

Serie Docencia



INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM

Energía y cambio climático: Energías renovables

RAFAEL ALMANZA

SD/52
MAYO 2008

D.R. © UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, 2008
Instituto de Ingeniería, Ciudad Universitaria, CP 04510, México, DF

ISBN (En trámite)

Energía y cambio climático: Energías renovables

RAFAEL ALMANZA *

ABSTRACT	vii
RESUMEN	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. PROTOCOLO DE KIOTO	5
3. ESCENARIO DE EMISIONES	7
3.1 <i>Escenarios del IEEE</i>	7
4. CAMBIO CLIMÁTICO	13
5. ENERGÍA	15
5.1 <i>Petróleo, gas natural y carbón</i>	15
6. EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO	19
7. ENERGÍAS RENOVABLES	21
8. ENERGÍAS RENOVABLES EN MÉXICO	25
8.1 <i>Hidráulica y geotérmica</i>	25
8.2 <i>Energía solar</i>	28
8.3 <i>Biomasa</i>	40
8.4 <i>Sistemas híbridos</i>	41
8.5 <i>Energía de los océanos</i>	45
8.6 <i>Costos de fuentes renovables</i>	47
9. CONCLUSIONES	49
10. AGRADECIMIENTOS	51
11. REFERENCIAS	53

ABSTRACT

An updated revision on the climate change caused by the high power consumption of energy (petroleum, coal and natural gas), mainly in the developed countries, is presented. Considering that one of the most viable options to reduce this phenomenon are the renewable energies, a review of the energy developments realized in II the UNAM is presented. The advance in Mexico is also reviewed until now on renewable energies, as well as some commentaries of international information. The option of hybrid systems is discussed (renewable-conventional energies), which would be the immediate option to reduce the pollution of gases that increases the greenhouse effect.

RESUMEN

Se presenta una revisión actualizada sobre el cambio climático causado por el alto consumo de energía (petróleo, carbón y gas natural), principalmente en los países desarrollados. Considerando que una de las opciones más viables para reducir este fenómeno son las energías renovables, se hace una reseña de los desarrollos de energía solar realizados en el II UNAM. Se revisa lo alcanzado hasta ahora en México sobre energías renovables, así como comentarios relevantes de información internacional. Se discute la opción de sistemas híbridos (convencionales-energías renovables), los cuales serían la opción más inmediata por aplicar para reducir la emisión de gases que incrementan el efecto invernadero.

1. INTRODUCCIÓN

Se conoce como *cambio antropogénico* a la transformación de parámetros existentes en el medio ambiente a causa de acciones realizadas por el hombre, mientras que el *cambio climático* se debe a alteraciones en los patrones relacionados con vientos, lluvias, huracanes, corrientes marinas y elevación del nivel del mar. El *calentamiento global* es el desbalance energético causado por los cambios antropogénicos; principalmente por el uso exagerado de combustible de origen fósil, la desertificación por destrucción de bosques y vegetales, así como la contaminación de los mares que reduce el fitoplancton.

El clima está cambiando sobre todo por efecto de las emisiones de dióxido de carbono y otros gases producto de las actividades humanas, principalmente la ignición de combustibles fósiles aunada a la deforestación. Los gases permanecen en la atmósfera por décadas y atrapan la irradiación proveniente del Sol, que se transforma en calor y constituye el efecto invernadero.

El último informe del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, conocido en español como Convención Marco sobre el Cambio Climático, CMCC) de Naciones Unidas, publicado en febrero de 2007, es el mejor documento hasta la fecha relacionado con el calentamiento global. Éste afirma que la temperatura global se ha elevado 0.76°C en los últimos 100 años; también predice una elevación de la temperatura promedio de la superficie del planeta entre 1.4 y 5.8 grados para el año 2100, lo cual podría ser devastador. Los glaciares de los Andes, que suministran agua potable en ríos que son fuente de riego, están desapareciendo. El deshielo de las masas polares provocará el aumento del nivel del mar, lo cual podría poner en riesgo a países enteros, como Holanda y Bangladés. No son suposiciones sin fundamento. Se predice que para 2080 habrá una grave escasez de agua en China y Australia. La corriente del Golfo, que calienta el norte

de Europa, podría ser interrumpida si cambia la salinidad del agua del Atlántico. Éstas son sólo algunas de las predicciones a futuro, existen otras más que no serían menos graves.

La CMCC, en su artículo 1, define *cambio climático* como: “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima, observada durante periodos de tiempo comparables”; por ejemplo, un mínimo de tres décadas. La CMCC distingue además entre el cambio climático atribuido a actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la *variabilidad climática* atribuida a causas naturales.

Los gases de efecto invernadero absorben la *radiación infrarroja*, emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y los mismos gases que lo ocasionan, y por las nubes. Además la radiación atmosférica se emite en todas las direcciones, incluso hacia la superficie terrestre. Los gases de efecto invernadero atrapan el calor dentro del sistema de la *tropósfera* terrestre (zona desde la superficie terrestre, que puede abarcar de 6 a 18 km de espesor). A esto se le denomina *efecto invernadero natural*. La radiación atmosférica se vincula en gran medida a la temperatura del nivel en que se emite. En la tropósfera, la temperatura disminuye generalmente con la altura, de modo que la radiación infrarroja emitida al espacio se origina en altitud con una temperatura media de -19°C , en equilibrio con la *irradiancia solar* neta de entrada, mientras que la superficie terrestre tiene una temperatura media mucho mayor, de unos $+14^{\circ}\text{C}$. Un aumento en la concentración de los gases de efecto invernadero produce un aumento en la opacidad infrarroja de la atmósfera y, por tanto, una radiación efectiva hacia el espacio desde una altitud mayor y a una temperatura más baja. Esto causa un *forzamiento radiativo*, es decir el cambio del flujo neto de calor (diferencia entre la radiación solar entrante y la radiación infrarroja saliente) y se genera un desequilibrio que sólo puede ser compensado con un aumento de la temperatura del sistema superficie–tropósfera. A esto se denomina *efecto invernadero aumentado*.

Los gases integrantes de la atmósfera, de origen natural y antropogénico, tales como el vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4), y ozono (O_3) son los principales gases de efecto invernadero. Además existe en la atmósfera una serie de gases de efecto invernadero totalmente producidos por el hombre, como los *halocarbonos* y otras sustancias que contienen cloro y bromo, de las que se ocupa el Protocolo de Montreal. Además del CO_2 , N_2O , y CH_4 , el Protocolo de Kioto aborda otros gases de efecto invernadero, como el *hexafluoruro de azufre* (SF_6), los *hidrofluorocarbonos* (HFC), y los *perfluorocarbonos* (PFC). La fig 1 ilustra esquemáticamente el fenómeno de efecto invernadero.

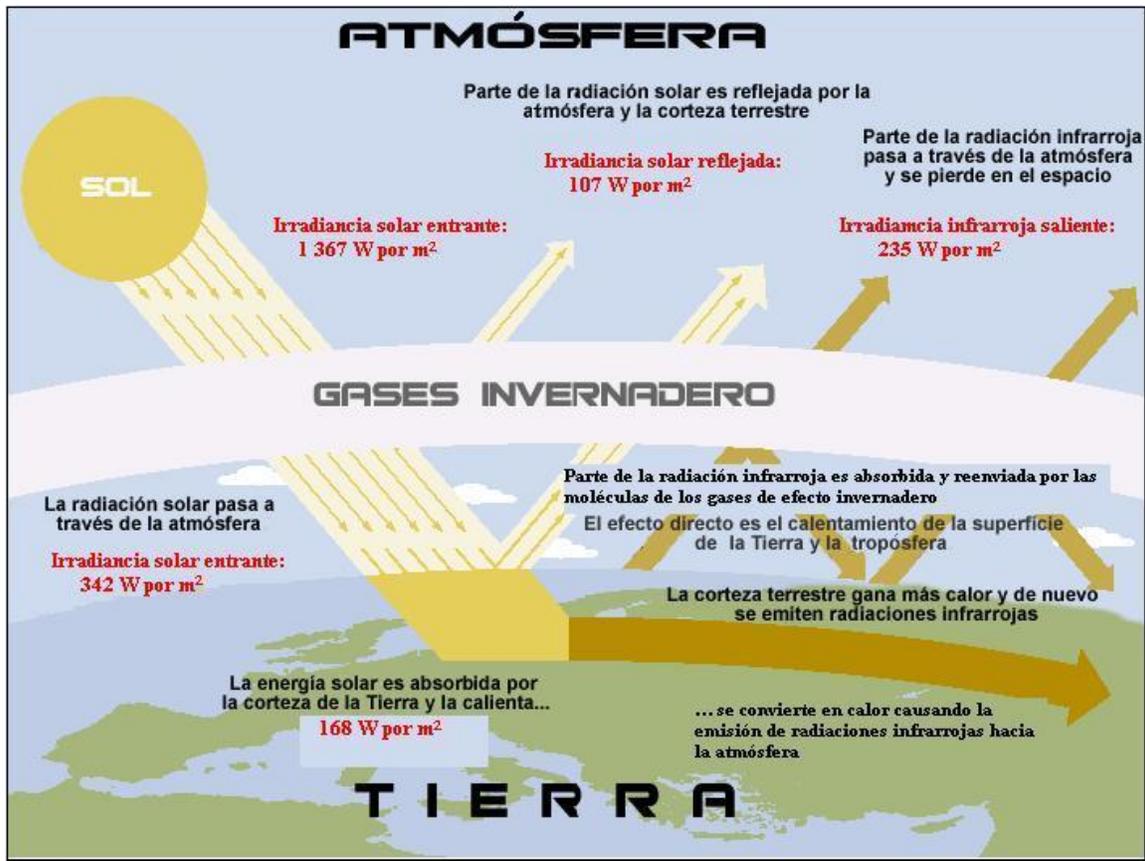


Fig 1.1 Efecto invernadero

Es claro que el crecimiento en el consumo de *energía primaria* (petróleo, gas natural, carbón) ha ocasionado que los gases de efecto invernadero se incrementen, lo que ha llevado a un cambio climático.

Este documento, más que profundizar en el cambio climático, pretende exhibir estos conceptos para enfatizar la justificación del desarrollo y uso de las fuentes alternas de energía. Su propósito es presentar las diferentes opciones de energías renovables, principalmente la solar. Se debe acelerar el desarrollo y uso de éstas con el fin de empezar a mitigar el efecto de invernadero.

Un aspecto importante por considerar son los sistemas híbridos, *fuentes convencionales-fuentes renovables*. Se incluyen además comentarios sobre información internacional con objeto de que el lector comprenda más ampliamente las energías renovables.

2. PROTOCOLO DE KIOTO

Dentro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC), en 1997, se generó *El Protocolo de Kioto*, en el tercer periodo de sesiones de la Conferencia de las Partes de la CMCC en la ciudad de Kioto, Japón. Este célebre documento contiene compromisos legales vinculantes, además de los incluidos en la CMCC. Los países del Protocolo, la mayoría de ellos participantes en la Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), y los países con economías en transición, acordaron reducir sus emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos y hexafluoruro de azufre) en al menos un 5 % de los niveles de 1990, durante el periodo de compromiso de 2008 a 2012. Este acuerdo entró en vigor el 16 de febrero de 2005, después de ser ratificado por el gobierno de Rusia, quien consiguió que la Unión Europea pagara la reconversión industrial y la modernización de las instalaciones petroleras de esa república de la antigua URSS. La suerte del acuerdo ha sido desde entonces azarosa. Por ejemplo, EUA firmó el acuerdo, pero no lo ratificaron, ni el gobierno de Clinton ni el de Bush, quién de hecho retiró a su país del Protocolo de Kioto con el argumento de que excluye de sus restricciones a algunos de los mayores emisores de gases entre los países en vías de desarrollo, como China.

Actualmente lo han firmado la mayoría de las naciones (168). Sin embargo algunos de los países que emiten más de estos gases no están obligados por lo menos hasta 2012 (China, Brasil, India, México), o no lo ratificaron (EUA y Australia). México es el noveno gran emisor de dióxido de carbono en el mundo, con una participación de 1.5 % de las emisiones de gases de invernadero.

3. ESCENARIO DE EMISIONES

Es una representación plausible de la evolución futura de las emisiones de sustancias que son, en potencia, radiativamente activas (por ejemplo, gases de efecto invernadero o aerosoles), en la que están involucradas un conjunto de hipótesis coherentes e internamente consistentes sobre las fuerzas impulsoras del fenómeno de efecto invernadero, tales como el desarrollo demográfico y socioeconómico, y el cambio tecnológico, así como sus relaciones clave. Estas hipótesis dan lugar a los escenarios de concentraciones, derivados a partir de los escenarios de emisiones. Estos últimos se utilizan como insumos en una *simulación climática* para calcular probables proyecciones. En la CMCC (1992), se utilizó un conjunto de escenarios de emisiones como base para realizar las *proyecciones climáticas* para el IPCC (1996). Estos escenarios de emisiones se refieren a los escenarios IS92. En el Informe Especial del IPCC: *Escenarios de emisiones* (Nakicenovic *et al*, 2000), se publicaron nuevos escenarios de emisiones, los llamados Escenarios del IEEE.

3.1 Escenarios del IEEE

Los Escenarios del IEEE son escenarios de emisiones desarrollados por Nakicenovic *et al* (2000) y utilizados, entre otros, como base para la realización de proyecciones climáticas en la contribución del Grupo de Trabajo I (GTI) de la CMCC al Tercer Informe de Evaluación (IPCC, 2001a). Para comprender adecuadamente la estructura y el uso del conjunto de Escenarios del IEEE, son importantes los siguientes términos:

Guión de escenario: Es la descripción narrativa de un escenario (o conjunto de escenarios) subrayando las principales características del mismo, las relaciones entre las principales fuerzas impulsoras y la dinámica de su evolución.

Conjunto de escenarios: Éstos son escenarios que tienen algunos aspectos semejantes (guión) desde el punto de vista demográfico, económico, social y además una descripción detallada en relación con los cambios técnicos. Los escenarios del IIEEE comprenden cuatro conjuntos de escenarios: A1, A2, B1, y B2.

En resumen, estos cuatro conjuntos principales representan:

A1: Un mundo de crecimiento rápido con una adaptación rápida de tecnologías nuevas y eficientes.

A2: Un mundo muy heterogéneo con énfasis en los valores familiares y tradiciones locales.

B1: Un mundo desmaterializado donde se han introducido tecnologías limpias.

B2: Un mundo con énfasis en soluciones locales para lograr una economía y un medio ambiente sostenibles.

Sin embargo, es necesario incluir más detalles dentro de cada uno de estos escenarios con el fin de comparar las diferentes alternativas existentes en todos los continentes.

Grupo de escenarios: Son escenarios dentro de un conjunto que reflejan una variación constante del guión. El conjunto de los escenarios A1 incluye cuatro grupos designados A1T, A1C, A1G y A1B que exploran estructuras alternativas de sistemas energéticos futuros. En el *Resumen para responsables de políticas* (Nakicenovic *et al*, (2000), los grupos A1C y A1G se han combinado en un grupo de escenarios A1Fl, “que utiliza principalmente y en gran medida combustibles fósiles”. Los otros tres conjuntos de escenarios tienen un grupo cada uno. La serie de escenarios del IIEEE reflejada en el *Resumen para responsables de políticas* (Nakicenovic *et al*, 2000) consiste en seis grupos de escenarios diferentes, todos ellos igualmente apropiados, que recogen en forma conjunta la gama de *incertidumbres* asociadas con los fenómenos que los originan y sus emisiones.

Los escenarios que son ilustrativos para cada uno de los seis grupos en el Resumen de Nakicenovic *et al* (2000), incluyen cuatro grupos de escenarios A1B, A2, B1, B2, y dos escenarios adicionales para los grupos A1Fl y A1T. Todos los grupos de escenarios son igualmente válidos.

Marcador de escenario: Es el escenario que se colocó originalmente, en forma de proyecto, en el sitio Web del IIEEE, para representar un determinado conjunto de escenarios. La elección de los marcadores estaba basada en las cuantificaciones iniciales que reflejaban mejor la historia y las características de las simulaciones específicas. Los marcadores no tienen mayor grado de probabilidad que los demás escenarios, pero el equipo de redacción del IIEEE los considera ilustrativos de un guión determinado. Se incluyen en una forma revisada en Nakicenovic *et al* (2000). Estos escenarios han sido objeto de un examen pormenorizado por parte de todo el equipo de redacción, además de un proceso amplio y abierto por parte del IIEEE.

La fig 3.1 muestra los modelos de la elevación de temperatura en la Tierra bajo los diferentes escenarios. Se predice una elevación promedio de temperatura de la superficie del planeta entre 1.4 y 5.8 grados para el año 2100, mientras que la fig 3.2 presenta la elevación de los océanos bajo diferentes escenarios, la cual estaría entre 20 y 70 cm. Finalmente, la fig 3.3 presenta la desaparición de los glaciares del Ártico según el modelo desarrollado por la NOAA para el año 2085. Respecto a este último aspecto es importante señalar varios temas relevantes: la desaparición del *permafrost* (suelo helado de Siberia y Alaska), que al fundirse libera enormes cantidades de metano almacenado desde la última glaciación, un gas con 20 veces más poder de calentamiento que el dióxido de carbono (CO₂). También hay una gigantesca bolsa de carbono en el *permafrost* que se funde y del que casi no se habla. Además el reblandecimiento de la tierra provoca problemas en la cimentación de casas y edificios, así como hundimiento de carreteras. Otro tema relevante está relacionado con los mamíferos que dependen del hielo y que, con su desaparición, no encontrarán comida en el casquete y tendrán que ir a tierra, donde hay depredadores que acabarán con ellos (Chapin, S, 2006).

3.1.1 Escenario de referencia (World Energy Outlook, 2006, 2007).

En la bibliografía internacional también existe un escenario, que puede tomarse para referenciar los otros. Éste se conoce como *Escenario de referencia* y considera que la población global crecerá 1 % anualmente, en promedio, a partir de una estimación de 6.4 mil millones en 2004 a 8.1 mil millones en 2030. El aumento en la demanda de energía primaria se considera en promedio de 3.4 % anual de 2004 a 2030, comparada con el 3.2 % de 1980 a 2004. El precio del petróleo crudo de acuerdo con la IEA (International Energy Agency) se considera sobre 60 dólares por barril a lo largo de 2007, bajando a 47 dólares en 2012 y volviendo a subir a 55 en el 2030.

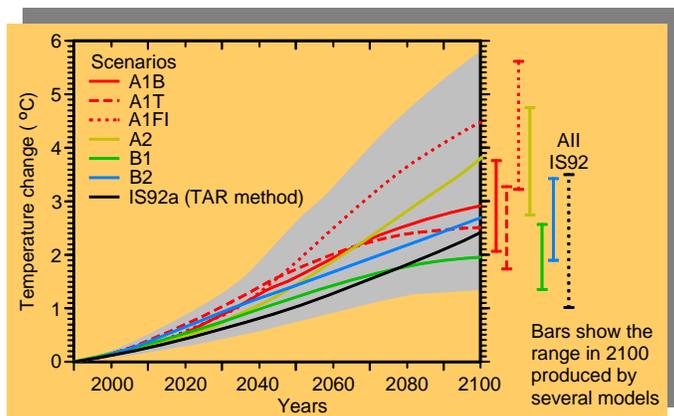
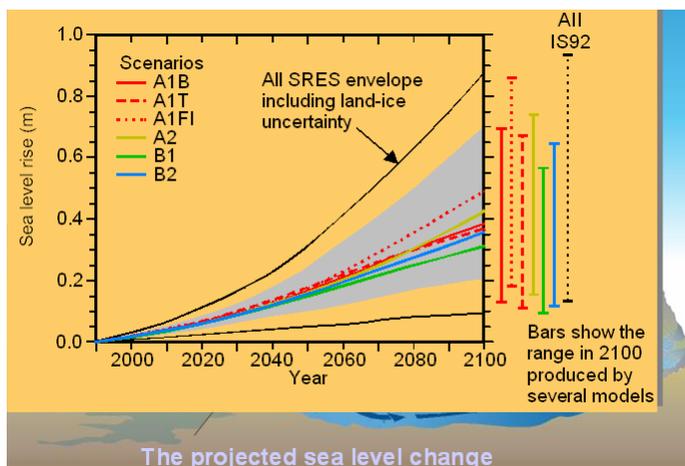


Fig 3.1 Elevación de la temperatura promedio bajo diferentes escenarios (Cubasch, 2007)



The projected sea level change
Fig 3.2 Elevación del nivel del mar bajo diferentes escenarios (Cubasch, 2007)

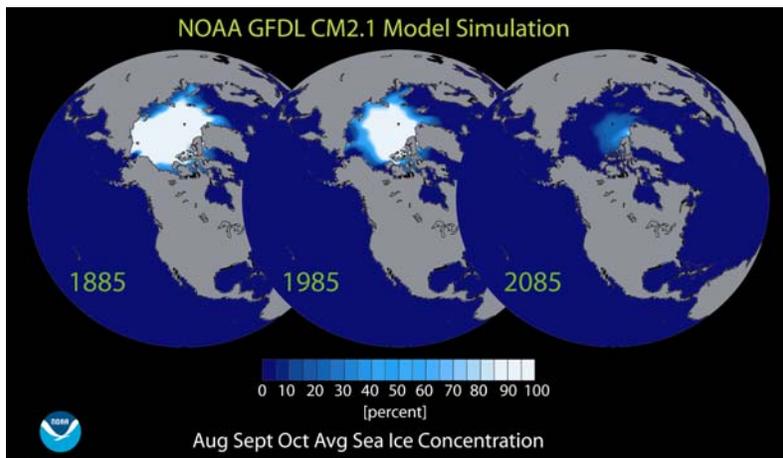


Fig 3.3 Modelo que muestra la desaparición de los glaciares en el Ártico (Arctic sea ice changes, 2007)

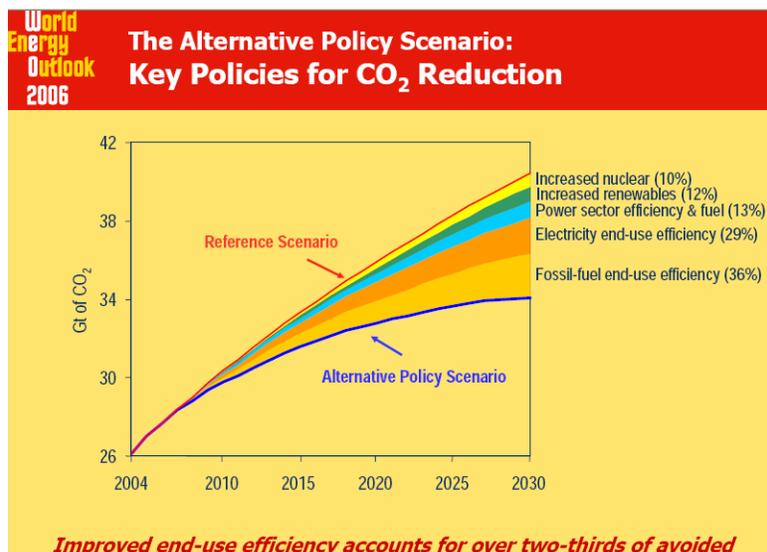


Fig 3.4 Diferentes escenarios con políticas diferentes para la reducción de CO₂ (World Energy Outlook, 2006)

Sin embargo, esta hipótesis es idealista ya que, durante octubre y noviembre de 2007, el precio del crudo ha estado cerca de los 100 dólares. Por lo que respecta al gas natural, el panorama es muy semejante al del petróleo. En la demanda vapor-carbón, de acuerdo con la OECD, el precio se estabilizará en alrededor de 55 dólares por tonelada en los siguientes años, y va a elevarse a 60 en 2030. En general se puede asumir que el suministro de energía y sus tecnologías serán más eficientes. Se excluyen del *Escenario de referencia* la aceleración en las políticas y el despegue de tecnologías más eficientes y más limpias.

El concepto conocido como GDP (*gross domestic product*) se asume que crezca 3.4 % anual para el periodo 2004-2030 comparado con el 3.2 % de 1980 a 2004. La fig 3.4 muestra diferentes escenarios para la reducción del dióxido de carbono comparados con el Escenario de referencia.

Además la OECD solicitó a la IEA un *escenario alternativo*, el cual es más representativo en política energética y más congruente con las economías actuales para el periodo 2004-2030. En este escenario se considera que todos los países adoptarán políticas y medidas para implementar el uso de energías limpias. Tomando en cuenta este escenario, se presentan en la sección 8.6 los costos de las fuentes renovables.

4. CAMBIO CLIMÁTICO

Se refiere a una importante variación estadística en un estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un periodo prolongado (normalmente decenios o incluso más). El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, o bien a cambios persistentes antropogénicos en la composición de la atmósfera o en el uso del suelo. Se debe tener en cuenta que la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC), en su artículo 1, define *cambio climático* como: “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables”. La CMCC distingue entre *cambio climático* atribuido a actividades humanas que alteran la composición atmosférica y *variabilidad climática* atribuida a causas naturales.

México es particularmente vulnerable al cambio climático debido a sus extensos litorales y a la alta concentración de actividad económica en estas zonas, incluyendo la producción de petróleo, la pesca y el turismo. Los eventos meteorológicos de mayor impacto serían los huracanes con las consecuentes inundaciones, así como las grandes sequías en el centro y norte del país.

5. ENERGÍA

El crecimiento en el consumo de *energía primaria* (petróleo, gas natural, carbón, hidroelectricidad y energía nuclear) hasta 2005 se ilustra en las figs 5.1 y 5.2. Asia acaparó casi las tres cuartas partes del crecimiento a lo largo del 2005, y China fue el país de más alto crecimiento, con aproximadamente la mitad del mismo. En la década pasada, el gas natural y el carbón han aumentado su participación considerablemente.

5.1 Petróleo, gas natural y carbón

En la fig 5.2 se aprecia que el petróleo continúa como la fuente primaria preponderante, predomina en Norteamérica y ha aumentado su participación desde 1995, mientras que el gas es la fuente predominante en la antigua Unión Soviética, y en Asia el consumo de carbón es el más común.

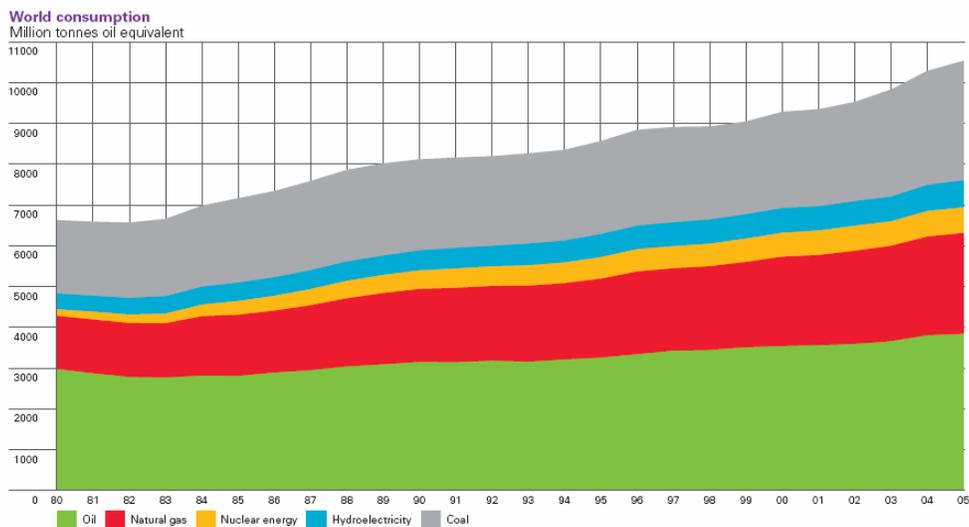


Fig 5.1 Consumo de energía primaria (British Petroleum, 2006)

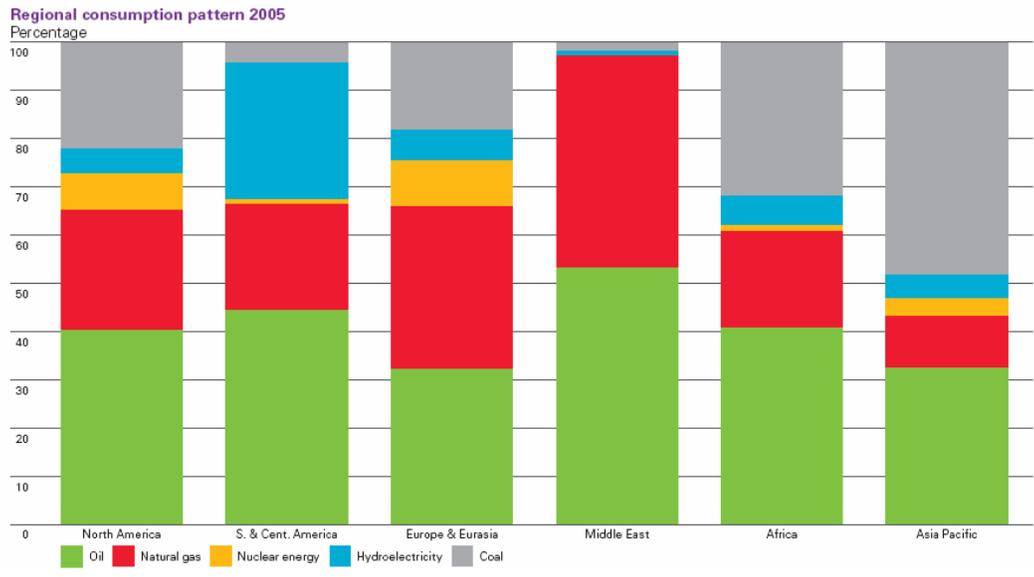


Fig 5.2 Consumo de las fuentes primarias en las diferentes regiones del planeta (British Petroleum, 2006)

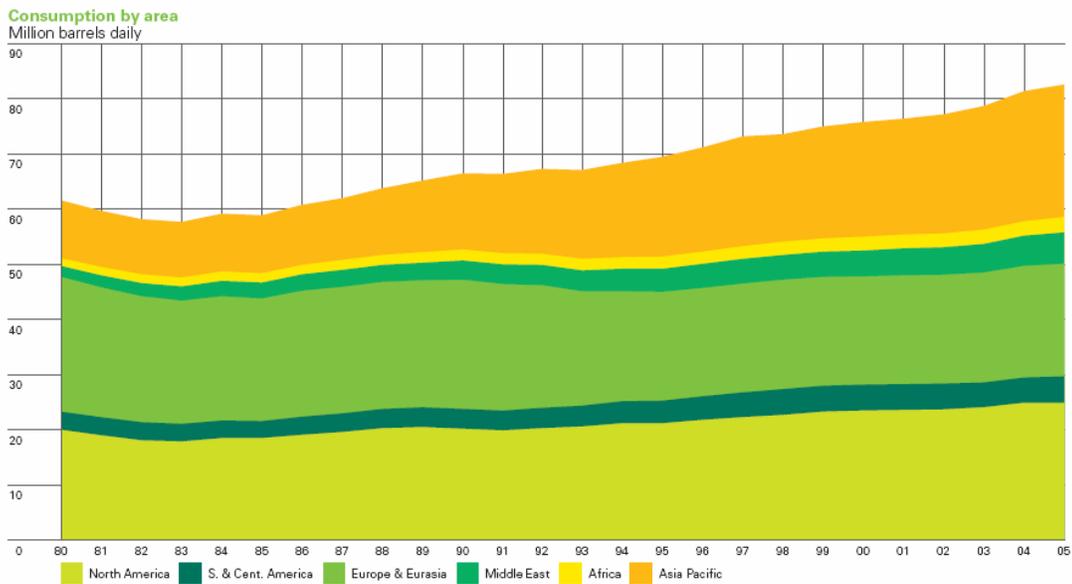


Fig 5.3 Consumo de petróleo en el mundo (British Petroleum, 2006)

El crecimiento del consumo de petróleo fue de 1 millón de barriles por día (b/d) en 2005 respecto a un promedio de los últimos diez años. EUA, Alemania e India son los principales consumidores de petróleo (British Petroleum, 2006). Esto se presenta en la fig 5.3.

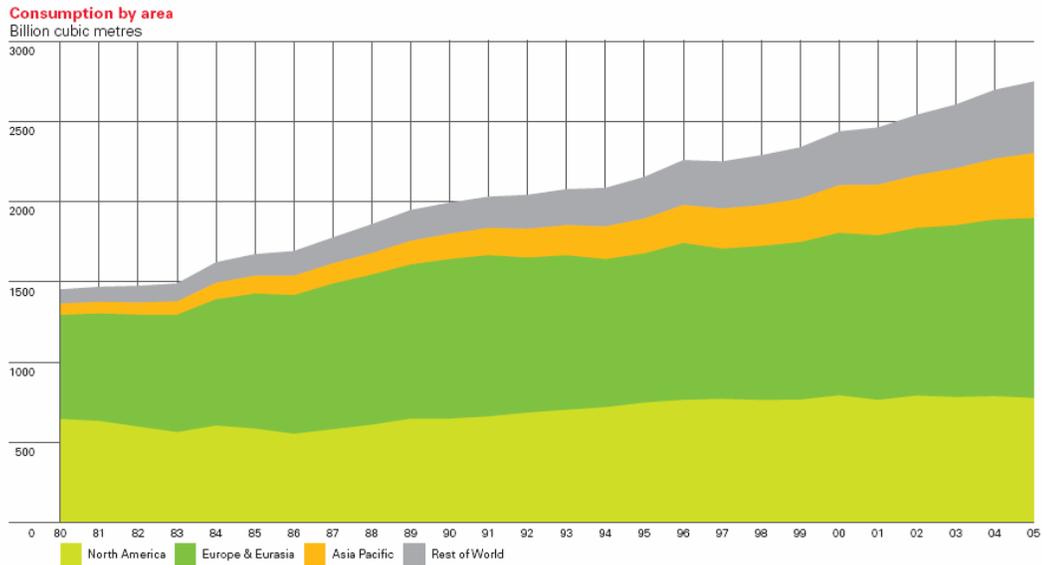


Fig 5.4 Consumo de gas natural por regiones en el mundo (British Petroleum, 2006)

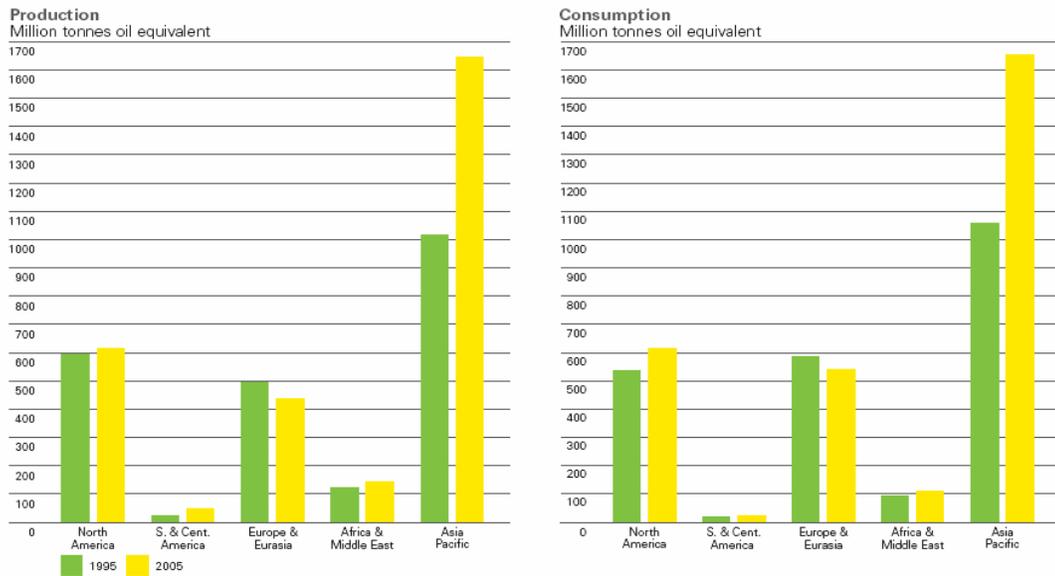


Fig 5.5 Producción-consumo de carbón (British Petroleum, 2006)

Por lo que respecta al *gas natural*, la fig 5.4 muestra que el consumo creció en cada región excepto en América del Norte. El crecimiento global es muy semejante respecto al promedio en diez años. China aumentó su consumo 20 %, mientras que el sureste de Europa también tuvo un crecimiento considerable.

La gráfica de la fig 5.5 presenta la producción-consumo de carbón hasta 2005. El carbón fue la fuente primaria de energía que creció más rápido, en promedio, en los últimos diez años. El crecimiento se concentró principalmente en China, que acaparó 80 % del crecimiento global. En EUA también el crecimiento fue importante.

Como se ve en todos los casos, el consumo de energía sigue incrementándose, lo cual conduce a una mayor contaminación por los gases que son quemados y emitidos durante el uso de combustibles de origen fósil.

6. EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO

Las emisiones globales de CO₂, principal contaminante mundial, se presenta en las figs 6.1 y 6.2. En la primera, se nota el aumento en miles de millones de toneladas, de 2 en 1900 a 27 en 2004. Por lo que respecta a México, en la fig 6.2 se presentan las emisiones del periodo 1900 a 2004.

Actualmente, América del Norte produce más del 25 % de este gas arrojado a la atmósfera en todo el mundo por quemar combustibles fósiles y por otras actividades, según señala el documento *Programa de Ciencia del Cambio Climático en Estados Unidos*. De acuerdo con el nuevo estudio de Estados Unidos, América del Norte arrojó al aire mil 856 millones de toneladas métricas de carbono en 2003, de los cuales el 85 % corresponde a Estados Unidos, 9 % a Canadá y 6 % a México (King A *et al*, 2007).

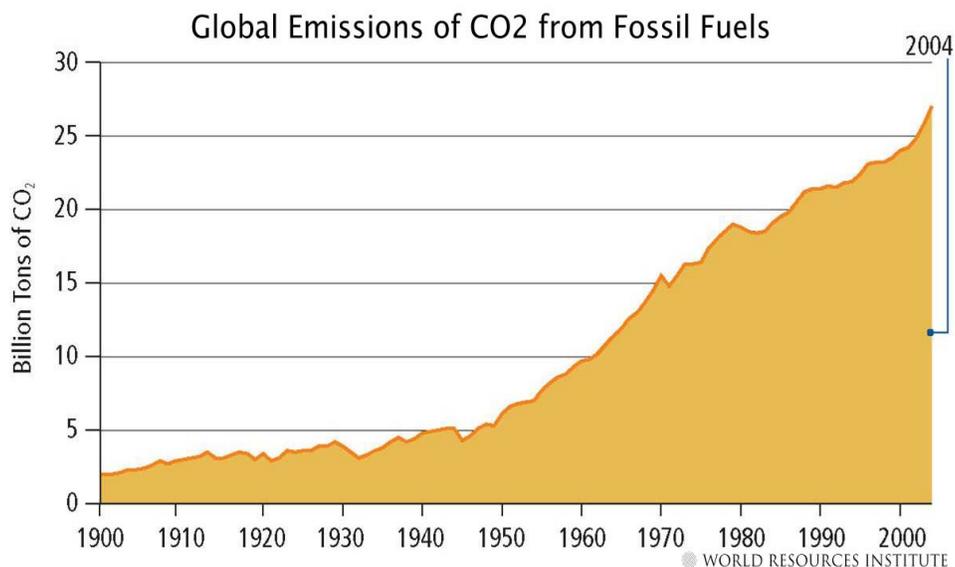
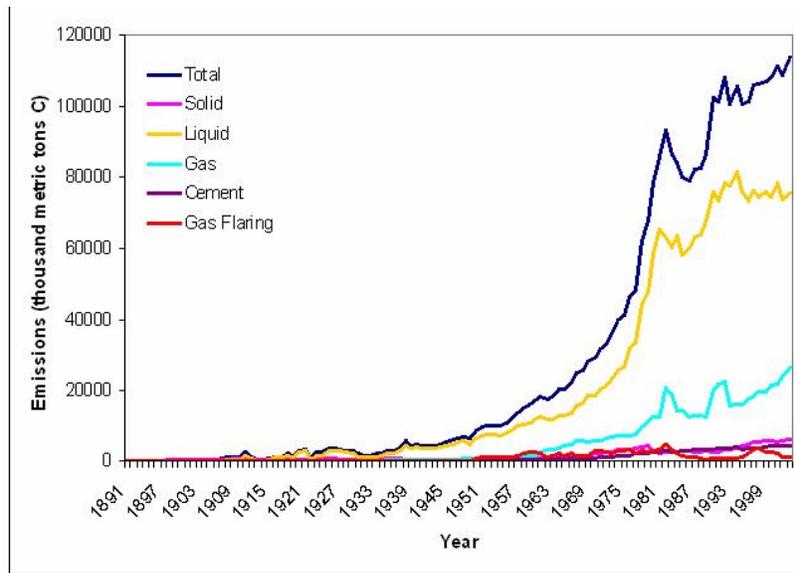


Fig 6.1 Emisiones del CO₂ en el mundo (Kevin et al, 2005)



CO₂ emissions from Mexico.

Fig 6.2 Emisiones de CO₂ generadas por México en el periodo 1891-2004 (Marland et al, 2007)

7. ENERGIAS RENOVABLES

Para evitar el sobrecalentamiento (o al menos parar su aumento), hay que reducir a toda costa las emisiones de gases de efecto invernadero. **Dos mil millones de personas no tienen acceso a los servicios energéticos básicos** y, al mismo tiempo, la utilización insustentable de la energía está poniendo en peligro nuestra propia supervivencia colectiva. El cambio climático arriesga seriamente al mismo desarrollo sustentable, frente a las consecuencias de este cambio y los menos capaces para hacerle frente (Greenpeace, 2002).

Las opciones energéticas que tomará el mundo en los próximos 20 o más años, determinarán para el largo plazo el rumbo de nuestro desarrollo colectivo. Estas opciones podrían basarse en el uso de energías convencionales, pues algunos creen que éstas permiten un alivio inmediato en las zonas de pobreza, al hacer llegar la electricidad a ellas, por ejemplo, e imponen la renuncia implícita al uso de las energías renovables o aparatos más eficientes, pues califican a estas energías y aparatos como caros o elitistas. Sin embargo en la mayoría de los casos, estos reproches son totalmente injustificados. A menudo, los costos de proveer energía sustentable son menores que los necesarios para extender la red eléctrica convencional, o la compra de combustibles fósiles, baterías o gasolina. Y esto sin considerar que cuando se comparan los costos de ambos tipos de energías no se suelen incluir con rigor las *externalidades* provocadas por las energías convencionales.

Localmente, la utilización de combustibles tradicionales por los más pobres, provoca impactos graves en la salud, relacionados principalmente con problemas respiratorios. Frente a esta situación la mejor alternativa es usar fuentes limpias y renovables de energía, lo que mejora este aspecto. En los hogares más pobres, la contaminación intradomiciliaria está literalmente matando a los niños pequeños y a las mujeres. La

prolongada exposición a los humos, aumenta dramáticamente la probabilidad que desarrollen problemas de salud tan severos como las infecciones respiratorias agudas y las enfermedades crónicas pulmonares. De igual forma, aumentan los riesgos de muerte neonatal, que además ahora está siendo correlacionada con cegueras y cambios en los sistemas de defensa (Indoor Air Pollution, 2000).

Un último tema, a menudo ignorado, concierne a la función que la energía renovable puede tener, promoviendo una mayor seguridad energética para los países en desarrollo que dependen fuertemente del petróleo y de la importación de energía. La diversificación de las fuentes energéticas puede ayudar a mitigar el severo impacto económico que a veces provoca la volatilidad de los precios del petróleo y de otros combustibles fósiles (PNUD, 1997).

Más aún, con el abastecimiento de energía renovable proveniente de fuentes nacionales, locales y descentralizadas, se liberan recursos económicos que de otra forma serían destinados a grandes proyectos con utilización de combustibles fósiles. De esta manera, la utilización masiva de fuentes renovables puede liberar los escasos fondos disponibles, para canalizarlos hacia objetivos de desarrollo en salud, bienestar y educación.

La energía renovable produce también otros beneficios, como la posibilidad de mayor control local sobre los recursos energéticos y, con ello, alcanzar mayores niveles de seguridad, sobre todo si se considera la alta vulnerabilidad a eventuales operaciones de sabotaje en las plantas nucleares o en la infraestructura de petróleo y gas, lo cual ya está sucediendo en México (*Diario Reforma*, 2007).

Las energías renovables se caracterizan porque sus procesos de transformación y aprovechamiento de energía útil, no se consumen ni se agotan en una escala humana. Entre estas fuentes de energía están: *la hidráulica, solar, eólica y oceánica*. Además, según su forma de explotación, también pueden ser catalogadas como renovables la energía proveniente de la *biomasa* y la *energía geotérmica*.

Las energías renovables suelen clasificarse en *convencionales* y *no convencionales*, según sea el grado de desarrollo de las tecnologías para su aprovechamiento y la penetración en los mercados energéticos que presenten. Dentro de las convencionales, las más difundidas son la *hidráulica a gran escala* y la *geotérmica*.

Como *energías renovables no convencionales* (ERNoC) se consideran la *eólica*, *solar* y *oceánica*. Además, existe una amplia gama de procesos de aprovechamiento de la energía de la *biomasa* que pueden ser catalogados como ERNoC. De igual manera, el aprovechamiento de la *energía hidráulica en pequeñas escalas* se suele clasificar en esta categoría.

Las ERNoC al ser autóctonas y, dependiendo de su forma de aprovechamiento, deben generar impactos ambientales significativamente inferiores que las fuentes convencionales de energía, además las ERNoC pueden contribuir a los objetivos de *seguridad de suministro* y *sustentabilidad ambiental* de las políticas energéticas. La magnitud de dicha contribución y la viabilidad económica de su implantación, depende de las particularidades en cada país, así como de sus características, tales como el potencial explotable de los recursos renovables, su localización geográfica y los mercados energéticos en los cuales podrían competir.

8. ENERGÍAS RENOVABLES EN MÉXICO

Históricamente el panorama energético de México ha contado con una participación importante de las energías renovables, en particular de la *energía hidráulica convencional* y la *geotérmica*, utilizadas para generación eléctrica. Esta participación ha disminuido en los últimos años, producto del crecimiento de sectores que tienen un consumo intensivo de derivados del petróleo, como el transporte, y del aumento de la capacidad de generación eléctrica térmica a partir del petróleo y el gas natural. Sin perjuicio de ello, la participación de las energías renovables sigue siendo significativa en el abastecimiento energético nacional, como se desprende del balance de consumo bruto de energía primaria de 2005.

Por su parte, si bien las ERNoC presentan una participación marginal en el consumo bruto de energía en México, han tenido un espacio de desarrollo para el abastecimiento energético de zonas rurales, situación que se verá reforzada por las políticas gubernamentales de apoyo a la *electrificación rural*.

Las energías renovables convencionales y no convencionales, que poseen potencial de desarrollo en nuestro país, se listan a continuación.

8.1 Hidráulica y geotérmica

En el Balance Nacional de Energía 2005 (SENER, 2006; fig 8.1), aparecen las diferentes formas como se genera electricidad en México. Por lo que respecta a la hidráulica y la geotérmica, la participación de éstas es de 88 % (con respecto a las fuentes renovables usadas en México) y 8 %, respectivamente (fig 8.2).

La energía hidráulica se utiliza principalmente para generar electricidad y ésta provee el 20 % de la electricidad mundial. En México representa el 22.2% de la capacidad instalada para generación eléctrica. El II UNAM tiene 50 años trabajando con CFE y CNA.

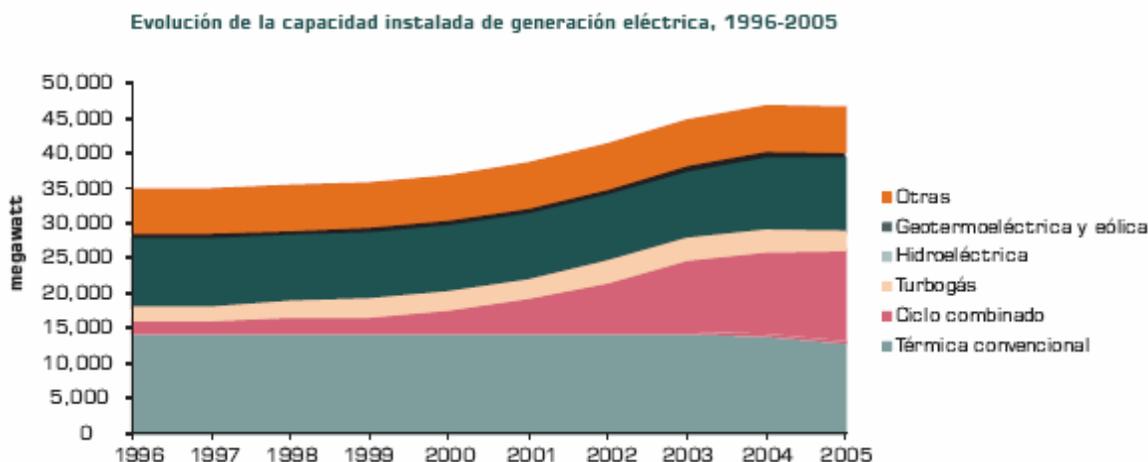


Fig 8.1 Evolución de la capacidad instalada de generación eléctrica en 1996-2005 (SENER, 2006)

Capacidad de generación eléctrica con energías renovables



- México cuenta con poco más de **12,000 MW** de capacidad instalada de generación eléctrica con base en energías renovables:
 - **11,545 MW** en centrales de CFE y LFC,
 - **504 MW** en plantas de autoabastecimiento interconectadas a la red, y
 - **18 MW** en sistemas aislados.

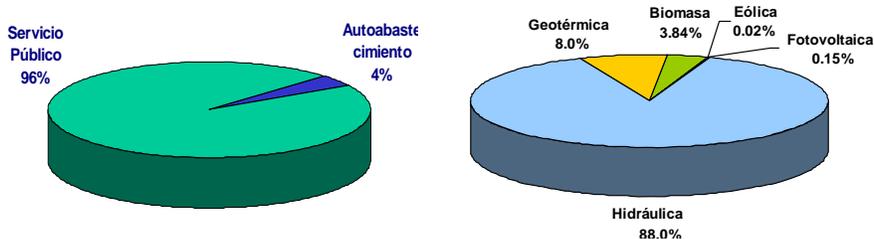


Fig 8.2 Generación con energías renovables (Comisión Reguladora de Energía, 2005)

Por lo que respecta a la energía geotérmica, ésta tiene una capacidad en México de 959.5 MW, con la cual se generó 3.52 % de la energía producida hasta marzo de 2007. La planta más grande de México está ubicada en el valle de Mexicali, BC, es el campo geotérmico de Cerro Prieto, con una capacidad instalada de 720 MW. El II UNAM lleva trabajando con CFE 36 años en diferentes aspectos: vaporductos, efectos ambientales y sismología, entre otros.

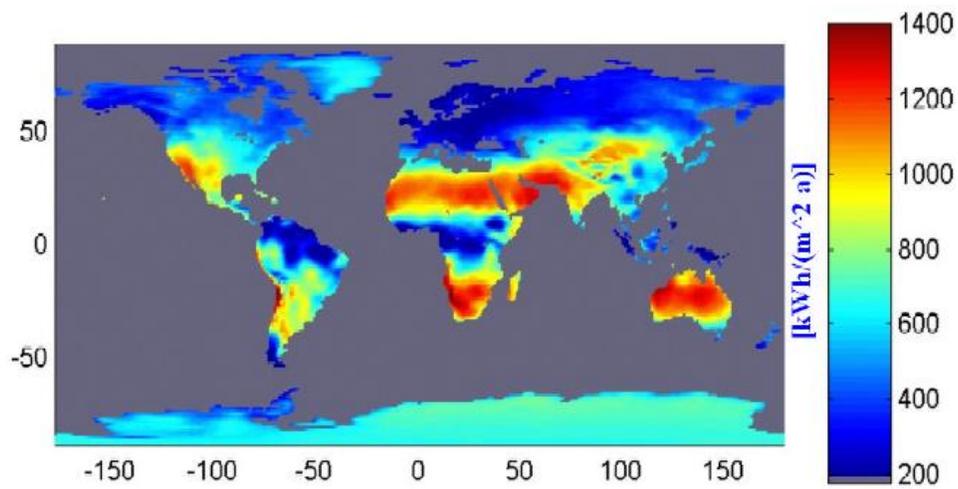


Fig 8.3 Irradiación global en el planeta (Nowak et al, 2003)

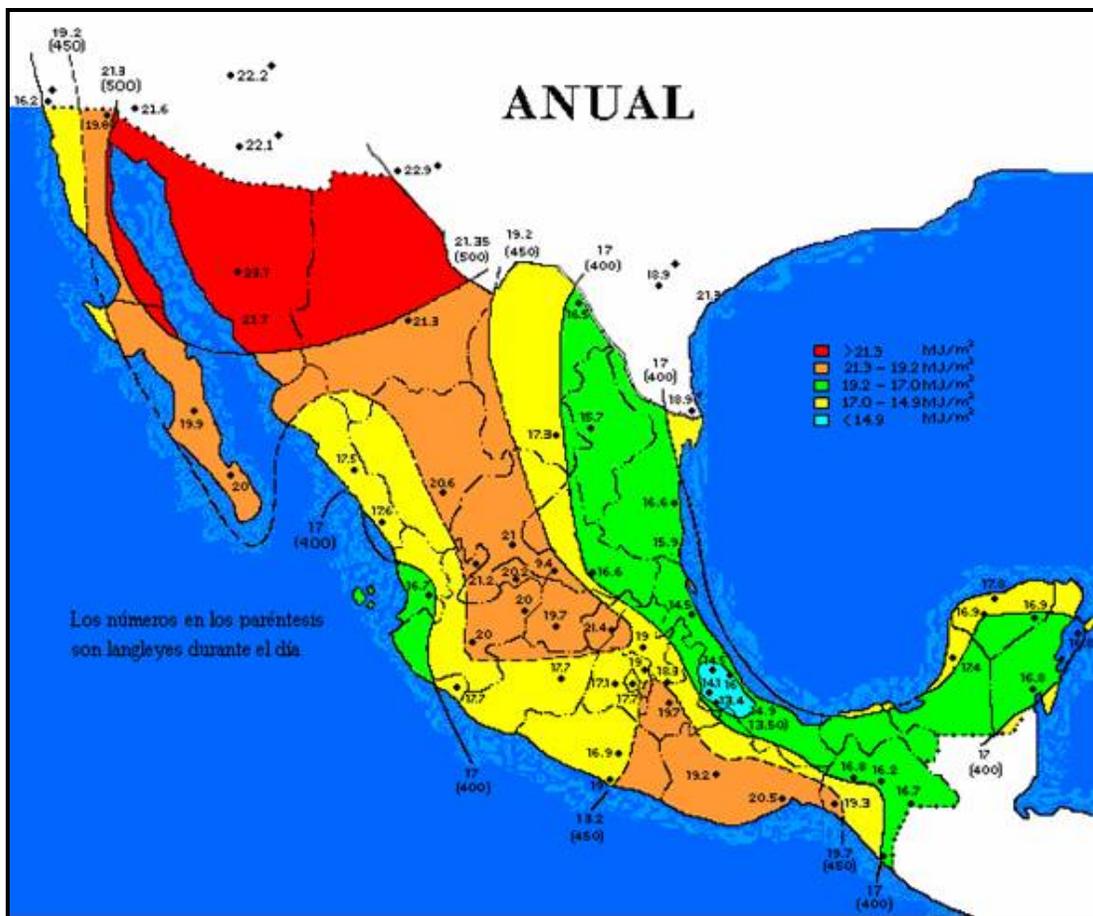


Fig 8.4 Promedio anual de la irradiación global (Almanza y López, 1976; Almanza et al, 2006)

8.2 *Energía solar*

A nivel mundial, la irradiación global promedio anual en $\text{khW/m}^2\text{a}$ es la ilustrada en la fig 8.3. En México el recurso solar está disponible en alto grado. El valor oscila desde 4.6 a 21.3 MJ/m^2 , como se muestra en la fig 8.4.

Para nuestro país, el uso de la energía solar representa una fuente importante de energía para el presente y el futuro.

La fig 8.5 presenta la evaluación de la irradiación directa normal realizada por los NREL (National Renewable Energy Laboratories, EUA) en el noroeste de la República Mexicana. Ésta resulta de las más altas en el mundo, de manera que todos los dispositivos solares trabajarían de forma eficiente a lo largo del año, incluyendo los que trabajan con concentración.

Por lo que respecta a las tecnologías solares, en la fig 8.6 se muestran las diferentes opciones que existen para las aplicaciones directas de estas tecnologías.

En el ámbito de las energías renovables, tanto en la parte de investigación básica como en la aplicada, el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México ha incursionado desde hace más de 33 años, siempre bajo el enfoque de tener propuestas concretas para el uso práctico de los recursos nacionales renovables con los que cuenta el país, y ha desarrollado prototipos piloto para el buen aprovechamiento de este recurso energético no convencional. Ello ha involucrado la asimilación de tecnologías desarrolladas en otros centros de investigación con prestigio internacional, y la realización de propuestas para solucionar problemas concretos en el ámbito nacional. Se han llevado a cabo desarrollos de modelos teóricos y experimentales cuya aplicación contribuye a mejorar el desempeño de empresas paraestatales y privadas, con lo que se logra mantener un vínculo estrecho con el sector productivo nacional.

Diferentes ejemplos que el autor ha realizado a lo largo de más de 33 años se muestran en las figs 8.7 a 8.19. Se incluyen éstos para mostrar al lector que los avances en energía solar en el II UNAM han sido relevantes para el despegue de esta fuente de energía, y se ha logrado una infraestructura adecuada para enfrentar retos futuros en México.

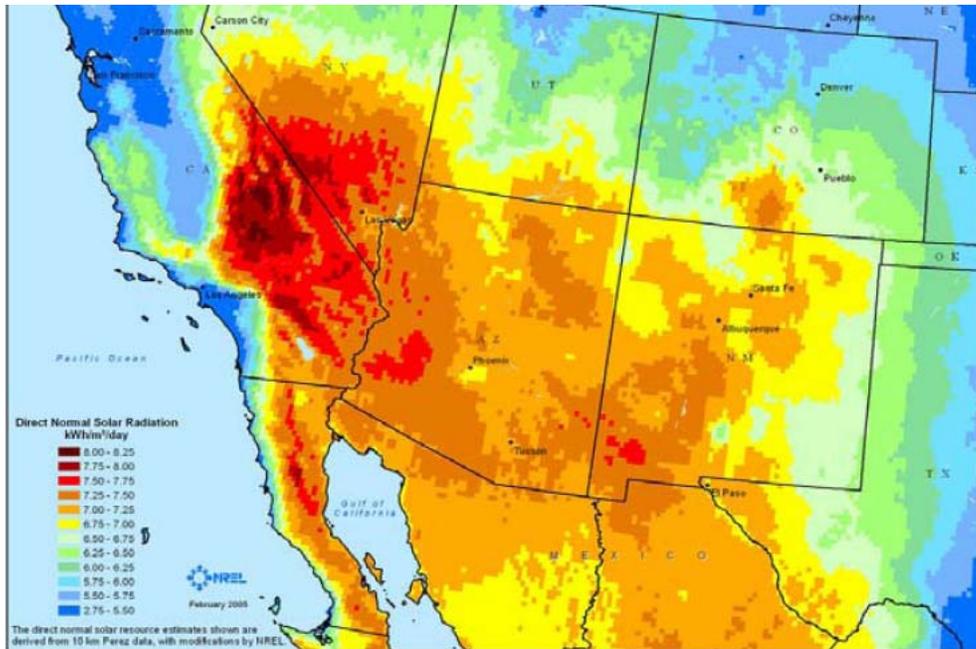


Fig 8.5 Irradiación directa normal (Kutscher, 2007)



Fig 8.6 Diferentes tipos de tecnologías contempladas con energía solar

8.2.1 Cocinas solares a la intemperie y en habitación

En general, la temperatura que se alcanza con la radiación solar no es lo suficientemente alta como para aprovecharla de manera práctica en la cocción de alimentos. En el Instituto de Ingeniería se probaron varias opciones de cocinas con modelos diferentes.

Uno de ellos se basa en un sistema de concentración de plato parabólico (véase fig 8.7) y otro en un sistema de concentración de canal parabólico (Almanza y Muñoz, 1994). La forma que tendrá el volumen útil para cocción de alimentos depende de la configuración que tenga el concentrador solar.

Otra modalidad de cocina solar desarrollada en el Instituto utiliza un fluido de trabajo intermedio para la captación y transmisión del calor; por ejemplo, aceite mineral, el cual se calienta con un sistema de concentración de media temperatura como lo es un canal parabólico, para luego ceder el calor en un serpentín al medio que lo rodea.

8.2.2 Colectores solares planos

Una de las tecnologías más difundidas que aprovechan el recurso solar es la de los colectores solares planos, cuyo principio se basa en la absorción de energía solar radiante transformada en calor y que se puede transportar a través de un fluido de trabajo.

En los años 70 el uso de este tipo de colectores no era muy difundido, pero se comenzaba a tomar mayor conciencia de la necesidad de uso de fuentes alternas de energía. Así el Instituto de Ingeniería, UNAM, llevó a cabo los siguientes trabajos:

Calentadores solares para baños públicos.

En el estado de Tlaxcala (Almanza y Muñoz, 1994), se instalaron en 1979 baños públicos (fig 8.8) con agua caliente, cuya fuente de energía era solar, en sustitución de un baño Temascal en el que se usaban aproximadamente 30 kg de leña por vez. Los calentadores que se instalaron fueron los más eficientes que se habían desarrollado en el Instituto, contruidos con tubos de cobre soldados a una lámina del mismo material (fig 8.9). La temperatura que alcanzan estos dispositivos es de 50 a 80 °C dependiendo de la época del año y de las condiciones ambientales. También se instalaron calentadores solares de agua en los baños de los trabajadores de intendencia del II UNAM. Un sistema más sofisticado es el de tubos evacuados, donde el tubo absorbedor va al vacío (fig 8.10). Como un dispositivo especial se desarrolló un sistema absorbedor al alto vacío para concentradores solares tipo canal parabólico (fig 8.11).



Fig 8.7 Cocinas solares en comunidades rurales

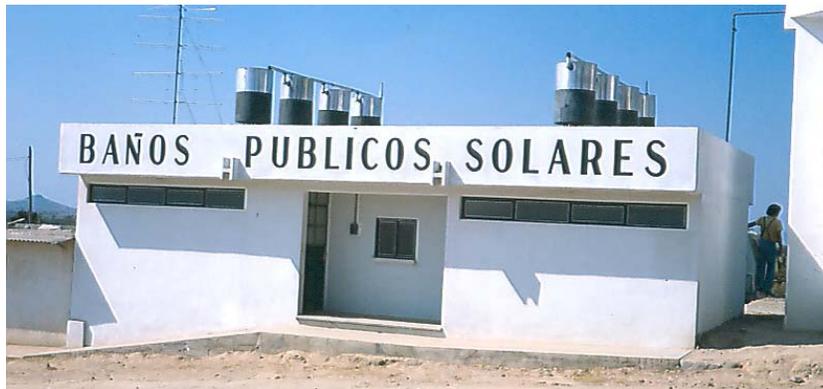


Fig 8.8 Baños públicos con colectores solares en Tlaxcala



Fig 8.9 Colectores solares planos



Fig 8.10 Colectores evacuados desarrollados en 1977

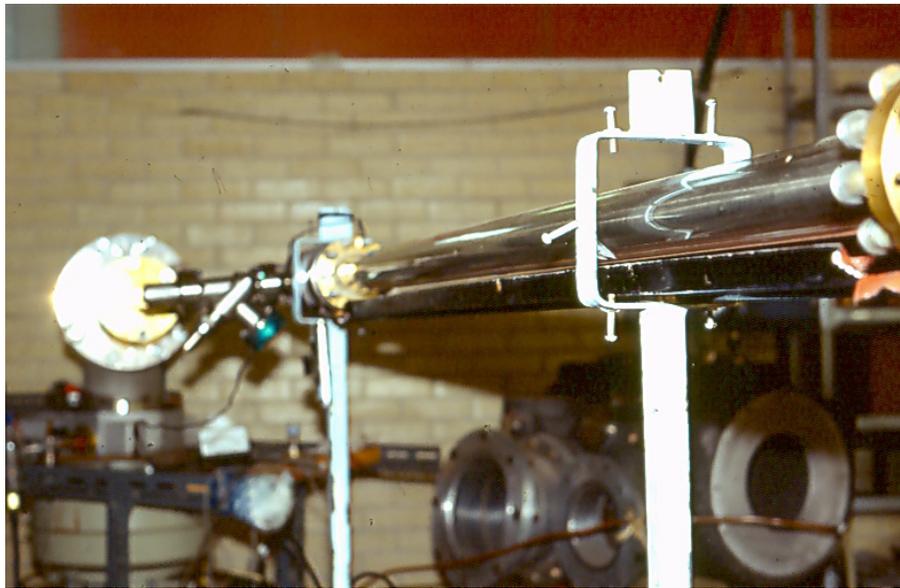


Fig 8.11 Tubo absorbedor evacuado para plantas solares

8.2.3 Películas selectivas

Se han desarrollado diferentes películas selectivas entre las que destacan óxido de fierro, óxidos sobre aluminio, óxido de cobre, cromo negro y níquel negro. Éstas fueron usadas en colectores solares planos, en tubos absorbedores de las plantas solares del II UNAM y en dispositivos de las cocinas solares (Almanza y Muñoz, 1994).



Fig 8.12 Espejos de primera superficie desarrollada para un concentrador canal parabólico

8.2.4 Materiales desarrollados para aplicación de la energía solar

Los materiales para usarse, tanto en tecnologías de concentración como en materiales de construcción para edificaciones y uso eficiente de la energía, son muy variados. Las investigaciones del II UNAM al respecto se han enfocado a espejos y filtros solares.

Una de las tecnologías que se asimiló y aplicó en este ámbito fue la de cañón de electrones y, posteriormente, la de erosión iónica (*sputtering*), ambas se desarrollan dentro de una cámara al alto vacío empleando materiales de muy alta pureza. Se logró la fabricación de espejos de primera superficie (fig 8.12), de segunda superficie, compuestos y filtros solares, empleando materiales tales como aluminio, plata, cobre, vanadio, tungsteno, hierro, cuarzo, alúmina, etc, usando evaporaciones simples o reactivas con oxígeno (Martínez *et al*, 2000)



Fig 8.13 Permeámetros utilizados en el estudio de arcillas para estanques solares

Este campo de materiales es muy amplio y con un vasto horizonte de aplicaciones.

8.2.5 Estanques solares

Se trabajó también en la caracterización fisicoquímica de arcillas que puedan servir como impermeabilizantes naturales para la retención de salmueras muy concentradas, que pueden encontrarse en los estanques solares (Silva, 2003). La fig 8.13 expone los permeámetros en laboratorio para las pruebas de permeabilidad.

8.2.6 Plantas termosolares

El trabajo sobre plantas termosolares en el II UNAM se inició en 1978 (Almanza y Muñoz, 1994); la primera planta experimental, que fue de 1kW, se muestra en la fig 8.14.



Fig 8.14 Planta solar de 1kW



Fig 8.15 Planta solar de 10 kW

Posteriormente se desarrolló una planta termosolar de canal parabólico, la más grande en Latinoamérica, cuya área de captación en sus orígenes (1982) era de 548 m² (fig 8.15), con un área total de espejos de 1386 m²; aunque por problemas de costos de mantenimiento se redujo a la mitad (1998), y quedó con 274 m² de área de captación (693 m² de espejos), dividida en ocho módulos de 15 m de largo con 2.5 m de apertura, cada módulo tiene 12 secciones de 1.14 m de largo (fig 8.16) hechas de fibra de vidrio con espejos comerciales de aluminio depositado sobre un sustrato de polimetilmetacrilato (acrílico).

En su inicio, la planta solar funcionaba con aceite mineral como fluido de captación y transferencia de calor, el cual se enviaba a un intercambiador de calor para producir vapor de agua. Adicionalmente contaba con una caldera de respaldo para proveer el calor faltante y producir la cantidad de vapor necesario para mover un motor de pistón acoplado a un generador de electricidad.

En ella se llevaron a cabo pruebas de diferentes tipos, tales como distintas configuraciones para operación del campo solar. Además, se probaron equipos diseñados por investigadores del Instituto; por ejemplo, bombas de desplazamiento positivo para aceite y agua, caldera tipo túnel, sistema electromecánico de seguimiento solar (fotodiodos y tornillo “sin fin”), el concentrador de canal parabólico y su estructura de soporte, tanques de expansión de aceite, almacenamiento de calor, etc.

Posteriormente comenzó una segunda etapa para la planta solar con la *generación directa de vapor* (GDV). Ésta requirió modificaciones al diseño original y permitió el desarrollo de una nueva área de aplicaciones de los sistemas solares de canal parabólico, la cual involucró materiales, configuraciones del campo solar, instrumentación, generación de electricidad, capacitación de personal, etc (Almanza *et al*, 2003, 2006).

Para ello se cambió por completo la tubería del fluido de trabajo, se cambiaron los espejos del campo solar y se instaló un motor de pistones (fig 8.17) acoplado a un generador eléctrico de 1kWe. En la fig 8.18 se observa el encendido de 10 focos de 100 W cada uno, lo cual se logra con esta nueva tecnología.

Vale la pena mencionar que la generación de electricidad con GDV fue reportada por primera vez internacionalmente por nuestro grupo (Almanza, y Lentz, 1998) Además de eso, se instaló una estación para medición de la irradiancia solar (piranómetro de banda rotatoria), velocidad y dirección del viento, así como temperatura ambiente.



Fig 8.16 Planta Solar actual de 5 kW



Fig 8.17 Motor de pistones impulsado con vapor, utilizado en la planta solar

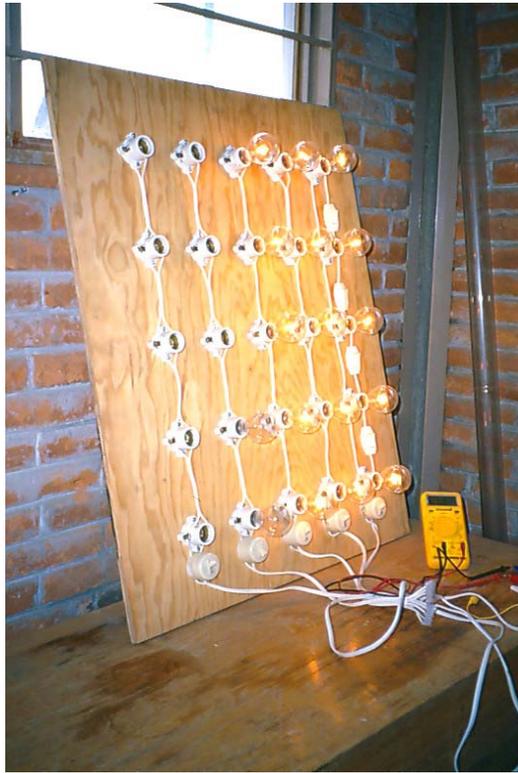


Fig 8.18 Focos encendidos (10 de 100 W) con la energía eléctrica producida en la planta solar

Se observó cierta problemática con los tubos absorbedores, lo que llevó a un estudio más detallado del flujo bifásico que se presenta durante la GDV, principalmente en los patrones del tipo estratificado y anular.

En 2004 la planta solar fue modificada para operar según la tecnología de generación directa de vapor de agua con instrumental electrónico; por ejemplo, se introdujeron sensores de temperatura de tipo RTD (resistencia de platino), sensores de presión electrónicos, medidores de flujo de varios tipos (electromagnético, vórtice y rotámetro), así como un sistema centralizado de adquisición de los datos de temperatura, presión y flujo correspondientes a la alimentación y descarga del campo solar. El tipo de instrumental que está instalado es relativamente moderno con medidores de alta precisión y confiabilidad, sin embargo, se requiere su constante actualización y mejora. Las actividades se han enfocado en la caracterización térmica de todas las partes por donde circula el agua a alta temperatura en sus fases de líquido, vapor, o una combinación de ambas.

8.2.7 Ventanas ahorradoras de energía

Las cantidades de energía utilizadas con el fin de alcanzar las condiciones de confort térmico humano dentro de las edificaciones no son nada despreciables, principalmente en las zonas norte y costera de nuestro país, donde la mayor parte del consumo de energía del subsector residencial es por concepto de acondicionamiento de aire, mientras que para muchas otras zonas el consumo por este concepto no llega a ser tan considerable. El diseño de cada edificio, por tanto, debe considerar la comodidad de los ocupantes de la edificación con el mínimo consumo de energía, procurando que sea la misma construcción la que regule los intercambios de materia y energía con el medio ambiente y propicie las condiciones que determinan la sensación de confort en el interior.

Uno de los principales mecanismos por medio del cual aumenta la ganancia térmica de una edificación (y con ello el nivel de desconfort térmico humano) es la radiación, emitida por el Sol, que se introduce a través de las ventanas de dicha edificación. Tal radiación solar es absorbida (transformándose en calor) y reflejada por los cuerpos del espacio interior, mientras que la radiación solar térmica (infrarrojo cercano o calor) provoca un calentamiento directo del aire, del que resulta una elevación de la temperatura del medio.

Como consecuencia, durante las temporadas calurosas, la edificación tendrá una ganancia térmica grande a través de las ventanas, por lo que el interior experimentará un aumento considerable de temperatura y, en consecuencia, un calentamiento excesivo. Por otro lado, durante los periodos del año de temperaturas bajas, el exterior se encontrará a una temperatura muy baja y, por tanto, la ventana será el principal elemento a través del cual la edificación perderá el calor generado en el interior. Para los grandes edificios modernos con fachadas cubiertas casi por completo por vidrios, este mecanismo se convierte en el más importante obstáculo para conseguir confort térmico en su interior. Este problema normalmente se soluciona mediante el uso de equipos de aire acondicionado y sistemas de calefacción.

Dentro de las alternativas para remediar el problema de desconfort en el interior de las edificaciones, surgido a raíz de las inadecuadas propiedades ópticas y térmicas de las ventanas, se encuentra una propuesta que consiste en colocar a los vidrios recubrimientos de materiales selectivos de la radiación, mediante los cuales se puede regular la entrada de la radiación solar que incida sobre las ventanas, es decir, lo que actualmente se conocen como *filtros solares*. Para este caso, se necesita que los filtros solares impidan el paso de

la radiación solar cuyas longitudes de onda están dentro del intervalo del infrarrojo cercano (calor), y lo permitan en el caso de la radiación solar visible.

El planteamiento es que puede propiciarse un ahorro en el consumo de energía en una vivienda por calefacción y aire acondicionado, cuando son utilizados filtros solares con base en películas delgadas de óxido ferroso (Chávez, 2007), cobre (Correa, 2002) y azufre depositadas sobre el vidrio que se usará en las ventanas, donde actuarán como elemento selectivo a la radiación solar con una transmisividad baja en el infrarrojo, lo que evita el calentamiento excesivo en el interior de la edificación provocado por ganancias térmicas grandes a través de las ventanas para las temporadas calurosas, así como la pérdida de calor generado en el interior durante las temporadas de clima frío.

8.3 Biomasa

La fig 8.19 muestra las diferentes alternativas de uso que proporciona la biomasa. Se consideran tres: biocombustibles, bioenergía y bioproductos. El II UNAM ha trabajado en la digestión aeróbica y anaeróbica desde hace 40 años. Los biodigestores de metano se implantaron en comunidades rurales de Tlaxcala y Morelos al final de los años 70.

En años recientes el tema de la biomasa ha adquirido mucha relevancia, principalmente en la producción de etanol a partir de la caña de azúcar y el maíz. En la fig 8.20 se muestra que la producción de etanol la hacen principalmente EUA y Brasil, con doble costo en la primera nación respecto a la segunda. Es conveniente aclarar que Brasil lo produce a partir de caña de azúcar, mientras que EUA lo hace con grano de maíz.

Sin embargo en un artículo reciente, Ford y Senauer (2007) establecen textualmente que: *gracias a los altos precios del petróleo y los fuertes subsidios, el etanol que se produce del maíz es ahora el último grito en los Estados Unidos. Pero se requiere de tanto suministro de maíz para mantener en marcha la producción de etanol que el precio del maíz –y el de los demás alimentos básicos– se está disparando en todo el mundo. Para detener esta tendencia, e impedir que aún más personas sufran hambre, Washington tiene que conservar más los insumos para la producción de etanol y diversificarlos.* Mientras Matthew L Wald (2007) comenta que: *El etanol podría sustituir a la gasolina, pero no será verdaderamente provechoso mientras no sepamos destilarlo a gran escala de hierbas, de los tallos de maíz o de paja de los cereales, y no, como hasta ahora, sólo de los granos.*

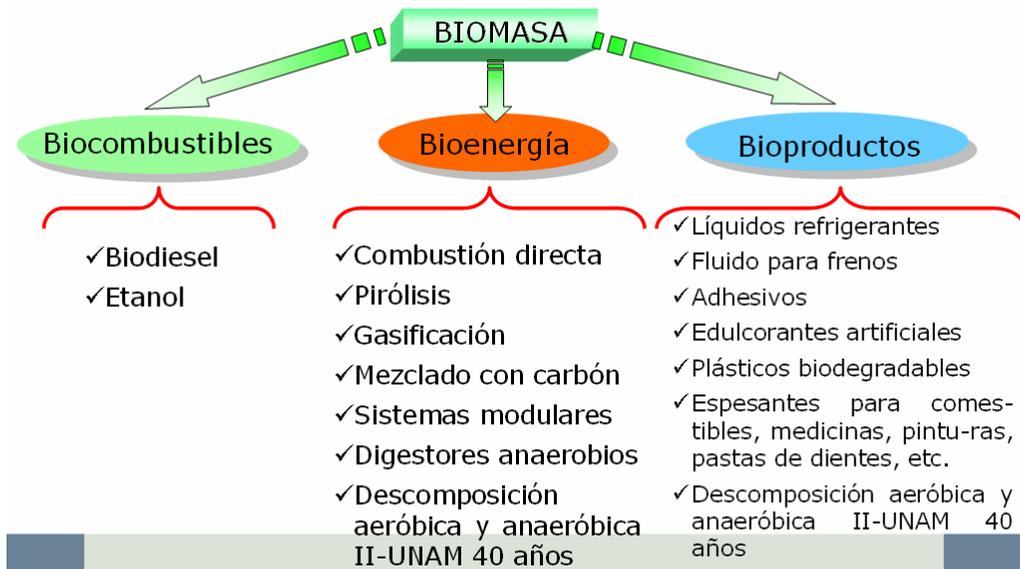


Fig 8.19 Diferentes alternativas de aprovechamiento de la biomasa

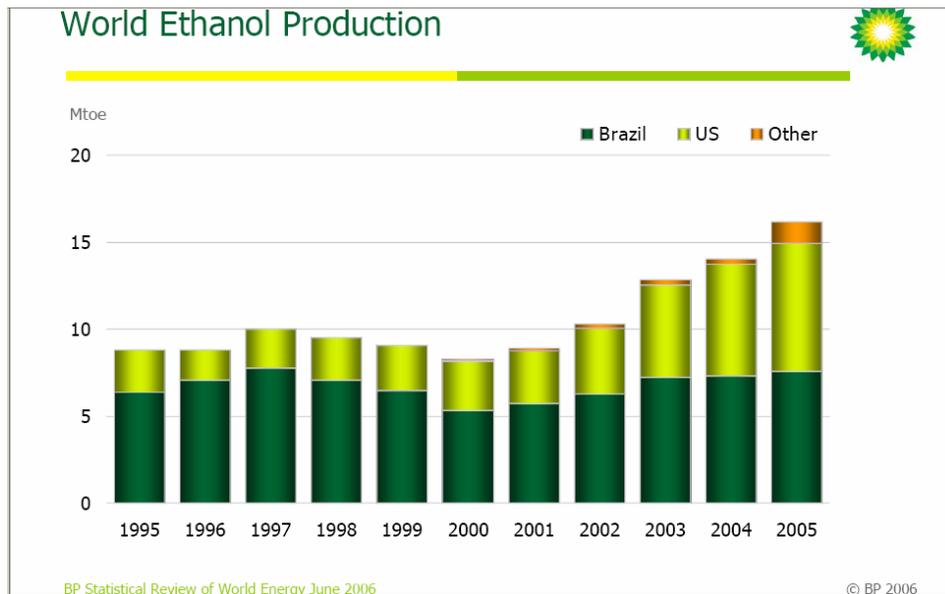


Fig 8.20 Producción mundial de etanol (British Petroleum, 2006)

8.4 Sistemas híbridos

Para mejorar un sistema energético es necesario ajustar el consumo de energía a la generación de la misma y viceversa. Otro aspecto es el relacionado con el almacenamiento en sistemas intermitentes como la energía solar y de viento, entre otros.

De manera que si se requiere un sistema confiable para generar electricidad con fuentes intermitentes, entonces es necesario hacer uso de un almacén.

Para lograr un sistema eficiente se han propuesto sistemas híbridos, en algunos casos utilizando el gas natural, el cual es el menos contaminante de los hidrocarburos, o la biomasa. Sin embargo, para el futuro, este aspecto puede ser poco trascendental al lograrse sistemas más autónomos y eficientes. Por lo pronto en el futuro cercano, la hibridación es muy importante. Como ejemplos actuales, se pueden mencionar los ciclos combinados con gas y energía solar, como es el sistema de 354 MWe con canal parabólico en el desierto de Mojave, CA. También existen varios ejemplos de cogeneración.

La fig 8.21 es un esquema de cómo los sistemas convencionales y los renovables deben verse en la actualidad.

8.4.1 Solar-biomasa

Por lo que respecta a sistemas híbridos, se muestra en la fig 8.22 un ejemplo de energía solar-biomasa, alimentado con estiércol de vaca que mediante digestión anaeróbica por bacterias metanogénicas del tipo mesofílicas que trabajan en el intervalo de temperatura de 25 a 35°C, y producen así gas metano.

Debido al requisito de la temperatura, es necesario un calentador solar que suministre calor al digestor (Almanza y Muñoz, 1994). Estos sistemas fueron instalados en la década de los 70 en una comunidad rural del estado de Morelos. El gas metano producido se utiliza para cocinar alimentos.

8.4.2 Estudio de un sistema híbrido solar-geotérmico en Cerro Prieto, BC

Cerro Prieto es el campo geotérmico más importante del país y además en esta zona se presentan los mayores niveles de irradiancia solar de *México*. En esta entidad se propone la creación de un sistema híbrido solar-geotérmico (Lentz y Almanza, 2006, 2006a), donde un campo solar de concentradores de canal parabólico se integre al ciclo geotérmico de Cerro Prieto, para lograr con esto un aumento en la producción de vapor durante el día para la generación de electricidad (Lentz, 2005).

- Basado en fuentes convencionales:
 - **DERROCHADOR**
Rendimiento bajo
 - **CONTAMINANTE**
Desequilibrio térmico, químico
 - **SIN FUTURO**
Agotamiento de los recursos
- Basado en fuentes renovables:
 - **EQUILIBRADO EN EFICIENCIA**
Más ajustado a las necesidades
 - **POCO CONTAMINANTE**
Fuentes primarias naturales
 - **DESARROLLO SUSTENTABLE**
Fuentes no agotables

Transición: Sistema energético híbrido más descentralizado y eficiente. Más complejo.

- Basado en fuentes convencionales:
 - **MÁS CARO EN EL FUTURO.**
Combustibles fósiles caros
 - **MÉXICO**
No tiene gas natural ni carbón
 - **EXTERNALIDADES**
No evaluadas con precisión
- Basado en fuentes renovables:
 - **MÉXICO**
Solar, geotermia, viento, mareas, biomasa e hidráulica. Selección adecuada, dependiendo de zona geográfica. Integración ER en los sistemas de potencia tradicionales.

PLANTAS CANAL PARABÓLICO
1 kW a 64 MW

Fig 8.21 Sistemas energéticos híbridos



Fig 8.22 Sistema híbrido solar-biomasa, digester de metano

Este sistema aprovechará las dos fuentes de energía para proveer vapor al ciclo geotermoeléctrico actual de ciclo Rankine abierto.

Durante el verano la demanda de electricidad en Mexicali es muy alta. En esta época se tienen temperaturas máximas de más de 50°C, de manera que el uso de aire acondicionado provoca una alta demanda eléctrica.

Cuatro alternativas se han analizado para dicho propósito: En la primera el campo solar está entre el pozo geotérmico y el primer separador salmuera-vapor; en la segunda, el campo solar se encuentra entre el primero y segundo separador; mientras que en la tercera se utiliza el fluido residual de las torres de enfriamiento para generar vapor a las condiciones de la turbina en el campo solar y, finalmente, en la cuarta también se genera vapor mediante un campo solar pero con el excedente de agua de la torre de enfriamiento; en esta última opción, se añade un tanque de evaporación instantánea, con el que se suministra vapor a la turbina.

Los campos de concentradores solares pueden tener orientación Norte-Sur o Este-Oeste, por lo que ambas fueron estudiadas, con el propósito de incrementar sólo en 10 % la calidad del vapor. Este porcentaje se encuentra limitado debido a la presencia de sales y sílice en la salmuera geotérmica proveniente de los pozos, así se evitan altas concentraciones en ella. En este estudio se obtuvieron el tamaño de los campos y la producción anual en cada opción; se obtuvo la mayor producción en los meses de verano cuando la demanda de electricidad es mayor. En la fig 8.23 se presenta una de las alternativas.

Fue necesaria una simulación teórico-experimental (Martínez, 2005) de la mezcla vapor-salmuera; ésta se simuló como generación directa de vapor (GDV) dentro de un tubo absorbedor en un concentrador solar de canal parabólico, el cual se localiza en el foco de la parábola. Es un proceso complejo de caracterizar por la presencia de flujo bifásico (líquido-vapor), en el que hay que hacer énfasis en dos patrones diferentes: estratificado y anular. Para el presente estudio se planteó la problemática de cómo es el comportamiento térmico de un tubo absorbedor cuando por él fluye agua en dos fases con un patrón de flujo anular, es decir en el centro fluye vapor y en la periferia sólo líquido.

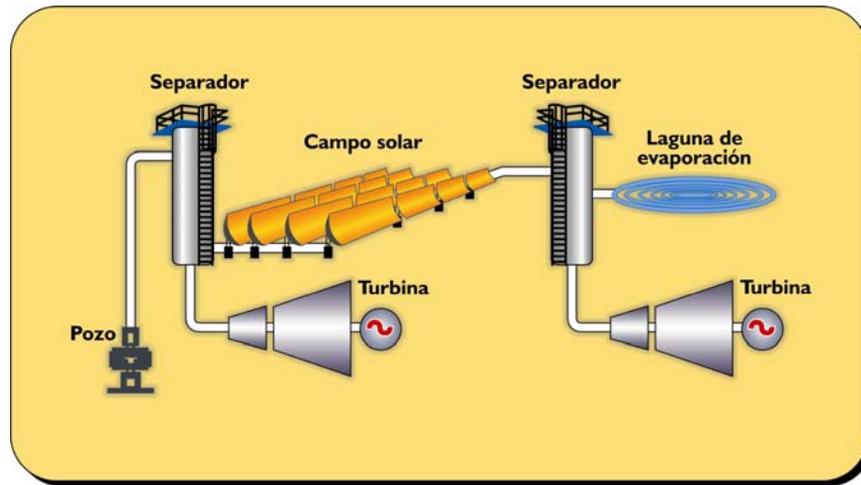


Fig 8.3 Sistema híbrido solar-geotérmico

Se recibe energía radiante del Sol concentrada como fuente de calor, en la parte inferior y lateral del mismo. Este trabajo de investigación se ha desarrollado en dos sentidos: teórico y experimental.

Mediante el análisis matemático se ha planteado un modelo de temperaturas para una determinada sección transversal de tubo absorbente donde existe flujo bifásico con patrón anular. Como parte experimental se generaron datos en la Planta Solar del Instituto de Ingeniería que permiten caracterizar un proceso de baja potencia con GDV y así corroborar los resultados del modelo matemático. Éstos involucran presión, temperatura y flujo de vapor obtenido en el proceso, bajo condiciones controladas de flujo alimentado y un intervalo amplio de condiciones de irradiancia solar directa normal.

Bajo ciertas condiciones los resultados experimentales pueden ser comparados con sistemas equivalentes de gran potencia; por ejemplo, el instalado en la Plataforma Solar de Almería, de forma tal que se puede plantear de manera aceptable lo que se espera de sistemas de media potencia. De esta manera se amplía el conocimiento sobre procesos de GDV en sistemas termosolares. Se espera que la aplicación directa se dé en un sistema híbrido de generación de potencia de tipo geotérmico-solar.

8.5 Energía de los océanos

La radiación solar incidente sobre los océanos, en determinadas condiciones atmosféricas, da lugar a los gradientes térmicos oceánicos (diferencia de temperaturas) a bajas latitudes

y profundidades menores de 1000 m. Las variaciones de -2° a 25° C, generan corrientes (*energía mareotérmica*).

La interacción de los vientos y las aguas es responsable del oleaje y de las corrientes marinas.

La influencia gravitacional de los cuerpos celestes sobre las masas oceánicas provoca mareas (*energía mareomotriz*).

Los gradientes térmicos también pueden ser utilizados como una fuente de energía, pero éstos son tan bajos que se ha realizado muy poco trabajo sobre ellos.

La alternativa más desarrollada y conocida es la mareomotriz. La primera central mareomotriz fue la de Rance, en Francia, que ha estado funcionando casi dos décadas desde 1967. Consistió en una presa de 720 m de largo, que creaba una cuenca de 22 km². Tenía una esclusa para la navegación, una central con 24 turbinas de bulbo y seis aliviaderos: generaba 240 MW. Desde el punto de vista técnico-económico funcionaba muy satisfactoriamente y proporcionó muchos datos y experiencias para proyectos del futuro. Rance producía 500 GW/año: 300 000 barriles de petróleo. Sus gastos anuales de explotación en 1975 fueron comparables a los de plantas hidroeléctricas convencionales de la época, no perjudicaba al medio ambiente y proporcionaba grandes beneficios socioeconómicos en la región. Se benefició la navegación del río y se duplicó el número de embarcaciones que pasaban por la esclusa; además en el coronamiento de esta estructura se construyó una carretera. Aún funciona, pero ahora con flujo y reflujo, con una capacidad actual de 500 MW.

Una de las ventajas más importantes de estas centrales es que tienen las características principales de cualquier central hidroeléctrica convencional, lo que les permite responder en forma rápida y eficiente a las fluctuaciones de carga del sistema interconectado, generando energía libre de contaminación, externa de variaciones estacionales o anuales, a un costo de mantenimiento bajo y con una vida útil prácticamente ilimitada.

La conveniencia de contar con fuentes alternas de energía limpia, renovable y no contaminante, recomienda aprovechar las grandes oscilaciones del nivel del mar que ocurren en la desembocadura del río Colorado —diferencia entre pleamar y bajamar es

más de 10 m— para producir energía eléctrica y de este modo sustentar el crecimiento de tan importante y promisorio territorio fronterizo (Montage, 2004). A continuación se reproduce en forma textual lo que dicho proyecto presenta:

La principal característica técnica, económica y social que diferencia al Proyecto Montage Mareomotriz con relación a otros proyectos similares en el mundo, sería básicamente el importante y vasto almacenamiento de su embalse-marisma, que crearía su dique-carretero (presa-rompeolas de 7.5 metros de altura con respecto al nivel cero del mar y 48 kilómetros de longitud). En forma general, por cada unidad turbogeneradora reversible de 50 megawatts se generarían 220 millones de kilowatts-hora al año. Por la gran capacidad del embalse-marisma, existiría mayor versatilidad de operación en la central mareomotriz, al evitar estar sujeta al régimen horario de las mareas -implicaría almacenar energía y tener mejor flexibilidad de funcionamiento-. De acuerdo con estas condiciones, la potencia recomendable por instalar sería de 800 megawatts para producir 3 520 millones de kilowatts-hora, lo que permitiría un ahorro de 5.9 millones de barriles de combustóleo por año.

8.6 Costos de fuentes renovables

Considerando al *Escenario alternativo*, se vaticina que más plantas hidroeléctricas serán construidas, principalmente en países desarrollados, donde este potencial es todavía grande.

La participación de las hidroeléctricas será 16 % mayor para 2030, respecto a la actual. La capacidad alcanzará 1 431 GW en 2030, comparado con los 851 GW actuales (World Energy Outlook, 2006).

Por lo que respecta a las energías *de biomasa, eólica, solar, geotérmica y mareomotriz*, éstas alcanzarán 2 872 TWh en 2030, una capacidad casi ocho veces mayor que la actual y 27 % mayor que la obtenida en el *Escenario de referencia*. Su participación en la generación de electricidad va a crecer de 2 % actualmente a 10 % en 2030, y serán la *eólica* y la de *biomasa* las más participativas. Estos aumentos reflejan nuevas políticas para apoyar el desarrollo de las energías renovables, así como la reducción en sus costos (fig 8.24).

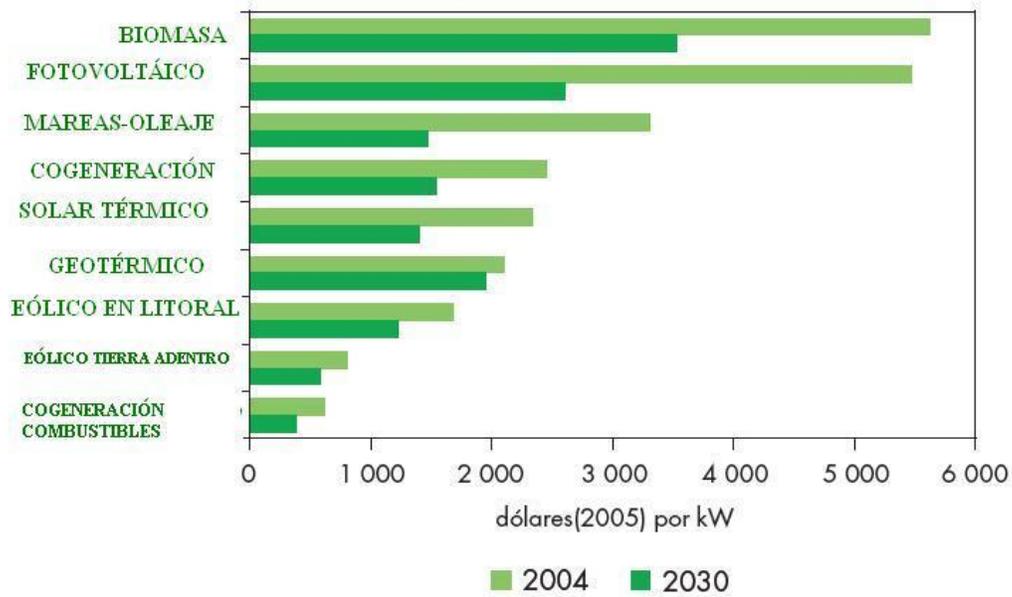


Fig 8.24 Costos de inversión de fuentes renovables para la generación de potencia tomando como base el escenario alternativo para 2004-2030 (World Energy Outlook, 2006)

9. CONCLUSIONES

Para poder alcanzar desarrollos tecnológicos que faciliten la transición hacia sistemas energéticos renovables, es necesario realizar las siguientes acciones, aunque algunas no hayan sido tratadas en este documento: i) *sistemas híbridos*: de energías renovables con convencionales (ERNoC+convencionales), y sistemas con dos tipos de energías renovables (ERNoC+ ERNoC), ii) ingeniería de *materiales* para uso en concentradores solares en la generación directa de vapor, películas selectivas para alta temperatura, y celdas solares, a fin de bajar los costos de la conversión fotovoltaica directa de la energía solar, iii) la ingeniería genética para generar combustibles a partir de *biomasa*, iv) la *catálisis* aplicada a la transformación de compuestos biorrenovables, v) la *química del dióxido de carbono* para conocer la forma de su interacción y su eliminación de la atmósfera, vi), el desarrollo de *catalizadores* para producir eficientemente, con radiación visible-UV, descomposición de aire y agua en radicales para usarse en desintoxicación y desinfección, vii) obtención de *hidrógeno*, viii) *celdas de combustible*, ix) desarrollo de *sistemas híbridos de combustión*, por ejemplo *biomasa-carbón tradicional* en sistemas actuales de potencia.

Se presentan estas líneas clave de investigación básica para poder contar en las próximas décadas con soluciones tecnológicas aplicables para el establecimiento de un sistema energético renovable. Las informaciones presentadas en este documento son claras a la hora de indicar qué cambios sustanciales debe sufrir el actual sistema energético para minimizar sus efectos medioambientales, y así realizar un enorme esfuerzo en inversión en investigación básica o fundamental en las áreas anteriores. No obstante, el crecimiento hasta la fecha en la inversión con la que se abordan los programas de investigación y desarrollo, tanto público como privado en la UE y EUA, no están en consonancia con la necesidad urgente de los retos que hay que superar; para México esto todavía está más

lejano. La tendencia, sin embargo, puede cambiar drásticamente, si se invierten fondos para investigación y desarrollo en energía de manera similar a la existente tras la crisis del petróleo de los años 70; especialmente si aumentan las amenazas geopolíticas sobre el suministro de petróleo y la aportación de nuevas evidencias acerca de la cada vez más demostrada influencia del hombre sobre el cambio en el clima. Pero, incluso si se cumple el Protocolo de Kioto, esto no es suficiente para solucionar el problema. Unas tres cuartas partes de las emisiones antropogénicas de CO₂ a la atmósfera durante los últimos 20 años son debidas a la quema de combustibles fósiles.

Adicionalmente, deben tomarse acciones como:

1. *Reducir la emisión de todos los gases que contribuyan al efecto de invernadero es la principal acción por tomar.* La reciente publicación del Segundo Informe de Evaluación del IPCC muestra la urgente necesidad de enfrentar el cambio climático global. De manera que para reducir las emisiones de dióxido de carbono (y hay que hacerlo con urgencia, de acuerdo con los científicos del IPCC, si queremos detener el calentamiento global del planeta) no es posible aplicar filtros, ni sirve de gran cosa mejorar el proceso de combustión ni basta cambiar un combustible fósil por otro. *La única solución es quemar menos cantidad de combustibles fósiles, es decir ir sustituyendo estos combustibles por fuentes de energía limpia: las energías renovables cumplen este requisito.*
2. *Mejorar la comprensión de los beneficios técnicos* relacionados con la integración de las ERNoC en los sistemas de potencia tradicionales.
3. *Combatir la deforestación* es otro aspecto muy importante para contribuir a mitigar el cambio climático.
4. *Expresar las mejoras sociales* que optimizando el acceso a servicios de energía limpia y haciendo más accesibles las energías renovables se pueden lograr para los países en desarrollo y en transición.
5. *Promover beneficios económicos* para las naciones que usen en forma eficiente la energía, principalmente para las que usen exclusivamente energías renovables o sistemas híbridos.
6. *Hacer comprender la relación entre el clima y las diferentes estrategias* actuales de producción de energía, según la necesidad enfatizada por Whitesides y Crabtree (2007), en su análisis de los retos y problemas científicos asociados con el cambio del sistema energético.

7. *Modificar y mejorar el sistema educativo* para instruir a toda la población del país en temas tales como el cuidado del ambiente, del agua, y el ahorro de energía, desde la primaria hasta la educación superior en todos los niveles socioculturales.
8. *Aprovechar el desarrollo y madurez de la ingeniería de la energía solar* para obtener producciones considerables de las diferentes tecnologías ya demostradas.

10. AGRADECIMIENTOS

El doctor Iván Martínez Cienfuegos aportó valiosos comentarios a este trabajo.

Tres revisores, cuyo nombre desconozco por la confidencialidad del arbitraje, hicieron atinados comentarios que fueron ampliamente tomados en cuenta para mejorar este documento.

Julio Alberto González Medina realizó una revisión minuciosa del documento final para una mejor presentación del mismo.

11. REFERENCIAS

- Almanza, R, Callejas, O, Correa, G, Flores, V, Jiménez, G, Lentz, A, Martínez, I, Mazari, M, y Silva, G (2006), *Ingeniería de la Energía Solar II*, SID/636, Instituto de Ingeniería, UNAM, 439 pp, www.ii.unam.mx
- Almanza, R, Chicurel, R, Hiriart, G, Palacios, L, y Díaz, A (1978), Propuesta para generar energía eléctrica y mecánica usando energía solar por procesos fototermomecánicos a potencias de 35 KW, proy interno 8054, *II, UNAM*
- Almanza, R, y Lentz, A (1998), Electricity production at low powers by direct steam generation using parabolic troughs, *Solar Energy*, **64**(1-3), 115-120
- Almanza, R, y Muñoz, F (1994), *Ingeniería de la Energía Solar*, El Colegio Nacional
- Arctic sea ice changes in gfdl climate change scenario experiments, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (gfdl), <http://www.gfdl.gov/~kd/KDwebpages/NHice.html>. January 11, 2007
- British petroleum (2006), *Quantifying energy, BP statistical review of world energy*, British petroleum
- Chapin, S (2006), *Alaska's Changing Boreal Forest*, edited by FS Chapin, MW Oswood, K van Cleve, LA Viereck y DL Verbyla
- Chavez, J, y Almanza, R (2007), Solar filters based on iron oxides for energy savings with efficient windows, *Solar Energy*, **81**(1), 13-19
- Correa Miranda, G (2002), Fabricación de filtros solares para ahorro de energía con recubrimientos de $\text{Cu}_2\text{O}+\text{CuS}$ y VO_2 , tesis de doctorado, *II, UNAM*, abr
- Correa, G, y Almanza, R (2004), Copper based thin films to improve glazings for energy-savings in buildings, *Solar Energy*, **76**(1-3), 111-115
- Cubasch, U (2007), Climate projections, including regional projections and sea level, *M&D at the Max-Planck-Institut für Meteorologie*, Hamburgo, Alemania

- Flores Lara, V (2003), Comportamiento de un receptor bimetálico durante transitorios en la generación directa de vapor, usando concentradores tipo canal parabólico, tesis de doctorado, *II, UNAM*, feb
- Flores, V, y Almanza, R (2004), Behavior of the compound wall copper-steel receiver with stratified two-phase flow regimen in transients states when solar irradiance is arriving on one side of receiver, *Solar Energy*, **76**(1-3), 195-198
- Flores, V, y Almanza, R (2004), Direct steam generation in parabolic trough concentrators with bimetallic receivers, *Energy*, **29**(5-6), 645-651
- Flores, V, y Almanza, R (2007), Behavior of bimetallic absorber in parabolic collectors during DSG to low powers, *Journal of Solar Energy Engineering*, ASME, **129**(2), 249-251, may
- Ford Runge, C, y Senauer, B (2007), How biofuels could starve the poor, *Foreign Affairs*, may/june
- Galán, J, y Almanza, R (2007), Solar filters based on iron oxides for energy savings with efficient windows, *Solar Energy*, **81**(1), 13-19
- Greenpeace Internacional (2002), Energía limpia para el desarrollo sustentable, *Elija la energía positiva*, Greenpeace Internacional, www.greenpeace.org, feb
- IEA (International Energy Agency) (2007), World Energy Outlook 2006, OECD/IEA,
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (1992), *Climate Change 1992: The supplementary report to the IPCC scientific assessment* (Houghton, JT, Callander, BA, y Varney, SK [eds]), Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 116 pp
- IPCC (1996), *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Houghton, JT, Meira Filho, LG, Callander, BA, Harris, N, Kattenberg, A, y Maskell, K [eds]), Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, EUA, 572 pp
- IPCC (2007), *Climate change: The physical science basis*, Intergovernmental Panel on Climate Change, This Summary for Policymakers was formally approved at the 10th Session of Working Group I of the IPCC, UNEP and WMO, París, Francia, feb
- Kevin, A, Timothy, H, y Jonathan, P (2005), Navigatin the numbers: greenhouse gas data and international climate policy, *World Resources Institute*, dic
- King, A, Dilling, L, Zimmerman, G, Fairman, D, Houghton, R, Marland, G, Rose, A y Wilbanks, T (2007), The first state of the carbon cycle report (SOCCR), The North

- American Carbon Budget and Implications for the Global Carbon Cycle, *US Climate Change Science Program*, nov
- Kutscher, CF (2007), *Tackling climate change in the US. Potential carbon emissions reductions from energy efficiency and renewable energy by 2030*, American Solar Energy Society, ene
- Lentz, Á (2005), Incremento en la cantidad de vapor de los ciclos geotermoeléctricos mediante concentradores solares de canal parabólico, tesis de doctorado, *II, UNAM*, may
- Lentz, Á, y Almanza R (2006), Parabolic trough concentrators to increase the geothermal wells enthalpy, *Solar Energy*, **80**(10), 1290-1295
- Lentz, Á, y Almanza, R (2006a), Solar-geothermal hybrid system, *Applied Thermal Energy*, **26**, 1537-1544
- Marland, G, Boden, TA, y Andres, RJ (2007), Global, regional, and national CO₂ emissions, in Trends: A Compendium of data on global change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, EUA. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn, EUA
- Martínez Cienfuegos, I (2005), Análisis teórico-experimental de flujo bifásico anular en tuberías horizontales para un sistema solar-geotérmico, tesis de doctorado, *II, UNAM*, may
- Martinez, I, Almanza, R, Mazari, M, y Correa, G (2000), Parabolic trough reflector manufactured with aluminum first surface mirror thermally sagged, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **64**(1), 85-96
- Martinez, I, y Almanza, R (2007), Experimental and theoretical analysis of annular two-phase flow regimen in DSG for a low-power system, *Solar Energy*, **81**(2), pp 216-222,
- Montage, Proyecto Montage mareomotriz, http://www.mexicotm.com/interior/p/p_pp_noreste02.html, 2004
- Naciones Unidas (1998), *Protocolo de Kioto* de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático, FCCC/INFORMAL/83* GE.05-61702 (S) 130605 130605
- Nakicenovic, N; Alcamo, J; Davis, G; de Vries, B; Fenhann, J; Gaffin, S; Gregory, K; Grübler, A; Jung, T Y; Kram, T; La Rovere, E L; Michaelis, L; Mori, S; Morita, T; Pepper, W; Pitcher, H; Price, L; Raihi, K; Roehrl, A; Rogner, H H; Sankovski, A; Schlesinger, M; Shukla, P; Smith, S; Swart, R; van Rooijen, S; Victor, N, y Dadi, Z (2000), *Emissions scenarios*. A special report of working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge,

- Reino Unido y Nueva York, EUA, 599 pp
- Nowak, S, Gutschner, M, y Favaro, G (2003), *Impact of technology development and cost reductions on market grow*, REMAC 2000, NET Ltd, St Ursen, Suiza
- PNUD (1997), *La energía después de Río: Perspectivas y retos*, sección 2.3.2.
- SENER (2006), *Balance Nacional de Energía 2005*
- Silva, G (2003), Efectos de salmuera y temperatura en la permeabilidad de suelos arcillosos, tesis de doctorado, *Instituto de Ingeniería, UNAM*, dic
- Wald, M L (2007), Is ethanol for the long haul?, *Scientific American*, ene
- Whitesides, G M, y Crabtree, G W (2007), Don't forget long-term fundamental research in energy, *Science*, feb 9, **315**(5813), 796 - 798
- World Bank Group (2000), Indoor air pollution, energy and health for the poor, *Boletín Informativo del World Bank Group*, No 1, sep, <http://Inweb18.worldbank.org/>

Corrección idiomática y edición final
Olivia Gómez Mora

Cotejo
Gabriel Sánchez Domínguez

Impresión
Albino León Cruz e Israel García Castro

INSTITUTO DE INGENIERÍA
Unidad de Promoción y Comunicación
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria
Coyoacán 04510, México, DF