Ambas Unidades representan el 2.74% de la capacidad instalada de CFE (incluye productores independientes de energía); con una contribución a la generación del 4.61%.

FUENTE: <http://www.cfe.gob.mx/es/LaEmpresa/generacionelectricidad/nucleoelectlagverde/>

⁶³ CFE, 2007. <http://www.cfe.gob.mx/es/LaEmpresa/generacionelectricidad/nucleoelectlagverde>