	<p>CINVESTAV</p> <p>DOCTORADO EN CIENCIAS</p> <p>ESPECIALIDAD EN DESARROLLO CIENTIFICO Y TECNOLÓGICO PARA LA SOCIEDAD</p> <p>PROGRAMA DE POSGRADO TRANSDISCIPLINARIO</p>
---	--

Examen Predoctoral

Proyecto:

ESTUDIO DE UN SISTEMA SECTORIAL DE INNOVACION DE LA
TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA EN MEXICO

Presenta:

Carlos Norberto Reyes

Directores:

Dra. Claudia González Brambila
Dr. Yasuhiro Matsumoto Kuwabara

Asesores:

Dr. Jaime Álvarez Gallegos (Programa DCTS)
Dr. David Elías Viñas (Programa DCTS)
Dr. Humberto Merritt Tapia (Externo - CIECAS IPN)

Índice

- 1.0 Introducción.
- 2.0 Antecedentes.
 - 2.1 Consumo de productos energéticos.
 - 2.2 Crisis petrolera.
 - 2.3 Cambio climático.
 - 2.4 Plan Energético Mexicano.
 - 2.5 Sector Eléctrico Mexicano.
 - 2.6 Generación de energía con tecnología fotovoltaica.
 - 2.7 Sistemas de Innovación.
 - 2.7.1 Sistema de innovación sectorial.
 - 2.7.2 Medición de los sistemas de innovación.
- 3.0 Justificación.
- 4.0 Objetivo.
- 5.0 Metodología.
- 6.0 Hipótesis de Trabajo
- 7.0 Aportaciones esperadas.
- 8.0 Cursos optativos
- 9.0 Cronograma de actividades futuras.
- 10.0 Referencias.

1.0 Introducción.

Este trabajo tiene como objeto servir de base para la presentación de examen predoctoral para obtener del grado de Doctor en Ciencias con especialidad en Desarrollo Científico Tecnológico para la Sociedad. La tesis de este trabajo esta titulada como “Un Sistema Sectorial de Innovación de la Tecnología Fotovoltaica en México”.

La estructura que sigue este documento es la siguiente: en primera instancia se hace un breve resumen de la problemática para dar fundamento a esta propuesta, este marco teórico tiene como propósito exhibir la problemática energética mundial y nacional, además del problema mundial causado al ambiente por la generación de energía a través de hidrocarburos que se conoce como cambio climático, que se le atribuye a la emisión de gases de efecto invernadero arrojados a la atmósfera. Del estudio de estos temas es claro que los temas sobre diversificación energética, eficiencia y ahorro energético tienen tiempo en el análisis global y nacional, estos conceptos toman importancia a partir de la crisis petrolera de 1973. Sin embargo, las tendencias en el uso de hidrocarburos para la generación de energía y su continua emisión de gases de efecto invernadero no han cambiado desde que el paradigma sobre medios alternos de generación se puso en discusión, es más la tendencia de crecimiento de emisiones de bióxido de carbono a la atmósfera crece de manera exponencial.

Siguiendo con los fundamentos para el trabajo de investigación se da una breve perspectiva de la situación mundial del desarrollo de la tecnología fotovoltaica. En las ultimas dos décadas el crecimiento de este sector tecnológico ha sido exponencial a nivel global focalizado en países cuyos niveles de insolación son bajos comparados con el país. México contribuye poco en la generación fotovoltaica a pesar de que se considera que las condiciones son favorables para una mayor explotación de este medio de generación de energía.

Posteriormente, se introduce una herramienta conceptual que ha mostrado ser útil para estudiar la complejidad en los procesos de aprendizaje entre los generadores de conocimiento y los usuarios de dicho conocimiento que es el concepto de sistemas de innovación. Se hace una breve exposición de este concepto en especial del sistema sectorial el cual se eligió para esta propuesta. Un objetivo del análisis de estos sistemas es el establecimiento de estrategias y políticas que fomenten ambientes innovadores. También se expone brevemente indicadores que son utilizados para evaluar los niveles de innovación de una región los cuales se pretende utilizar en esta propuesta de investigación.

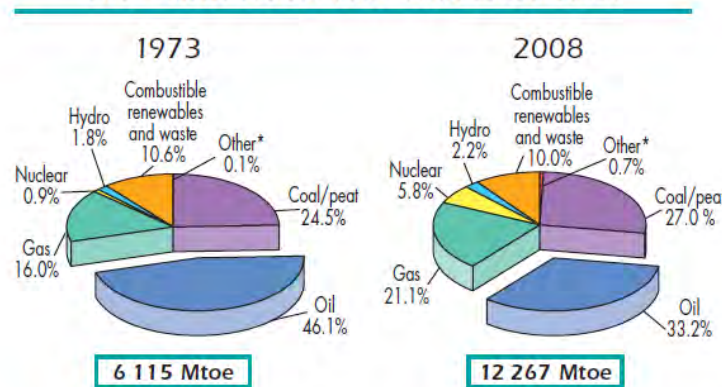
Se finaliza este documento de trabajo con la exposición de la metodología que básicamente es el modelo conceptual del sistema sectorial de innovación propuesto por Maleaba (2004), aplicando dimensiones recomendadas por Godhino e indicadores utilizados en la Unión Europea para evaluar el grado innovador de los países. Los objetivos y las aportaciones esperadas tienen que ver con la obtención de los resultados que este sistema nos permite obtener a través de su estudio que en resumen tiene que ver con conocer los procesos de aprendizaje y la complejidad de los procesos así como las interacciones entre los actores del sector en estudio.

2.0 Antecedentes.

2.1 Consumo de productos energéticos.

Los productos energéticos se clasifican como primarios o secundarios, los primarios son aquellos que se captan directamente de los recursos naturales (petróleo crudo, carbón mineral duro y gas natural); y los secundarios son producidos a partir de los productos primarios (electricidad, carbón vegetal, productos petroleros). Los productos energéticos primarios se clasifican a su vez en combustibles de origen fósil y productos energéticos renovables.

Gráfica. 1 Distribución de productos energéticos en el mundo.
1973 and 2008 fuel shares of TPES



*Other includes geothermal, solar, wind, heat, etc.

Fuente: International Energy Agency (2010) *Key World Energy Statistics 2010*; Paris, France; p.6

En la grafica 1 elaborada por la Agencia Internacional de Energía (2010), se muestra la situación energética mundial en dos momentos, durante la crisis petrolera de 1973 y en el 2008 (prácticamente cuarenta años después); Se puede apreciar que la base principal de explotación de productos energéticos se ha mantenido básicamente constante; esta base está constituida por petróleo, gas y carbón.

También se observa una ligera tendencia a la disminución del consumo de petróleo y un aumento de gas, aunque en general la base principal de productos que en 1973 era de 86.6%, para el 2008 fue de 81.3%, es prácticamente la misma con una ligera variación. No ocurre así con la demanda total de productos energéticos que prácticamente se duplicó en este periodo pasando de 6,115 Mtoe¹ (millones de toneladas equivalentes de petróleo, por sus siglas en ingles) a 12,267 Mtoe.

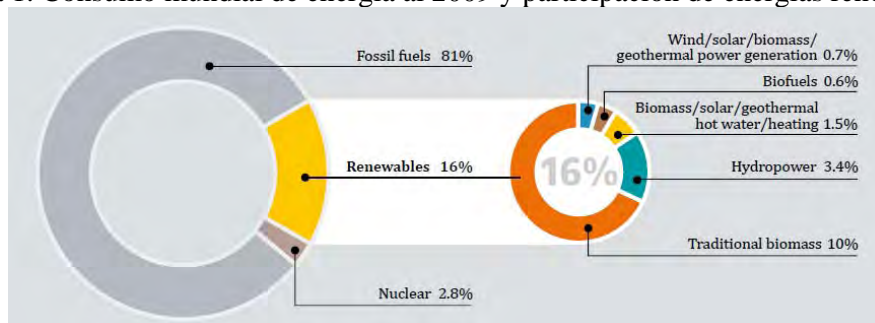
Con base en lo anterior si los elementos que conforman la base principal de productos energéticos se ha mantenido y la demanda se ha duplicado, ello implica que la dependencia mundial en explotación de productos energéticos de origen fósil en vez de decaer por el contrario se ha duplicado en este periodo. Además implica un aumento en la generación de gases de efecto invernadero arrojados a la atmósfera (las emisiones mundiales de CO₂ en 1971 fueron: 14,096.3 millones de toneladas, las emisiones mundiales en 2008 fueron: 29,381.4 millones de toneladas²).

¹ Toe: unidad de energía, su valor equivale a la energía que hay en una tonelada de petróleo.

² International Energy Agency (2010), *CO2 Emissions from fuel combustion, Highlights*. Paris, France p.44

Para el 2009, la situación siguió sin ningún cambio, los productos de fuentes fósiles siguieron ocupando más del 80% del consumo energético mundial. A pesar de que la comunidad internacional, a partir de la crisis petrolera de 1973, comenzó a hablar de optimización de consumo, uso eficiente de energía y de diversificación energética, temas que están en la agenda internacional, y que siguen en proceso de desarrollo, no se observa cambio importante en el uso de fuentes fósiles.

Figura 1. Consumo mundial de energía al 2009 y participación de energías renovables.

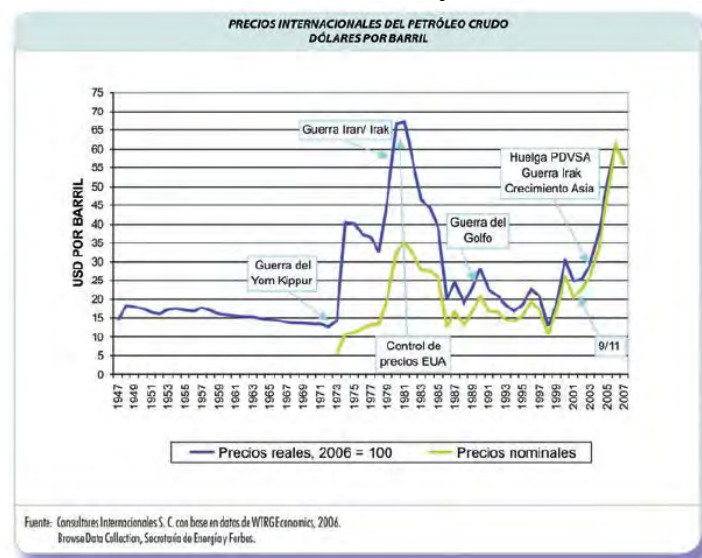


Fuente: REN 21 (2011), *Renewables 2011 Global Status Report*. (Paris REN21 Secretariat); p. 17. REN21:Renewables Energy Policy Network for the 21st Century.

2.2 Crisis petrolera.

Las expectativas de reserva de combustible fósil, antes de 1973, eran justificante para la explotación y empleo intensivo. Sin embargo, la crisis mundial de 1973, debido a un conflicto internacional, llevó a una restricción en el suministro de petróleo que triplicó los precios en pocos meses (el consumo de crudo incremento a nivel mundial en 1.3% por año entre el 1974 y el 2004, en tanto que creció 7.8% por año en el periodo de 1918-1973³).

Gráfica 2. Precios de petróleo



Fuente: Gerardo Gil Valdivia et. al. (2008), *La crisis del petróleo en México*; Foro Consultivo Científico y Tecnológico; México; p.111.

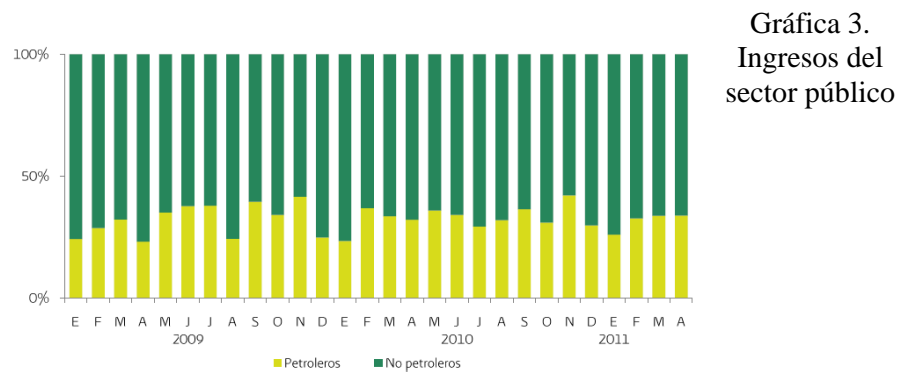
³ Krichene (2002, 2006), citado en: Sergio D. Bazán Perkins y José L. Fernández Zayas (2008)

Esta escalada en los precios originó que en este periodo (principios de los 70's), en el país y a nivel global, florecieran propuestas en vías de una diversificación energética que disminuyera la dependencia energética en petróleo⁴. A la par aparecieron las ideas de optimización de consumo y uso eficiente de energía. También ante este suceso los consumidores de petróleo se aliaron y a partir de 1974 surge, en el seno de la organización OCDE, la Agencia Internacional de Energía (IEA).

En México, en la mesa de discusión se encontraba otra variable importante; y es que se ha sostenido, en gran medida, la estabilidad económica en la venta de petróleo; En 1975, México contribuyó a la estabilización y reducción del precio del petróleo incrementando las exportaciones de crudo. Sin embargo, en los ochentas, en México, como en América Latina, ocurrió lo que se conoce como la “década perdida” una época de recesión y miseria derivada de la caída de los precios de barril de petróleo. En el periodo de 1980-82, a nivel mundial se estableció un sistema de cuotas (de producción de barriles) para afrontar el problema, sistema que no fue suficiente. En México empezaron a resaltar, entre otros, los problemas siguientes:^{5, 6}

- La dependencia de las finanzas públicas en la venta de petróleo.
- El consumo energético dependiente de hidrocarburos.
- Endeudamiento, derivado de los puntos anteriores, con tasas variables y volátiles.

Para la década de los 90's, el precio del petróleo se mantuvo en un rango constante. A finales de esta década, y a partir del 2000, la tendencia en los precios fue a la alza, similar a lo ocurrido en la época de los 70's. En México se dieron cambios estructurales en los 90's para afrontar los retos de una ‘economía petrolizada’⁷ (tales como el establecimiento de tratados comerciales), sin embargo a la fecha, después de cuarenta años, la dependencia de las finanzas públicas en la venta de petróleo y el consumo energético dependiente en hidrocarburos sigue estando en discusión porque para el sector público sus ingresos provenientes de petróleo representan aproximadamente el 33.8% de sus ingresos totales (82.0 miles de millones de pesos)⁸.



Fuente: SENER (2011), *Cifras destacadas del sector energético*; México; p. 2.

⁴ Sergio D. Bazán Perkins y José L. Fernández Zayas (2008). *Evaluation of Mexico's 1975–2000 energy plan*, Energy Economics 30, pp 2569-2586. ScienceDirect. Elsevier.

⁵ Gerardo Gil Valdivia et al. (2008). *La crisis del petróleo en México*; Foro Consultivo Científico y Tecnológico; México; p.89.

⁶ Sergio D. Bazán Perkins y José L. Fernández Zayas (2008); *Op Cit.*

⁷ Gerardo Gil Valdivia et. al. (2008); p.97; *Op Cit.*

⁸ SENER (2011), *Cifras destacadas del sector energético*; México; p. 2.

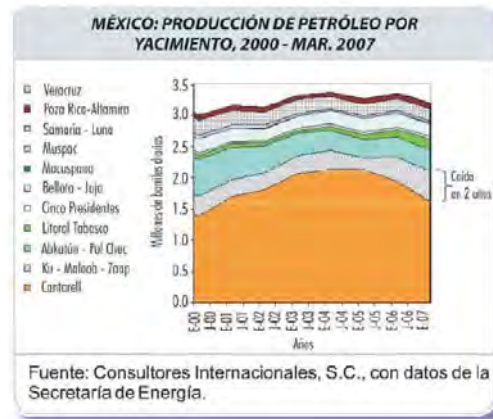
La bonanza del petróleo en México se remonta a principios del siglo veinte. Se promulga la Ley del Petróleo en la época de Porfirio Díaz, los yacimientos del país a principios del siglo pasado resultaron ser de los más productivos a nivel mundial. En 1937 el conflicto entre el sindicato petrolero y las compañías petroleras extranjeras llevó a que el 18 de Marzo de 1938, el presidente Lázaro Cárdenas decretara la expropiación petrolera y el 7 de Junio del mismo año se constituye Petróleos Mexicanos (PEMEX) como el organismo del estado encargado de la explotación, desarrollo y administración de los hidrocarburos en México.

PEMEX tuvo un impacto positivo en el desarrollo de la industria petrolera, con exploración y producción de petróleo y gas, hasta refinación y petroquímica. Sin embargo en la actualidad PEMEX enfrenta los siguientes problemas⁹, entre otros:

- Un régimen fiscal excesivo.
- Disminución de reservas petroleras.
- Escasez de financiamiento para el desarrollo (industrial y de exploración-nuevos yacimientos-)
- Tecnología para exploración en aguas profundas.

Gráfica 4. Producción de petróleo por yacimiento

Fuente: Gerardo Gil Valdivia et.al. (2008), *La crisis del petróleo en México*; Foro Consultivo Científico y Tecnológico; México; p.93



Una de las consecuencias del uso de la renta petrolera para financiar el gasto público son las importaciones crecientes de petrolíferos y petroquímicos. Además un punto importante lo resalta Bazán-Barrón¹⁰ quienes introducen la variable de los intereses partidistas, menciona que “*el valor económico de las reservas de petróleo es manipulado por intereses políticos de partido, con poca atención a consideraciones técnicas*”. En el país, se han solicitado créditos internacionales con garantías virtuales de reservas petroleras, es decir se ha exagerado en la cantidad de reservas reales para respaldar las solicitudes de crédito.

La producción de crudo decreció 5.1% anual entre 2004-2009¹¹. México sigue dependiendo básicamente de los hidrocarburos en el sector energético aunque éste es un bien finito, lo que ha dado paso a una discusión energética, resaltan los puntos de reservas de hidrocarburos y del tiempo estimado de explotación de los yacimientos actualmente existentes, asuntos que permiten el paso a especulaciones.

⁹ Gerardo Gil Valdivia et. al. (2008); p. 33-40. *Op Cit.*

¹⁰ Bazán-Barrón, (1994) citado en: Sergio D. Bazán Perkins y José L. Fernández Zayas (2008) *Op Cit.*

¹¹ SENER (2010), *Estrategia Nacional de Energía*; México; p.13

Tabla 1. Reservas de hidrocarburos

RESERVAS AL 31 DE DICIEMBRE DE 2008 (Miles de millones de barriles de petróleo crudo equivalente)						RESERVAS DE HIDROCARBUROS Y TASA DE RESTITUCIÓN, 2001-2008					
Año	Reservas ^{1/} (Miles de millones de barriles de petróleo crudo equivalente)			Incorporación de reservas 3P por descubrimiento (millones de barriles de petróleo crudo equivalente)	Tasa de restitución integrada de reservas probadas 1P ^{2/} (%)	Tasa de restitución integrada de reservas ^{3/} (%)					
	1P	2P	3P								
2001	30.8	42.7	53.0	215.7	n.d.	-114.4					
2002	20.1	37.0	50.0	611.8	n.d.	-93.6					
2003	18.9	34.9	48.0	708.8	25.5	-25.5					
2004	17.6	33.5	46.9	916.2	22.7	30					
2005	16.5	32.3	46.4	950.2	26.4	69					
2006	15.5	30.8	45.4	966.1	41.0	35.7					
2007	14.7	29.9	44.5	1,053.2	50.3	44.3					
2008	14.3	28.8	43.6	1,482.1	71.8	36.6					

RESERVAS AL 31 DE DICIEMBRE DE 2008 (Miles de millones de barriles de petróleo crudo equivalente)					
	14.3	14.5	28.8	14.7	43.6
	Probadas	Probables	2P	Posibles	3P
Participación porcentual:					
Crudo:	72.7	71.5	72.1	68.9	71.0
Condensados y líquidos de planta:	10.2	8.6	9.4	9.0	9.3
Gas natural seco:	17.1	19.9	18.5	22.1	19.7

FUENTE: Petróleos Mexicanos.

^{1/} Al 31 de diciembre de cada año. Se define 1P como reserva probada; 2P es la suma de reserva probada más probable; y 3P es la suma de reserva probada más la probable más la posible.

^{2/} Se refiere a todas las variaciones de reservas probadas generadas por descubrimientos, delimitaciones, desarrollo y revisiones, divididos entre la producción en un periodo de tiempo determinado.

^{3/} Se refiere al resultado de dividir la suma del volumen de hidrocarburos incorporado por descubrimiento, más desarrollos y delimitaciones, más revisiones, entre la producción extralda en un periodo de tiempo determinado.
n. d. No disponible.

FUENTE: Petróleos Mexicanos.

Fuente: SENER, *Tercer informe de labores*; p. 18.

Se identifican dos riesgos importantes: garantizar el desarrollo sustentable del país así como la seguridad energética a corto y largo plazo. Ante esto se han impulsado cambios en vías de una Reforma Energética (Decretos en el Diario Oficial de la Federación el 28 de noviembre del 2008) y se han establecido programas para el ahorro energético, sin embargo estas acciones realizadas, aunque necesarias, no son suficientes.

Tabla 2. Programas institucionales de ahorro de energía
AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR PROGRAMAS INSTITUCIONALES, 2007-2009
(Millones de kilowatts-hora)

Concepto	Periodo 1º de enero de 2007 al 30 de junio de 2009	Datos anuales			Enero-Junio		
		Observado		Meta 2009	2008	2009 ^{p/}	Variación % anual
		2007	2008				
Total	57,048	21,441	23,188	29,941	11,594	12,558	8.3
Normalización de la Eficiencia Energética	48,506	17,963	19,714	21,936	9,857	10,968	11.3
Instalaciones industriales, comerciales y de servicios públicos	3,099	1,012	1,316	4,087	658	771	17.2
Horario de Verano	3,108	1,278	1,230	1,425	615	600	-2.4
Sector Domestico	2,336	1,188	928	2,493	464	220	-52.6

p/ Cifras preliminares. Los datos reales a 2009 estarán disponibles hasta mayo de 2010.

FUENTE: SENER con información de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía.

Fuente: SENER, *Tercer informe de labores*; p. 91.

2.3 Cambio climático.

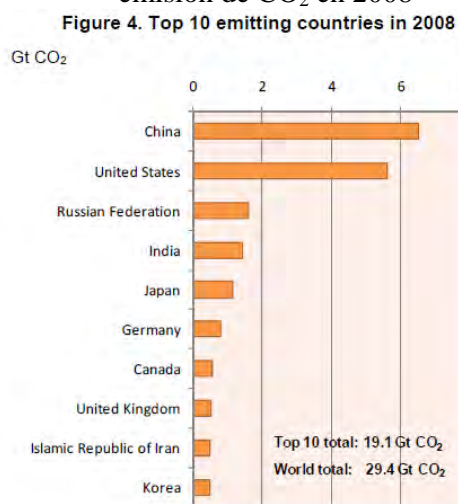
Se ha vinculado la relación entre el cambio climático y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera, emisión que se produce, entre otros, al consumir y producir energía (65% del total de las emisiones mundiales)¹². El cambio climático tiene la característica de ser global (gráfico 5) y de manifestarse progresivamente. Dicho cambio tiene repercusiones tanto en la naturaleza (variación de las condiciones para la flora y fauna), como en el ámbito económico (inundaciones, sequías, pérdida de ganado y cosechas) y en el ámbito social de las naciones (migraciones, muertes por inundaciones o por ondas de calor).¹³

Los cambios en el clima se dan como consecuencia de romper el balance de energía recibida y emitida, o en la distribución de esta energía en la tierra¹⁴.

Estos cambios en el clima se presentan invariablemente de forma natural, sin embargo, la actividad humana ha acelerado estos cambios¹⁵. En la gráfica 6 se muestran los sectores de emisión de GEI mundial al 2008, entre ellos: el sector de generación eléctrica y de calor (41%), el de transporte (22%), el industrial (20%) y el residencial (7%).

Ante el cambio climático, el acuerdo mundial es limitar el aumento de la temperatura en 2° C, bajo el acuerdo de Copenhague. Para este efecto los países firmantes se comprometen a reducir sus

Gráfica 5. Los diez países con mayor emisión de CO₂ en 2008

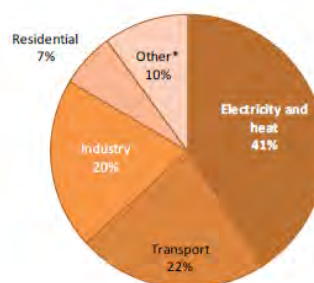


Key point: The top 10 emitting countries account for about two-thirds of the world CO₂ emissions.

Fuente: International Energy Agency (2010), *CO₂ Emissions from fuel combustion, Highlights*. Paris France; p.9.

Gráfica 6. Emisiones de CO₂ por sector en 2008

Figure 5. World CO₂ emissions by sector in 2008



* Other includes commercial/public services, agriculture/forestry, fishing, energy industries other than electricity and heat generation, and other emissions not specified elsewhere.

Fuente: International Energy Agency (2010), *CO₂ Emissions from fuel combustion, Highlights*, Paris France; p.9.

¹² International Energy Agency (2010), *CO₂ Emissions from fuel combustion, Highlights*, Paris France; p. 17.

¹³ Julia Martínez y Adrián Fernández (2004), *Cambio Climático una visión desde México*, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología; México; p. 11.

¹⁴ Ibidem, p. 18-19.

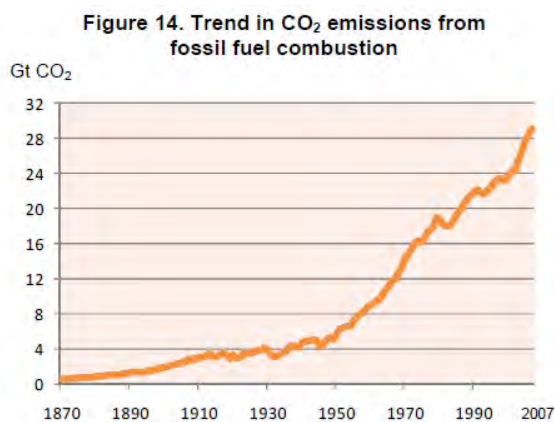
¹⁵ Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2009), *Cambio climático. Ciencia, evidencia y acciones*, México; p. 2.

emisiones de GEI. El reto es cómo evolucionar o revolucionar el sector de energía para lograr este objetivo¹⁶.

A partir de los 70's, la emisión de CO₂ proveniente de la combustión de fuentes fósiles se ha disparado de manera exponencial como se observa en la gráfica 7. La demanda energética crece a la par que el uso de fuentes fósiles para su generación.

México, como el resto de Latinoamérica, no ha agotado sus vertidos de CO₂ a la atmósfera (pactadas en el protocolo de Kyoto, 2005), además la nación ratificó el UNFCCC (United Nation Framework Convention on Climate Change) en 1993, e implementó un Programa de Acción Nacional contra el Cambio Climático en 1997.

Gráfica 7. Tendencia de crecimiento de CO₂



Source: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., United States.

Fuente: Fuente: International Energy Agency (2010), *CO₂ Emissions from fuel combustion, Highlights*. Paris France; p.19.

Así como también se ratificó el Protocolo de Kyoto en el 2010, además de concretar su propuesta de establecer un Fondo Verde Internacional durante en la Cop16 realizada en Cancún en el 2010. Además que el cambio climático es un problema global, México se ha propuesto tomar acciones para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero.

2.4 Plan Energético Mexicano

A partir del cambio con respecto a la energía sobre su fuente y uso, después de 1973, en México la energía nuclear tomó importancia a partir del primer embargo petrolero en el 73 y hasta la mitad de los 80's, las plantas termoeléctricas basadas en ciclo combinado de gas surgieron como productores preferenciales de electricidad¹⁷.

En 1976, la Secretaria del Patrimonio Nacional (SePaNal) presentó el programa "Una propuesta de directrices de política energética", el propósito: enmendar las causas que motivaron la crisis del 71-74. Al mismo tiempo, se intentaba garantizar una autosuficiencia energética y una viabilidad económica del sector eléctrico. Se aplicó un modelo económico para este estudio, integrando cuestiones energéticas nacionales e internacionales, tales como exportación de crudo e importación de gas¹⁸. Acorde con el plan, el sistema eléctrico mexicano consistiría de 73.5% de plantas de energía no fósiles

¹⁶ International Energy Agency (2010). *World Energy Outlook 2010 Resumen Ejecutivo*, Paris France; OECD; IEA; p 13-16.

¹⁷ Nakata, (2002, 2004); Ferenc y Hans-Holger, (2006), citado en: Sergio D. Bazán Perkins y José L. Fernández Zayas (2008) *Op Cit*.

¹⁸ Eibenschutz et al., (1976), citado en: Sergio D. Bazán Perkins y José L. Fernández Zayas (2008) *Op Cit*

(del cual, 55% nuclear y 18.5% renovable) y el remanente, el 26.5%, dependería de fuentes fósiles (16.5% carbón mineral y 10% de hidrocarburos)¹⁹.

Gráfica 8. Propuesta de expansión del sector eléctrico en México 1976

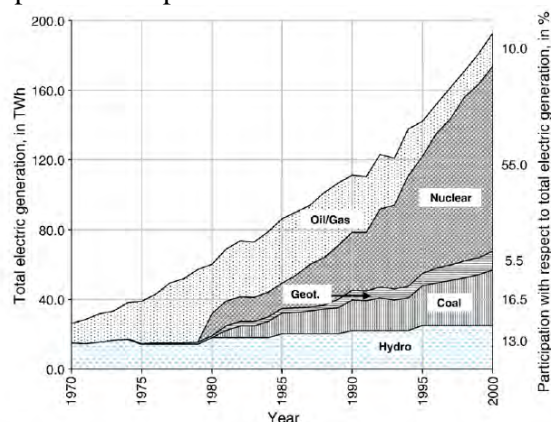


Fig. 1. Proposal for the expansion electric power generation in Mexico 1976 (elaborated with data of Eibenschutz et al., 1976; CEFP, 2001).

Fuente: Bazán-Perkins, Sergio D. (2008), *Evaluation of Mexico's 1975–2000 energy plan*. Energy Economics 30, p. 2569-2586. Science Direct,

También en 1976, el gobierno mexicano publicó un plan de suministro energético a 25 años, en el cual el desarrollo de plantas de combustibles no fósiles era recomendado, la base para este plan eran consideraciones ambientales. Bajo este programa, la dependencia de México en combustibles para generación eléctrica se reduciría gradualmente por dos medios: fuentes renovables de energía y, en mayor grado, energía nuclear. El problema radicó en la continuidad, ya que este plan no fue asumido por los sucesivos gobiernos. Las acciones de los políticos encargados del sector energético en el corto plazo, en principio viables, significaron a largo plazo el colapso de la economía.²⁰ Se requería, entonces como ahora, inversión para diversificar la oferta energética y para formar recursos humanos.

Durante el periodo de mediados de los 70's y principios de los 80's, la política de expansión del sector eléctrico se mantuvo condicionada al consumo de petróleo, el resultado fue que el país incrementó su dependencia económica y energética en el crudo. Un análisis de Monteforte²¹ del sector eléctrico mexicano, en el periodo 70-80's mostraba que uno de los impedimentos para la diversificación energética fue debido a acuerdos entre autoridades gubernamentales y el sindicato de trabajadores.

La dependencia fiscal en el petróleo continuó y en diciembre de 1994 se mostró las consecuencias de basar los créditos en cantidades irreales de reservas de petróleo. Las reservas reportadas por PEMEX eran 64,000 millones de barriles, en realidad eran menores de 25,000 millones. El sucesivo déficit en la cuenta pública llevó al endeudamiento y a la crisis económica de 1994.²²

¹⁹ Sergio D. Bazán Perkins y José L. Fernández Zayas (2008) *Op Cit.*

²⁰ Eibenschutz et al., (1976), citado en: Sergio D. Bazán Perkins y José L. Fernández Zayas (2008) *Op Cit.*

²¹ Monteforte, (1991) citado en: Sergio D. Bazán Perkins y José L. Fernández Zayas (2008) *Op Cit.*

²² Bazán-Perkins, Sergio D. (2008), *Evaluation of Mexico's 1975–2000 energy plan*. Energy Economics 30, p. 2569-2586. Science Direct

Un análisis de un plan para México, con la visión de un futuro limpio, fue llevado a cabo por Manzini y Martínez (1999). Básicamente elaboraron escenarios a futuro. Para “integrar análisis específicos de tendencias, eventos posibles y situaciones deseables”. Manzini y Martínez (2003), establecen que “la viabilidad económica de las fuentes de energía renovable para el sector eléctrico ocurrirán a largo plazo”. Para ellos en aquel momento un escenario basado en gas natural era lo mas rentable y apropiado²³. Hoy la tendencia a sustituir el petróleo por gas está en curso, a la par que las importaciones de gas, sin embargo esto sigue amenazando la seguridad energética a futuro.

Gráfica 9. Capacidad instalada de plantas termoeléctricas y reservas probadas de petróleo crudo (1991-2005).

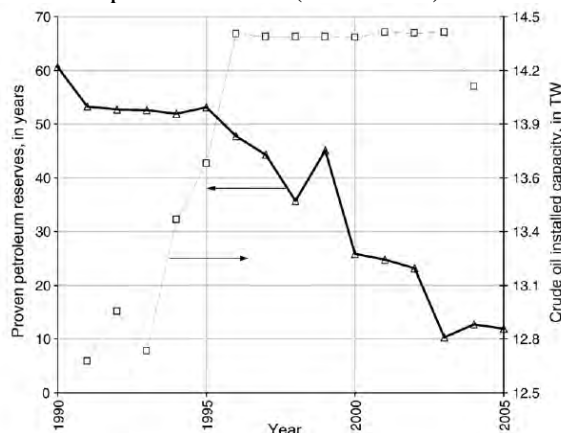


Fig. 4. Installed capacity of thermoelectric plants based on oil and proven reserves of crude oil in Mexico in years, from 1991 to 2005 (elaborated with data of EIA, 2006; INEGI, 2006).

Fuente: Sergio D. Bazán-Perkins (2008), *Evaluation of Mexico's 1975–2000 energy plan*. Energy Economics 30, p. 2569-2586. Science Direct,

Huacuz (2005) propuso seis elementos estratégicos para eliminar las barreras que no permiten el desarrollo de fuentes de energía renovable en México²⁴:

- Habilitar políticas y marcos regulatorios.
- Una adecuada y efectiva configuración institucional y técnica.
- Mecanismos de financiamiento apropiados.
- Concertar planes de acción entre los sectores gubernamentales.
- Mecanismos que faciliten la participación del sector público y privado.
- Una coordinación efectiva entre los actores interesados nacionales e internacionales.

Para el 2010 la Secretaría de Energía da a conocer la Estrategia Energética Nacional 2010, ratificada por el H. Congreso de la Unión en este documento se enmarcan los ejes rectores de esta estrategia: **seguridad energética, eficiencia económica y productiva, y sustentabilidad ambiental**. En este plan, programado para un plazo de quince años, se resalta la importancia de la *participación integrada de los diferentes actores*

²³ Manzini y Martínez (1999, 2003) citado en Sergio D. Bazán Perkins y José L. Fernández Zayas (2008) *Op Cit.*

²⁴ Jorge M. Huacuz (2005). *The road to green power in Mexico—reflections on the prospects for the large-scale and sustainable implementation of renewable energy*. Energy Economics 30, pp. 2569-2586 Science Direct. Elsevier.

involucrados'. Se intenta virar el ritmo hacia eficiencia y sustentabilidad sin descuidar la necesidad energética del país, ni tampoco el desarrollo económico y social. Se desea ampliar la participación de las energías renovables a la par de la eficiencia energética. Sin embargo, los objetivos planteados son cuestionados por los académicos que señalan que en la mayoría de las veces estos objetivos no están sustentados en evidencias que justifiquen los alcances propuestos.

2.5 Sector Eléctrico Mexicano.

El país cuenta con más de 112 millones de habitantes, con un consumo energético que crece de manera sostenida a una tasa de 2.6% (de 1998 al 2008)²⁵. Para el 2008 la generación eléctrica para el servicio público en México ascendió a 235,871 GWh (giga watt hora), de los cuales el 65.8% se realizó con base en hidrocarburos²⁶.

Tabla 3. Consumo Nacional de Energía Eléctrica, 1998-2008.

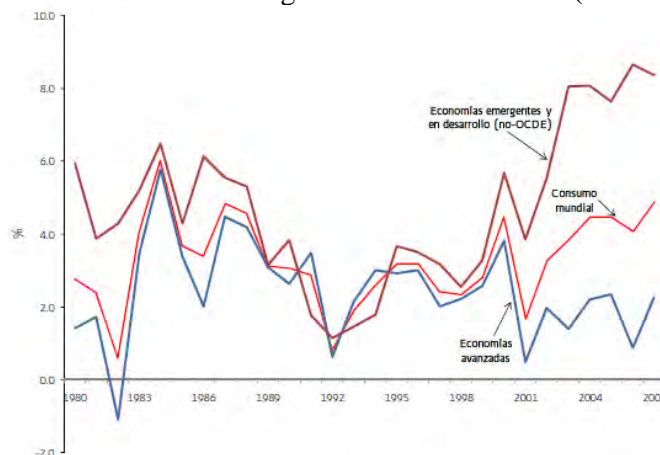
Concepto	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	tmca (%) 1998-2008
Consumo nacional	146,288	155,860	166,376	169,270	172,566	176,992	183,972	191,339	197,435	203,638	207,859	3.6
variación (%)	5.2	6.5	6.7	1.7	1.9	2.6	3.9	4.0	3.2	3.1	2.1	
Ventas Internas	137,209	144,996	155,349	157,204	160,203	160,384	163,509	169,757	175,371	180,469	183,913	3.0
variación (%)	5.3	5.7	7.1	1.2	1.9	0.1	1.9	3.8	3.3	2.9	1.9	
Autoabastecimiento	9,079	10,864	11,027	12,066	12,363	16,608	20,463	21,582	22,064	23,169	23,946	10.2
variación (%)	3.5	19.7	1.5	9.4	2.5	34.3	23.2	5.5	2.2	5.0	3.4	

Fuente: CFE.

Fuente: SENER (2009), *Prospectiva del Sector Eléctrico 2009-2024*; México, p.75.

Las variaciones porcentuales de consumo de energía eléctrica de las economías avanzadas están alrededor del 2% (gráfica 10), en tanto que en países emergentes y en desarrollo el consumo tiene una tendencia a la alza de más de 8%. El crecimiento de consumo de energía eléctrica está ligado a la actividad económica, el incremento moderado en consumo representa estabilidad y madurez en los mercados.²⁷

Gráfica 10. Consumo mundial de energía eléctrica 1980-2007 (variación porcentual).



Fuente: *Electricity Information 2009, Energy Balances of OECD Countries 2009, Energy Balances of Non-OCDE Countries 2009*; International Energy Agency.

Fuente: SENER (2009), *Prospectiva del Sector Eléctrico 2009-2024*; México, p.19.

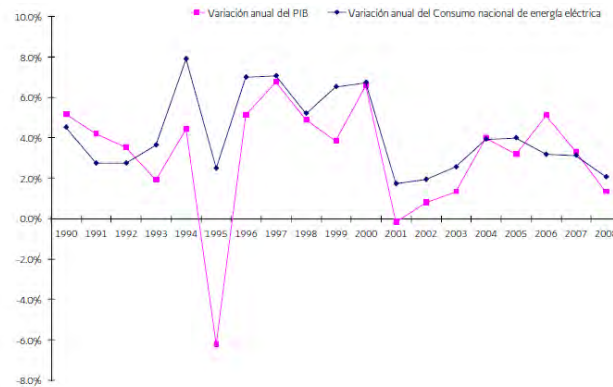
²⁵ SENER (2010), *Estrategia Nacional de Energía*; México, p. 26.

²⁶ *Ibíd.*, p.20.

²⁷ SENER (2009), *Prospectiva del Sector Eléctrico 2009-2024*; México p.19.

En la gráfica 11 se muestra la correlación que se observa entre el producto interno Bruto PIB (principal indicador de actividad económica) y el consumo de energía eléctrica en el país. Las turbulencias en el escenario nacional y mundial se reflejan en la actividad económica y en el consumo energético. En la gráfica se observa las afectaciones por la crisis económica de 1994 en el país y la crisis global por terrorismo en 2001. En esta gráfica no se refleja la caída de los mercados a partir del 2008 que prácticamente paralizó la actividad económica mundial con su repercusión en el consumo energético.

Gráfica 11. Evolución histórica del PIB y consumo nacional de energía eléctrica 1990-2008 (%).



Fuente: INEGI y CFE.

Fuente: SENER (2009), *Prospectiva del Sector Eléctrico 2009-2024*; México, p 76.

En la figura 2, se muestran las cinco zonas en que se divide el país para su manejo estadístico del mercado nacional de energía. Posteriormente en la gráfica 12 se muestra la distribución de la capacidad efectiva instalada nacional en base a las regiones en que está dividido el mercado nacional. Se observa claramente, en la gráfica 12, que la mayor capacidad efectiva instalada corresponde a la generación con termoeléctricas, ciclo combinado e hidroeléctrica; la participación de las fuentes alternas (en este caso: geotérmica, eólica y nuclear) es relativamente baja.

Figura 2. Regionalización estadística del mercado nacional de energía eléctrica.

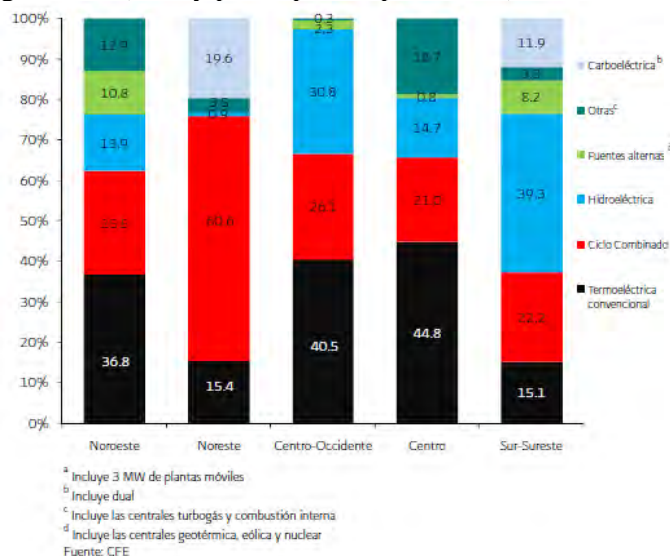


Fuente: Sener, con base en Presidencia de la República.

Fuente: SENER (2009), *Prospectiva del Sector Eléctrico 2009-2024*; México, p. 80.

Las fuentes fósiles en el país al 2008 representaban 91% de la producción total de **energía primaria** (62% petróleo, 27% gas natural, se presenta una sustitución gradual de petróleo por gas natural). La participación de fuentes que se consideran limpias se encuentra en 5% de la producción de energía primaria (incluye grandes hidroeléctricas, nuclear y renovables).²⁸

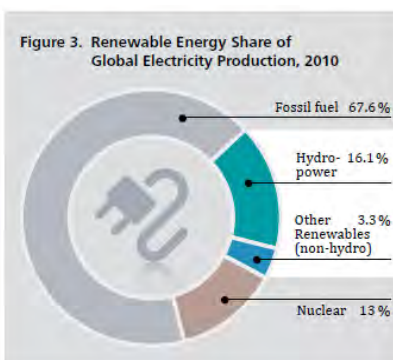
Gráfica 12. Distribución de la capacidad efectiva instalada nacional de cada región por tecnología, 2008 (MW y participación porcentual) Total= 51,105 MW^a



Fuente: SENER (2009), *Prospectiva del Sector Eléctrico 2009-2024*; México, p. 98.

La capacidad instalada de energías renovables en el país no crece, a pesar del discurso político en favor del combate al cambio climático y de las pocas reformas para impulsar las energías renovables en el país; y aunque la inversión en energías renovables en el mundo alcanzó los 211 billones de dólares al 2010²⁹, la producción de electricidad a nivel global sigue dependiendo de los hidrocarburos (gráfica 13).

Gráfica 13. Participación de las energías renovables en la producción de energía eléctrica mundial al 2010.



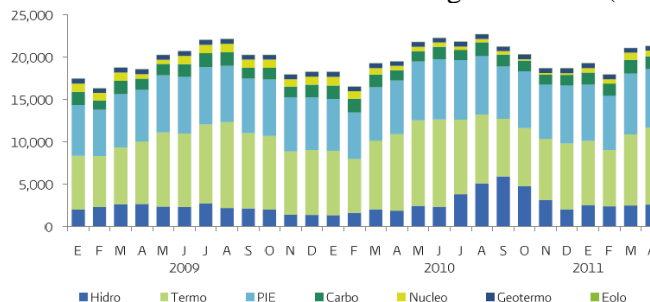
Fuente: REN 21, 2011. *Renewables 2011 Global Status Report*. (Paris REN21 Secretariat), p.18
REN21:Renewables Energy Policy Network for the 21st Century.

²⁸ SENER (2010), *Estrategia Nacional de Energía*; México.

²⁹ REN 21 (2011). *Renewables 2011 Global Status Report*. (Paris REN21 Secretariat), p.11.

Dentro de las metas que se pretenden alcanzar en el país, que se plasmaron en la Estrategia Nacional Energética 2010 y que involucran al sector eléctrico, se encuentran: un margen de *reserva de electricidad* de 22%, mantener en 8% las *pérdidas de electricidad*, cubrir en un 98.5% la *demanda* del país, además de tener una capacidad de generación eléctrica de 35% con *tecnologías limpias* y un *ahorro* de un punto porcentual anual en el consumo final de energía (280TWh-tera watt hora). Al ritmo al que crecen las energías renovables en el país, el 35% planeado se ve complicado de alcanzar, sin considerar que la turbulencia futura en los mercados, tan solo en este año, 2011, han contraído la inversión, inversión que en el caso de las renovables de por si ya es escasa en el país.

Gráfica 14. Generación Bruta de Energía Eléctrica (GWh)



Fuente: Sistema de Información Energética (SIE), con información de CFE.

Fuente: SENER (2011), *Cifras destacadas del sector energético Abril del 2011*, p. 6.

Tabla 4. Generación bruta de electricidad 1999-2011

SECTOR ELÉCTRICO NACIONAL
GENERACIÓN BRUTA 1/
(Gigawatts-hora)

Años	Hidro eléctrica	Termo eléctrica	PEE's 2/	Duales 3/	Carbo eléctrica	Nucleo eléctrica	Geotermo eléctrica	Eolo eléctrica	Total
1999	32,712	103,089	-	11,234	18,251	10,002	5,623	6	180,916
2000	33,075	111,956	1,295	13,569	18,696	8,221	5,901	8	192,721
2001	28,435	117,106	4,590	14,109	18,567	8,726	5,567	7	197,106
2002	24,862	108,466	21,852	13,879	16,152	9,747	5,398	7	200,362
2003	19,753	103,864	31,645	13,859	16,681	10,502	6,282	5	202,590
2004	25,076	94,512	45,855	7,915	17,883	9,194	6,577	6	207,019
2005	27,611	93,226	45,559	14,275	18,380	10,805	7,299	5	217,160
2006	30,305	84,432	59,428	13,875	17,931	10,866	6,685	45	223,568
2007	27,042	83,354	70,982	13,375	18,101	10,421	7,404	248	230,927
2008	38,892	79,185	74,232	6,883	17,789	9,804	7,056	255	234,096
2009	26,445	83,856	76,496	12,299	16,886	10,501	6,740	249	233,472
2010	36,738	81,584	78,442	15,578	16,485	5,879	6,618	166	241,491
2011	10,105	25,915	27,214	5,858	5,887	2,812	2,126	37	79,954
Enero	2,540	5,860	6,644	1,748	1,421	509	572	11	19,305
Febrero	2,413	5,423	6,384	1,249	1,384	733	510	7.6	18,102
Marzo	2,526	6,976	7,284	1,417	1,600	856	540	12.0	21,210
Abril	2,625	7,656	6,902	1,445	1,483	715	505	6.2	21,337

Fuente: www.cfe.gob.mx

Tabla 5. Sector Eléctrico Nacional – Generación Bruta (Gigawatts-hora)

Año	Hidro-	Termo-	Productor Externo	Dual	Carbo-	Núcleo-	Geotermo-	Eolo-	Total
2010	36,738	81,584	78,442	15,578	16,485	5,879	6,618	166	241,490
	15.21%	33.78%	32.48%	6.45%	6.83%	2.43%	2.74%	0.07%	100%

Las tecnologías marcadas con un guión al final tienen la terminación eléctrica, ejem. Hidro- = Hidroeléctrica

Elaboración: propia con datos de CFE.

La apuesta fuerte del país, como ha ocurrido desde los 70's, en el sector eléctrico es de ciclo combinado, se desea impulsar la energía nuclear y últimamente aunque en menor grado la tecnología eólica. Las energías renovables presentan inconvenientes para garantizar una continuidad en el servicio eléctrico tales como: localización (eólica requiere vientos) o de intermitencia (solar: durante el día), de aquí se parte para pensar en una alternativa que sirva de base como es el caso de la energía nuclear, sin embargo el asunto de los desechos radiactivos aún no se ha resuelto favorablemente.

El problema es el consumo de hidrocarburos requerido para la generación de energía eléctrica; aunque el consumo de combustóleo va a la baja para la generación eléctrica el consumo de gas ha repuntado para este uso (tabla 6 y gráfica 15). Las opciones para sustituir las fuentes fósiles por otro tipo de energías limpias dependen en parte de las características y recursos particulares que pueda explotar cada país, los gobiernos locales siguen representando el mayor promotor de la generación y uso de las energías renovables.

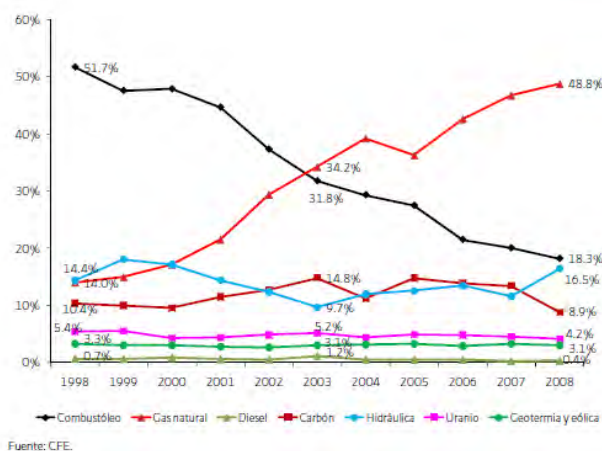
Las energías renovables experimentaron una recesión en 2009, sin embargo continuaron su crecimiento en el 2010 en los siguientes sectores: energía, calor y transporte; su participación representó 16% del consumo final mundial. Una fuerza de impulso de las renovables es su potencial para fomentar nuevas industrias y nuevos empleos. Del total generado en suministro eléctrico mundial aproximadamente 20% fue con energías renovables. Un dato a resaltar es el hecho de que la capacidad solar fotovoltaica se agregó en más de 100 países durante el 2010.³⁰

Tabla 6. Consumo de combustibles
SECTOR ELÉCTRICO NACIONAL
CONSUMO DE COMBUSTIBLES

Años	Combustóleo (Miles de Barriles)	Diesel (Miles de Barriles)	Carbón (Miles de Toneladas)	Gas Natural (Millones de Pies ³) 1_/
1999	133,900	2,851	9,468	269,388
2000	144,017	4,087	9,630	322,058
2001	138,072	2,845	11,398	366,791
2002	118,818	2,262	12,179	350,657
2003	102,637	4,151	13,881	335,592
2004	95,919	2,362	11,489	310,857
2005	94,255	2,185	14,917	281,928
2006	75,668	2,354	14,697	307,520
2007	71,998	1,356	14,762	321,113
2008	66,781	1,697	10,837	345,593
2009	60,826	2,553	13,682	370,387
2010	57,170	2,402	14,694	378,229

Fuente: www.cfe.gob.mx

Gráfica 15. Participación por combustible y fuente primaria en la generación bruta del servicio público 1998-2008 (%).



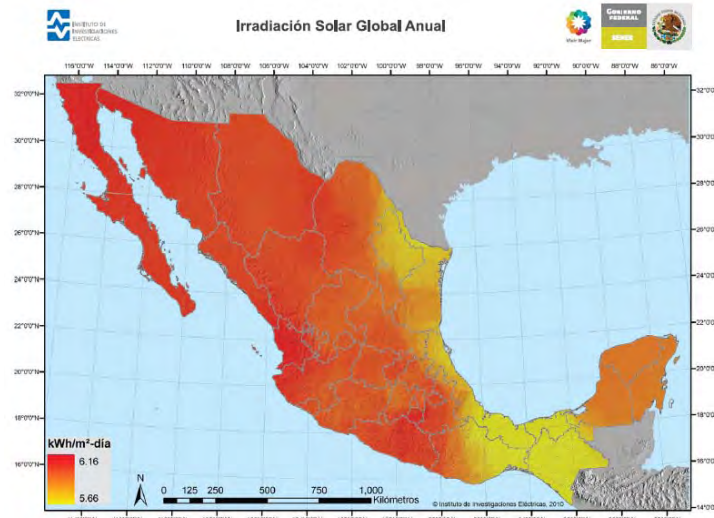
Fuente: SENER (2009), *Prospectiva del Sector Eléctrico 2009-2024*; México, p 104.

³⁰ REN 21 (2011). *Renewables 2011 Global Status Report*. (Paris REN21 Secretariat), p.11.

2.6 Generación de energía con tecnología fotovoltaica.

México cuenta con condiciones naturales favorables para la explotación de sistemas fotovoltaicos, en muchas partes de su extenso territorio la radiación solar promedio es el doble de, por ejemplo, los países de Europa, tal como Alemania que actualmente es uno de los mayores mercados fotovoltaicos en el mundo. La radiación solar en el país tiene un promedio de densidad de 5kWh/m^2 al día. A pesar de este potencial en México ha sido escasamente explotada hasta ahora esta tecnología.

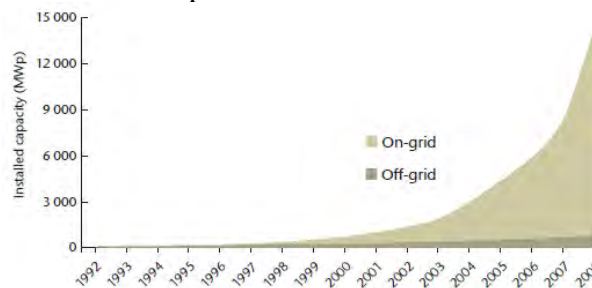
Figura 3. Radiación solar en el territorio mexicano ($\text{kWh/m}^2\text{-día}$)



Fuente: Instituto de Investigaciones Eléctricas 2010.

En el exterior la tecnología fotovoltaica muestra un prominente futuro con un crecimiento exponencial; En el periodo del 2000 al 2008 el mercado fotovoltaico creció con un promedio anual de 40%³¹. Las inversiones en tecnología fotovoltaica también han crecido sin embargo se espera que se nivelen con bienes sustitutos, esto como consecuencia del desarrollo de las tecnologías y de las economías de escala. La capacidad mundial instalada paso de 0.1 GW en 1992 a poco mas de 14 GW en 2008³².

Gráfica 16. Acumulado de la capacidad fotovoltaica mundial instalada (1990-2008)



Fuente: OECD/IEA (2010), *Technology Roadmap, Solar Photovoltaic Energy*; International Energy Agency. Paris, Francia. p.9.

³¹ OECD/IEA (2010), *Technology Roadmap, Solar Photovoltaic Energy*; Internacional Energy Agency. Paris Francia. p.9.

³² Ibidem p.9.

México tuvo una oportunidad de poder ser líder en este ramo tecnológico. A mediados de 1970 y principios de 1980 se tiene registros de los esfuerzos por parte de la comunidad académica del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional por desarrollar esta tecnología a nivel comercial con la consolidación de una planta piloto para fabricación de celdas y módulos fotovoltaicos³³. Las instalaciones de la planta piloto que opero en esos años, actualmente existen como un símbolo del esfuerzo por desarrollar “industria” nacional y por combatir la dependencia tecnológica, aunque también es un ejemplo de la complejidad que rodea la transferencia y comercialización de tecnología. Como se muestra en la gráfica 17 el crecimiento del suministro de energía con tecnología fotovoltaica se remonta a finales de 1990.

Gráfica 17. Desarrollo Histórico del suministro de energía de energía renovable (fotovoltaico) de 1971 al 2008



Adaptado de: Tomar Edenhofer, et al. (released on line agosto 2011) Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation (SRREN); Mitigation of Climate Change; Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC.

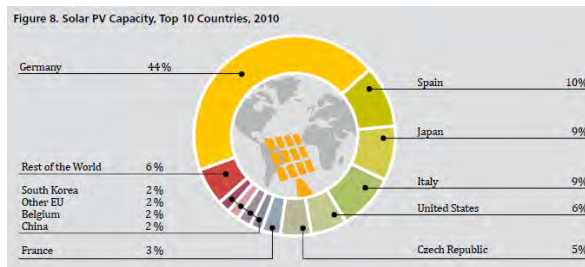
Cuatro países rebasaron la cuota de 1GW de capacidad fotovoltaica acumulada instalada en 2008; Alemania con 5.3GW, España con 3.4GW, Japón con 2.1GW y los Estados Unidos con 1.2GW. Estos representaban aproximadamente el 80% de la capacidad mundial instalada.³⁴ Al 2010 los cinco países al frente en capacidad fotovoltaica fueron:

Capacidad mundial 40 GW

1 Alemania	17.3 GW
2 España	3.8 GW
3 Japón	3.6 GW
4 Italia	3.5 GW
5 Estados Unidos	2.5 GW

El caso que resalta es la Republica Checa q paso de una capacidad de cero en 2008 a 2GW en 2010.

Gráfica 18. Distribución mundial de capacidad fotovoltaica al 2010.



Fuente: REN 21,(2011), *Renewables 2011 Global Status Report*. (Paris REN21 Secretariat), p.23.
REN21: Renewables Energy Policy Network for the 21st Century.

³³ Reporte No. LES-CIP-77-01, (1977), *Perspectivas de generación de energía eléctrica en el medio rural mexicano empleando convertidores directos de la energía solar*. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Departamento de Ingeniería Eléctrica. México, D. F. DIE 77.1

³⁴ OECD/IEA (2010), *Technology Roadmap, Solar Photovoltaic Energy*; Internacional Energy Agency. Paris Francia. p. 10

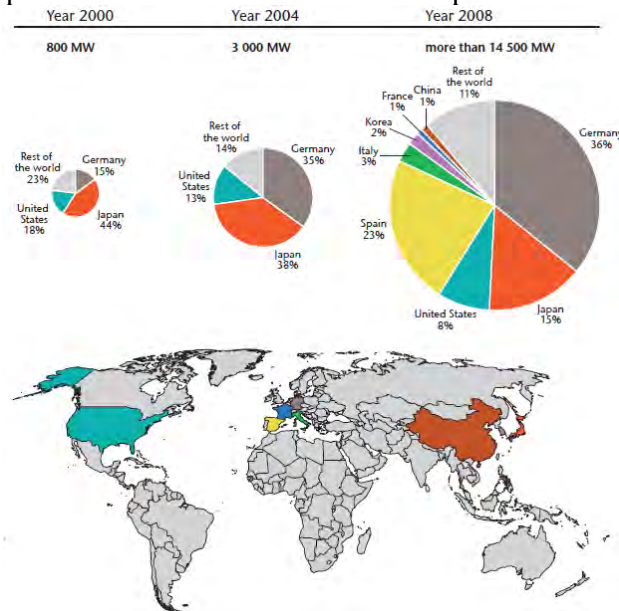
Tabla 7. Crecimiento de la capacidad fotovoltaica mundial 2008-2010

Indicador	unidad	2008	2009	2010
Capacidad fotovoltaica instalada	GW	16	23	40
Producción anual de celdas fotovoltaicas	GW	6.9	11	24

Adaptado de: REN 21 (2011), *Renewables 2011 Global Status Report*. (Paris REN21 Secretariat), p.15.

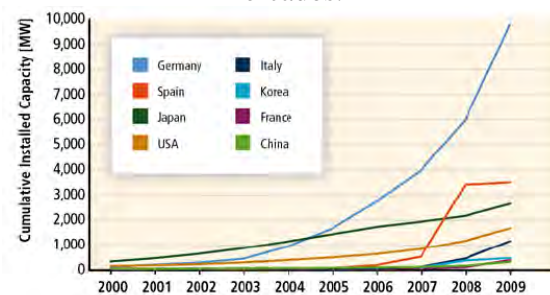
Resalta el crecimiento de capacidad que ha experimentado la tecnología fotovoltaica en el mundo en contraste con lo que ocurre en el país, en donde es escaso el aprovechamiento del abundante recurso solar con que contamos. El asunto no solo tiene que quedar en cuestiones de retornos de inversión, sino considerar el crecimiento sustentable y la seguridad energética a futuro. Los países que continúan al frente en las posiciones de capacidad instalada y en inversión en proyectos de este tipo son países no petroleros.

Figura 4. Capacidad fotovoltaica instalada en los países líderes (2000-2008).



Fuente: OECD/IEA (2010), *Technology Roadmap, Solar Photovoltaic Energy*; International Energy Agency. Paris, Francia. p. 10.

Gráfica 19. Capacidad fotovoltaica instalada para los años 2000-2009 en ocho mercados.



Fuente: D. Arvizu. et. al. (2011), *Technical Summary*. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, Estados Unidos. P. 47.

No es casualidad que estos cinco países que se mueven en los primeros lugares de capacidad fotovoltaica instalada inviertan en este recurso energético. Los temas de seguridad energética, cambio climático y desarrollo sustentable son retos que fueron reconocidos por los ministros de los países que integran el G8 (Alemania, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Japón, Reino Unido y Rusia), además de China, India y Sur Corea en junio del 2008, con la esperanza de reducir en 50% las emisiones de CO₂ para el año 2050³⁵

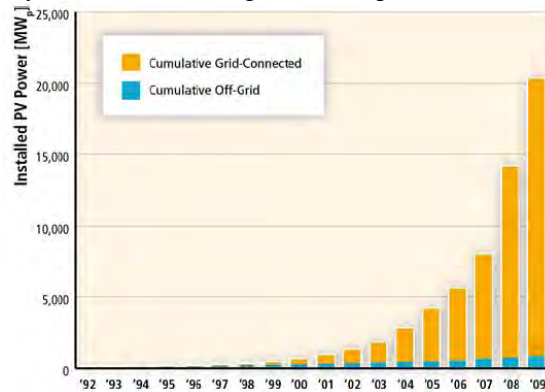
Dentro de las ventajas de la tecnología fotovoltaica se encuentran: el aprovechamiento de un recurso natural no finito, ya que se convierte la energía solar en energía eléctrica, por ende es una opción de seguridad energética; es considerada una tecnología cero emisiones, no arroja gases de efecto invernadero a la atmósfera lo que contribuye a reducir las cuotas de CO₂ que han acelerado el cambio climático; es de fácil mantenimiento y puede contribuir al desarrollo socio-económico, en general contribuye al desarrollo sustentable.

Se debe considerar los siguientes hechos importantes con respecto a la tecnología fotovoltaica:

- La energía solar es un recurso abundante en la tierra y en el país.
- La generación fotovoltaica puede jugar un papel relevante en el desarrollo de una economía baja en carbono.
- La tecnología fotovoltaica esta comercialmente disponible.
- Es una tecnología que ha demostrado su confiabilidad.
- Su difusión esta ligada a los temas de interconexión a la red, almacenamiento de energía, políticas favorables, innovaciones y costos de instalación.
- Los precios de la tecnología fotovoltaica se hacen cada vez más competitivos con el paso del tiempo.
- La tecnología fotovoltaica provee 0.1% de la generación total global de electricidad.³⁶

La mayoría de los esquemas de iniciativas para la tecnología fotovoltaica se concentran en los sistemas de conexión a la red.

Gráfica 20. Tendencia histórica de la capacidad instalada fotovoltaica de sistemas con conexión a la red (grid-connected) y sin conexión (off-grid) en los países de la OECD.



Fuente: D. Arvizu. et. al. (2011), *Direct solar energy*. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, Estados Unidos. p. 27.

³⁵ OECD/IEA (2010), *Technology Roadmap, Solar Photovoltaic Energy*; Internacional Energy Agency. Paris Francia. p.5.

³⁶ Ibidem, p.5.

La conversión fotovoltaica se realiza a través de un dispositivo semiconductor, una celda fotovoltaica, para obtener electricidad de corriente continua (usualmente entre 50-200watts). Con la unión de celdas se obtienen módulos fotovoltaicos y el arreglo con módulos se conoce como panel fotovoltaico. Un sistema fotovoltaico aparte del arreglo con módulos se acompañan de otros dispositivos, tales como: inversores, baterías, componentes eléctricos, un sistema de montaje, etc.

Los módulos fotovoltaicos comerciales pueden ser divididos en dos grandes categorías: obleas de silicio (c-Si) y de película delgada. La Agencia Internacional de Energía estima que el mercado esta compuesto por módulos de silicio cristalino con una participación de mercado global de entre 85-90%, estos módulos de silicio se subdividen en dos categorías principales: monocristalino (sc-Si) y policristalino (mc-Si). El resto del mercado 10-15% esta compuesto por la tecnología de película delgada que a su vez puede subdividirse en: silicio amorfo (a-Si) y microamorfo (a-Si/ μ c-Si); telurio de cadmio (CdTe); y cobre-indio-diseleniuro (CIS) y cobre-indio-galio-diseleniuro.³⁷

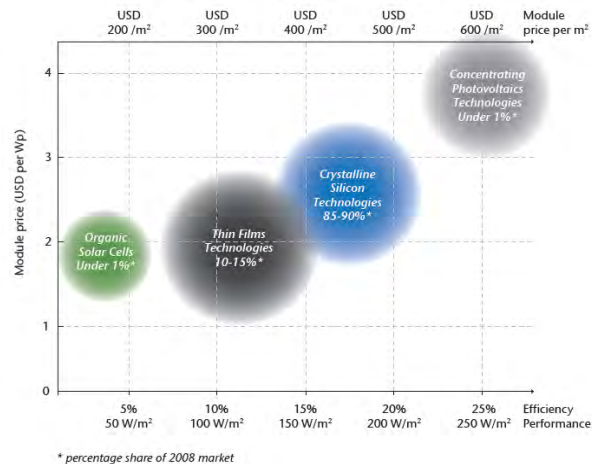
Tabla 8. Eficiencia de las diferentes categorías de tecnología fotovoltaica comercial.

Oblea de silicio (c-Si)		Película Delgada		
sc-Si	mc-Si	a-Si;a-Si/ μ c-Si	CdTe	CIS/CIGS
14-20%	13-15%	6-9%	9-11%	10-12%

Adaptado de: OECD/IEA (2010), *Technology Roadmap, Solar Photovoltaic Energy*; International Energy Agency. Paris Francia. p.8.

Las combinaciones van desde bajo costo, baja eficiencia hasta alta eficiencia, alto costo; como se aprecia en la gráfica siendo la eficiencia de conversión el principal indicador de rendimiento (watts por metro cuadrado). Se debe diferenciar entre eficiencia de celda fotovoltaica y eficiencia del módulo fotovoltaico.

Gráfica 21. Rendimiento actual y precio de opciones de módulos fotovoltaicos



Nota: el porcentaje de participación de mercado es al 2008

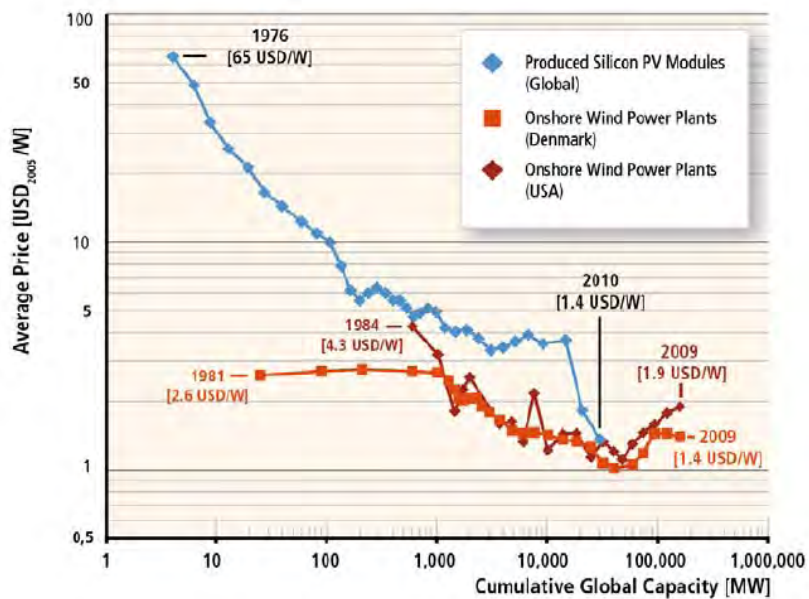
Fuente: OECD/IEA (2010), *Technology Roadmap, Solar Photovoltaic Energy*; International Energy Agency. Paris Francia. p.8.

³⁷ Arvizu. D. et. al. (2011), *Technical Summary*. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, Estados Unidos. IPCC_ SRREN Technical Report p. 45. OECD/IEA (2010), *Technology Roadmap, Solar Photovoltaic Energy*; International Energy Agency. Paris Francia. p.8

Aunque la tecnología de oblea de silicio domina el mercado por su confiabilidad, entre sus actuales retos se encuentra mejorar el aprovechamiento de recursos, por ejemplo: en materiales, eficiencia de celda y en procesos; en vías de elevar su competitividad. En el caso de la tecnología de película delgada, entre sus ventajas se encuentra el bajo consumo de materia prima, eficiencia de producción, buen desempeño en temperaturas ambientales altas, sus retos también incluyen elevar las bajas eficiencias y el hecho de no ser una tecnología tan probada como la mono o policristalino a nivel industrial.³⁸

Los precios de los sistemas fotovoltaicos son competitivos bajo ciertas condiciones locales, sin embargo, en general los precios siguen siendo altos en el mercado eléctrico. Los precios de los módulos fotovoltaicos cayeron de 22 dólar por watt en 1980, a menos de 1.50 dólar por watt en 2010 (cotización al 2005).³⁹ Como se aprecia en la gráfica 22, el precio de los módulos fotovoltaicos sigue una tendencia a la baja desde su aparición en el mercado, con el paso del tiempo, debido a las innovaciones en materiales y procesos, a la curva de aprendizaje y al aumento de volumen de producción del bien.

Gráfica 22. Curva en escala logarítmica para el precio de los módulos fotovoltaicos de silicio por unidad de capacidad.



Adaptado de: Tomar Edenhofer, et al. (released on line agosto 2011) Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation (SRREN); Mitigation of Climate Change; Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC.

³⁸ OECD/IEA (2010), *Technology Roadmap, Solar Photovoltaic Energy*; Internacional Energy Agency. Paris Francia. p.25.

³⁹ Arvizu. D. et. al. (2011), *Technical Report*. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, Estados Unidos. IPCC SRREN. p. 49