

LAS ENERGÍAS RENOVABLES: LA ENERGÍA SOLAR Y SUS APLICACIONES

Claudio A. Estrada Gasca y Camilo A. Arancibia Bulnes
Centro de Investigación en Energía, Universidad Nacional Autónoma de México.

Este artículo esta basado en uno elaborado para el Consejo Consultivo de Ciencias de la Presidencia de la Republica que saldrá publicado en forma impresa, por ese organismo, en febrero del 2011. Se presenta para su publicación en la RDU siempre y cuando se mencione el credito parcial para el CCC.

Las energías renovables: la energía solar y sus aplicaciones

Resumen

El objetivo de este trabajo es reflexionar sobre el problema actual de la energía en el mundo y en México y considerar a las energías renovables (ER), en particular a la solar como una alternativa para enfrentar el agotamiento de los yacimientos de combustibles fósiles y garantizar la conservación del medio ambiente permitiendo acceder a un desarrollo sustentable. En el artículo se plantea el problema de la energía en el mundo y en México, los mercados de las ER, la estructura energética mundial y en México, las inversiones en ciencia y tecnología en ER, los escenarios futuros de la energía y las tecnologías de energía solar y sus aplicaciones.

Palabras clave: Energía en el mundo, energía renovable, energía solar, tecnología fotovoltaica, tecnología fototérmica.

El problema de la energía

La energía es una de las problemáticas que definirán el destino de México y el mundo en el siglo que comienza. Lo que hagamos o dejemos de hacer a partir de ahora determinará nuestra capacidad para satisfacer los requerimientos energéticos del país, en el futuro.

Como se sabe las fuentes primarias de energía que dominan en el mundo son los hidrocarburos y en la actualidad corresponden al 80.8% de toda la energía primaria producida y consumida. En México, la dependencia es mayor, en el año 2007, el 92% de la producción de energía primaria correspondió a combustibles fósiles, (67% petróleo, 23% gas y 2% carbón) [1].

Los países emergentes (China, India, Brasil, México...) y los países menos desarrollados necesitan para su desarrollo tener acceso pleno a las fuentes de energía modernas, entendidas estas como electricidad y carburantes. De ahí que la demanda energética mundial está en continuo aumento a un ritmo de crecimiento anual del 2%. A medida que crece la población y las economías, millones de personas en todo el mundo disfrutan de los beneficios de un estilo de vida que requiere cantidades de energía cada vez mayores. Según la AIE, en su escenario de referencia, la demanda mundial de petróleo evolucionará de 84 millones de barriles al día en 2005 a 116 millones de barriles diarios en 2030, es decir se incrementará un 38% más en ese periodo. Lo cual es un reto colosal en términos de inversiones, en particular en un contexto de declinación de las reservas y las plataformas de producción de petróleo.

¿Cuándo tocará techo la producción mundial? Algunos sugieren hacia el 2012, otros más el 2020 y algunos otros el 2050. A partir de ese

- La población va en aumento: 6,600 M (ahora) - 8,000 M (2030)
- La demanda y los consumos mundiales de energía van en aumento
- El pico de la producción de hidrocarburos convencionales a nivel mundial ya se alcanzó o se alcanzará en los próximos años
- El uso de hidrocarburos genera gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático

momento la producción disminuirá. Cualquiera que sea la fecha, para los expertos petroleros del mundo es claro que este recurso está declinando rápidamente en relación a la escala temporal humana. Lo más probable es que mucho antes que se alcance este límite, que eventualmente puede ser extendido por los avances tecnológicos, el juego de la oferta y la demanda petrolera y su impacto en la evolución de los precios del petróleo constituirán los factores determinantes de la era del petróleo.

Adicionalmente, ya es un lugar común decir que la producción de gases de efecto invernadero, principalmente el bióxido de carbono debido al uso intensivo de los hidrocarburos, son los precursores del incremento de la temperatura media global y consecuentemente del llamado cambio climático, con todas las consecuencias para los seres humanos que ello implica.

Por todo lo anterior, es urgente una utilización más racional de la energía y la sustitución de los combustibles fósiles por otros tipos de energía.

Ante esta situación energética mundial y nacional, México requiere un cambio de paradigma energético. Es inevitable preguntarse ¿con cuáles fuentes energéticas se pueden enfrentar el agotamiento de los yacimientos de combustibles fósiles que permitan la conservación del medio ambiente para un desarrollo sustentable?

Para comprender mejor el reto energético de las futuras generaciones consideremos que la brecha energética que se generará debido a los hidrocarburos es enorme. Efectivamente: en el año 2008, la energía total que se consumió correspondió a la producción continua de una capacidad instalada mundial equivalente a 15 TW¹, y se estima que para el año 2050 se requerirán tener 30 TW. Esto es, en solo 42 años deberemos de duplicar la actual capacidad de generar energía para satisfacer la demanda creciente de la misma.

Volvemos a preguntarnos ¿existen las fuentes energéticas que puedan satisfacer esta necesidad? La tabla 1 muestra el potencial aproximado de las energías renovables en el mundo. Las fuentes renovables de energía (FRE) son aquellas que por su cantidad en relación a los consumos que los seres humanos pueden hacer de ellas son inagotables y su propio consumo no afecta el medio ambiente. Ellas son la energía solar, la eólica, la biomasa, la geotérmica, las mini, micros y pequeñas centrales hidroeléctricas y la oceánica. En la tabla destacan las energías proveniente de la biomasa, el viento y el sol con 5, 4 y 60 TW técnicamente factibles y solo 1.4, 0.121 y 0.0135 TW de capacidad instalada al 2008 respectivamente.

Todos los potenciales técnicamente factibles de las fuentes renovables de energía suman aproximadamente 70 TW. Con estas condiciones, es claro que las energías renovables podrían satisfacer la demanda y que la única fuente energética que por si sola podría con todo el requerimiento de 15 TW es la solar [2].

La respuesta a la pregunta antes formulada es afortunadamente positiva. Creemos que el uso racional y eficiente de las actuales fuentes energéticas y las energías alternativas: energías renovables (ER) y energía nuclear, son la solución al problema energético planteado.

Tabla 1. Potencial aproximado de las energías renovables en el mundo

	Potencia global teórica	Técnicamente factible	Capacidad instalada (2008)
Hidráulica	4.6 TW	1.7 TW	0.9 TW
Biomasa	7 a 10 TW	5 TW	1.4 TW
Geotermia	12 TW	0.6 TW	0.054 TW
Viento	50 TW	2 a 4 TW	0.121 TW
Solar	600 TW	60 TW	0.0135 TW
Total	Apro. 676 TW	Aprox. 70 TW	2.53 TW
Nuclear	17.5 TW	10 TW	0.845 TW

1 TW = 10^{12} W : 1,000 Complejos GPE de 1,000 MW cada uno.

Mercado mundial de las ER

Las tecnologías que aprovechan a las fuentes renovables de energía, en diversos estados de desarrollo, han estado presentes en la historia de los seres humanos desde siempre. Sin embargo, con el advenimiento de la revolución industrial, cuya pieza fundamental fue la máquina de vapor desarrollado por James Watt en 1774 y que requería para su funcionamiento un combustible de alta densidad energética como el carbón, las energías renovables empezaron a ser sustituidas por los hidrocarburos. En las últimas décadas y debido a las crisis petroleras, la investigación y desarrollo de las tecnologías que aprovechan a las FRE se ha intensificado al punto de generar tecnologías actualmente en estado comercial. Pero más aún, estos mercados han tenido en los últimos años un crecimiento realmente explosivo.

Se pueden mencionar entre los factores que han permitido el desarrollo actual de los mercados de las FRE a los siguientes:

- ⊕ El alza de los precios de los hidrocarburos que llegó a 139 USD en Junio del 2008 y que podrían llegar a los 150 dólares por barril o más en los años venideros.
- ⊕ El mercado mundial de emisiones de CO₂ que esta en 13 USD la tonelada de CO₂ y en el futuro podría llegar hacia los 40 o 60 dólares la tonelada.
- ⊕ Las políticas voluntarias de los varios estados (Unión Europea y sus miembros, Estados Unidos, China, India, Brasil) + iniciativas locales que crean incentivos especiales para usar tecnologías de FRE.
- ⊕ El progreso acelerado que han tenido las tecnologías de energías renovables.
- ⊕ La definición de metas de consumo de ER por 73 países/estados/provincias.

Es claro que estas políticas han ejercido una influencia fundamental en el crecimiento de los mercados actuales de las energías renovables. En el año pasado, la inversión anual en energías renovables se incrementó cuatro veces, llegando a alcanzar los 120,000 millones de USD. En los cuatro años anteriores, de diciembre del 2004 a diciembre del 2008, la capacidad instalada para generar energía solar fotovoltaica se incrementó seis veces a más de 16 Gigawatts (GW), la capacidad de generación eolieléctrica aumentó 250% llegando a

121 GW, y la capacidad total de generación de potencia eléctrica de todas la nuevas energías renovables creció 75% hasta alcanzar los 280 GW instalados. Este número incluye los aumentos significativos de las pequeñas centrales hidroeléctricas, geotérmicas, y la generación eléctrica con biomasa. Durante el mismo período de cuatro años, la capacidad instalada de calentamiento solar se duplicó llegando a los 145 Gigawatts-térmicos (GWth), mientras que la producción de biodiesel se sextuplicó hasta llegar a 12,000 millones de litros por año y la producción de etanol se duplicó a 67,000 millones de litros por año [3]. En tabla 2 se presentan algunos indicadores del impresionante crecimiento de los mercados de las FRE y en la figura 1 se presenta la inversión anual mundial en ER (1995-2007) y el dato del 2008. Como se puede ver en la gráfica, la mayor parte de la inversión en los últimos años ha sido en sistemas eolieléctricos, seguidos por los fotovoltaicos. Todo indica que la tendencia seguirá en aumento.

Tabla 2. Indicadores seleccionados sobre el desarrollo de las ER en el Mundo

SELECTED INDICATORS	2006	2007	2008
Investment in new renewable capacity (annual) ¹	63	104	120 billion USD
Renewables power capacity (existing, excl. large hydro)	207	240	280 GW
Renewables power capacity (existing, incl. large hydro)	1,020	1,070	1,140 GW
Wind power capacity (existing)	74	94	121 GW
Grid-connected solar PV capacity (existing)	5.1	7.5	13 GW
Solar PV production (annual)	2.5	3.7	6.9 GW
Solar hot water capacity (existing)	105	126	145 GWth
Ethanol production (annual)	39	50	67 billion liters
Biodiesel production (annual)	6	9	12 billion liters
Countries with policy targets		66	73
States/provinces/countries with feed-in policies ²		49	63
States/provinces/countries with RPS policies		44	49
States/provinces/countries with biofuels mandates		53	55

Fuente: REN21. 2009. Renewables Global Status Report: 2009 Update (Paris: REN21 Secretariat).

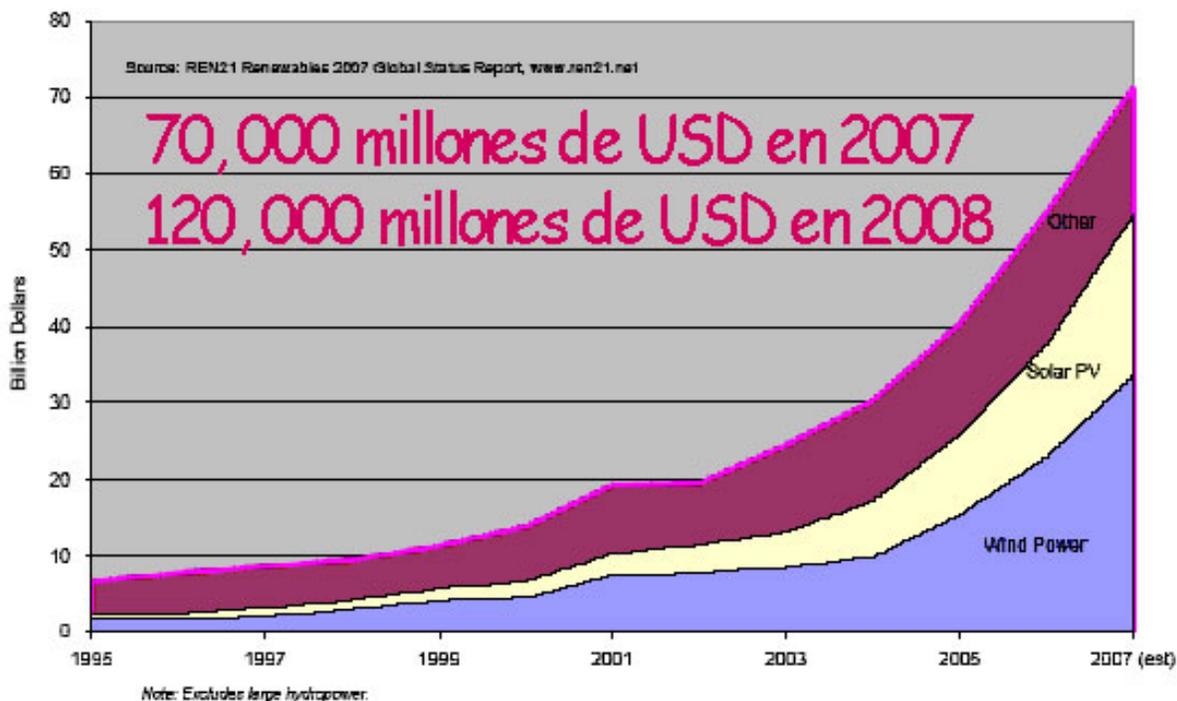


Figura 1. Inversión mundial anual en ER (1995-2007).

La tabla 3 muestra la capacidad existente de las energías renovables en el Mundo en el año 2008 y la que se incrementó en el mismo año [3]. Con relación a la generación de potencia eléctrica, la potencia total instalada de energías renovables, sin considerar a la gran hidráulica, fue de 281.8 GW, con incremento en el año de 42.86 GW, esto es, un 18% de aumento. En particular, es notable ver como, la de viento (121 GW) ocupa el segundo lugar después de la gran hidráulica (860 GW) y que el aumento en la capacidad instalada fueron similares para ambas tecnologías, pero con incremento para los aerogeneradores del 29% comparado con el 3.6% que tuvo la gran hidráulica. También es notable mostrar que la potencia fotovoltaica se incrementó en el 2008 en un 71% y la potencia solar con sistemas de concentración (CSP) aumentó en un 13.6%. Con relación a calentamiento de agua y espacios es notable ver el crecimiento de los captadores solares que tuvieron un incremento del 15.1% en solo un año. Con relación a los biocombustibles para el transporte el incremento fue de 34% fue notable.

Todos estos porcentajes muestran que los mercados mundiales de las energías renovables están creciendo aceleradamente. Sin embargo, y a pesar de este crecimiento, el uso de las FRE sigue siendo pequeño comparado con el uso de los hidrocarburos. En la próxima sección se muestra la estructura actual de la energía total y de la producción de electricidad en el mundo y en México y las contribuciones de las ER.

For comparison:
 Large hydropower 860
 Total electric power capacity 4,700

Tabla 3. Capacidad incrementada y existente de energías renovables en el Mundo en el año 2008, [3].

Table R1. Renewable Energy Added and Existing Capacities, 2008 (estimated)		
	Added during 2008	Existing at end of 2008
Power generation (GW)		
Large hydropower	25–30	860
Wind power	27	121
Small hydropower	6–8	85
Biomass power	2	52
Solar PV, grid-connected	5.4	13
Geothermal power	0.4	10
Concentrating solar thermal power (CSP)	0.06	0.5
Ocean (tidal) power	–0	0.3
Hot water/heating (GWth)		
Biomass heating	n/a	~250
Solar collectors for hot water/space heating	19	145
Geothermal heating	n/a	~50
Transport fuels (billion liters/year)		
Ethanol production	17	67
Biodiesel production	3	12

Source: See Endnotes 1–12 and sources for Tables R2–R6.

Source: REN21, *Renewables Global Status Report: 2009 Update***For comparison:**

Large hydropower	860
Total electric power capacity	4,700

Estructura Energética en el mundo y en México

La figura 2 muestra los consumos de energía mundiales en el año 2008, [1]. El total de consumo de energía que corresponde a los hidrocarburos es del 80.8%, indicando que son estos el motor del mundo industrializado. A las energías renovables les corresponde un 12.7%, sin embargo las renovables tradicionales, y aquí se habla principalmente de leña y de la gran hidráulica sumadas dan el 12.1%, dejando solo para las nuevas energías renovables el 0.6%. Estas últimas incluyen a la geotermia, al viento, a la solar y la oceánica.

En la figura 3 se presenta la producción mundial de electricidad a partir de las diferentes fuentes energéticas para el año 2008. La capacidad instalada mundial es de 4,700 GW de los cuales dos terceras partes corresponden a sistemas que operan con hidrocarburos. En el año 2008 se generaron 19,771 TWh de los cuales el 66.6% correspondió a hidrocarburos, 14.7% a nuclear, 15% a gran hidráulica y solo el 3.7 correspondió a las nuevas energías renovables (solar/viento/geotermia/micro hidráulica/oceánica/biomasa).

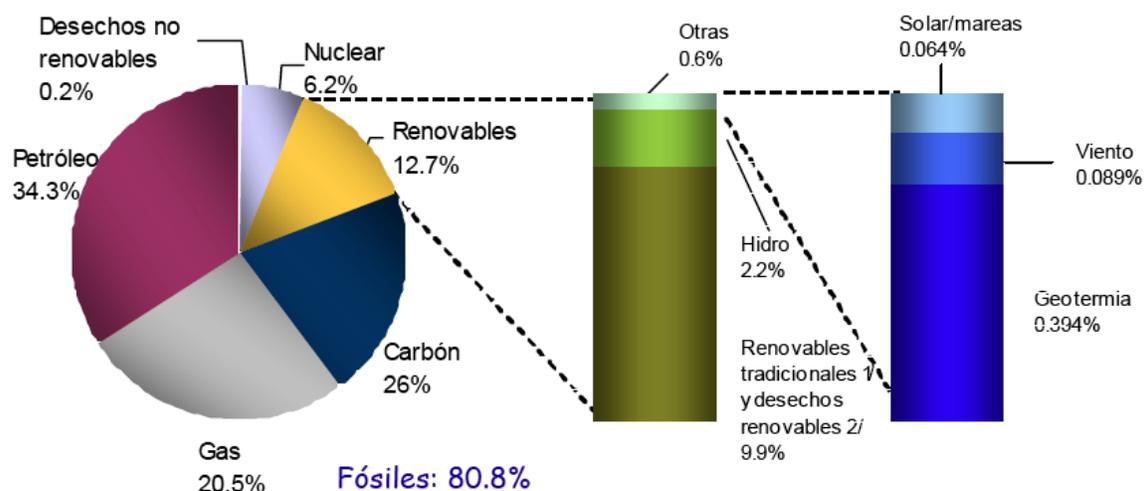


Figura 2. Consumo mundial de energía en 2008.

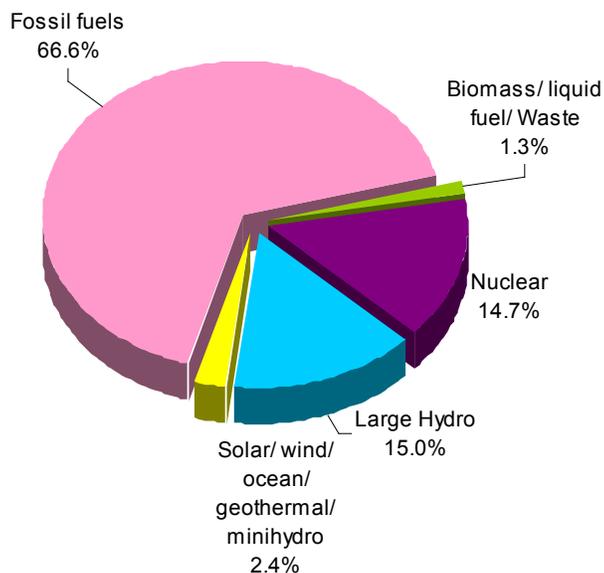


Figura 3. Producción Mundial de Potencia Eléctrica en 2008.

La figura 4 muestra la estructura de la producción de energía primaria en México para el año 2007, que correspondió a un total de 10,523 petajoules (2,923 TWh). La dependencia del país de los hidrocarburos es de 92%, mayor al promedio mundial. La contribución de las nuevas energías renovables excluyendo a la gran hidráulica y a la biomasa convencional (leña) es pequeña, un poco arriba del 1%, debiéndose fundamentalmente a la geotermia, [5].

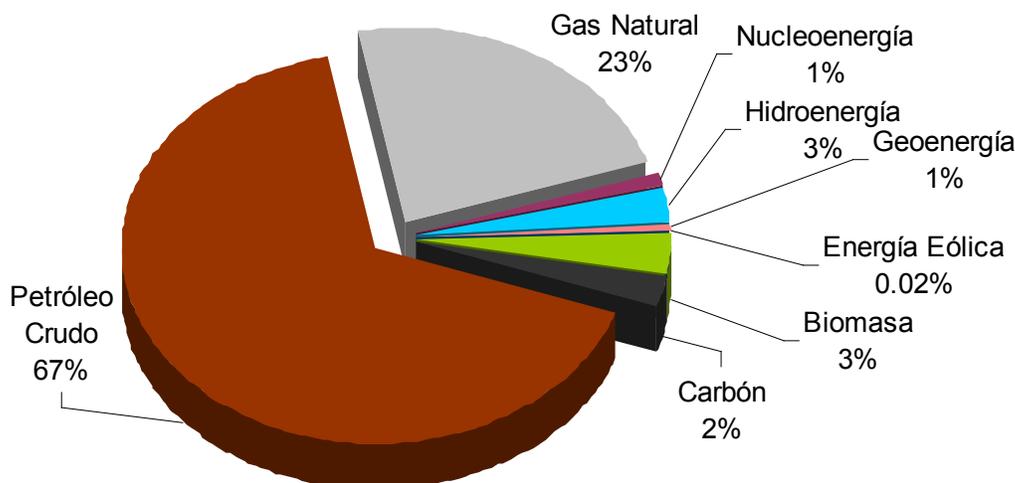


Figura 4. Estructura de la producción de energía primaria en México (2007), (10,523 petajoules), [5].

La figura 5 muestra información registrada en el año 2008 sobre la capacidad instalada para la generación de energía eléctrica por tecnología de generación en México. Esta capacidad fue de 49,930 MWe, [4]. En el gráfico se muestra que el 73% corresponde a generación con hidrocarburos, el 22% a gran hidráulica, 3% a nuclear y el resto 2.2% a la generación de nuevas energías renovables (geotermia y eólica), [5]. Las diferencias se deben a errores e redondeo. Claramente, como en la producción primaria de energía, la contribución para la generación de electricidad con nuevas fuentes renovables de energía es limitada comparada con otros países similares a México.

¿En que se consume parte de la energía que se produce en México sumada a la que se importa? La tabla 4 presenta el consumo final total de energía en el país en los años 2007 y 2008 y su comparativo. Del consumo energético total, en 2008, aproximadamente el 18% se fue al sector residencial, comercial y público; el 48% al sector transporte; el 26% al industrial y solo el 3% al sector agropecuario. Es claro que el sector que más energéticos consume, fundamentalmente combustibles es el del transporte. En el 2008 hubo un incremento del consumo de energía total de 5.7 comparado con el año anterior, siendo el consumo en el sector transporte el que más aumento.

Las tecnologías actuales que aprovechan a las FRE pueden ser utilizadas masivamente en estos sectores. Sin embargo, su penetración en la mayoría de los países y en México en particular, no se ha dado debido a varios factores, entre ellos a dos: al precio/costo relativamente elevado de las tecnologías y a la ausencia, hasta hace poco, de políticas de estado que las promueva y las incentive.

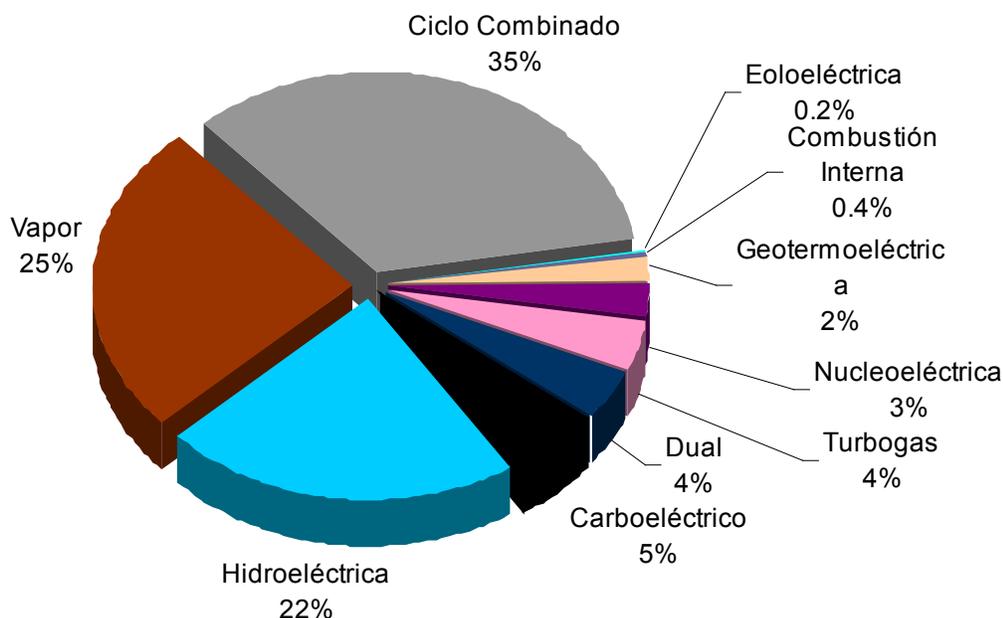


Figura 5. Capacidad instalada de generación eléctrica por tecnología en el 2008: 49, 930 MWe, CFE.

Tabla 4. Consumo final total de energía (petajoules) 2008, [5].

	2007	2008	Variación porcentual (%) 2008/2007	Estructura porcentual	
				2007 %	2008 %
Consumo final total	4,830.59	5,101.23	5.6	100.0	100.0
Consumo no energético total	275.08	286.31	4.1	5.7	5.6
Petroquímica de Pemex	167.76	175.03	4.3	3.5	3.4
Otras ramas	107.32	111.28	3.7	2.2	2.2
Consumo energético total	4,555.51	4,814.92	5.7	94.3	94.4
Residencial, comercial y público	893.03	900.84	0.9	18.5	17.7
Transporte	2,158.90	2,427.54	12.4	44.7	47.6
Agropecuaria	134.05	144.75	8.0	2.8	2.8
Industrial	1,369.53	1,341.79	-2.0	28.4	26.3

Fuente: Sistema de Información Energética, Sener.
La suma de los parciales puede no coincidir con los totales debido al redondeo de las cifras.

Durante décadas, la introducción de estas tecnologías en el país se dejó totalmente a los precios de competencia del libre mercado mundial. Pero, actualmente ¿son competitivas las tecnologías de ER?

Inversiones en I+D+i en ER y precios de las ER

Para contestar la pregunta del párrafo anterior, hay que empezar diciendo que en los últimos 25 años ha habido un esfuerzo considerable de investigación científica y tecnológica para reducir los costos de estas tecnologías. La figura 6 muestra la historia de la inversión pública de varios países en investigación y desarrollo de tecnologías que aprovechan las FRE para el período 1974-2001. Es interesante ver que debido a la crisis energética de 1973, las inversiones en I+D se incrementaron a valores históricos en el rubro de las energías renovables, alcanzando los 16,000 millones de USD (constantes del 2003). Los Estados Unidos fue el país que más invirtió en los primeros años, seguido por los países de la Unión Europea y Japón. En años posteriores, y debido al decremento de la inversión de Estados Unidos y de la Unión Europea, los japoneses ocupan el primer lugar, incluso ellos han seguido incrementando sus montos de inversión. Después de que se estabilizó el suministro de petróleo, la inversión bajo un poco arriba de los 8,000 millones de dólares. Actualmente, el gasto gubernamental global en I+D+i va hacia arriba.

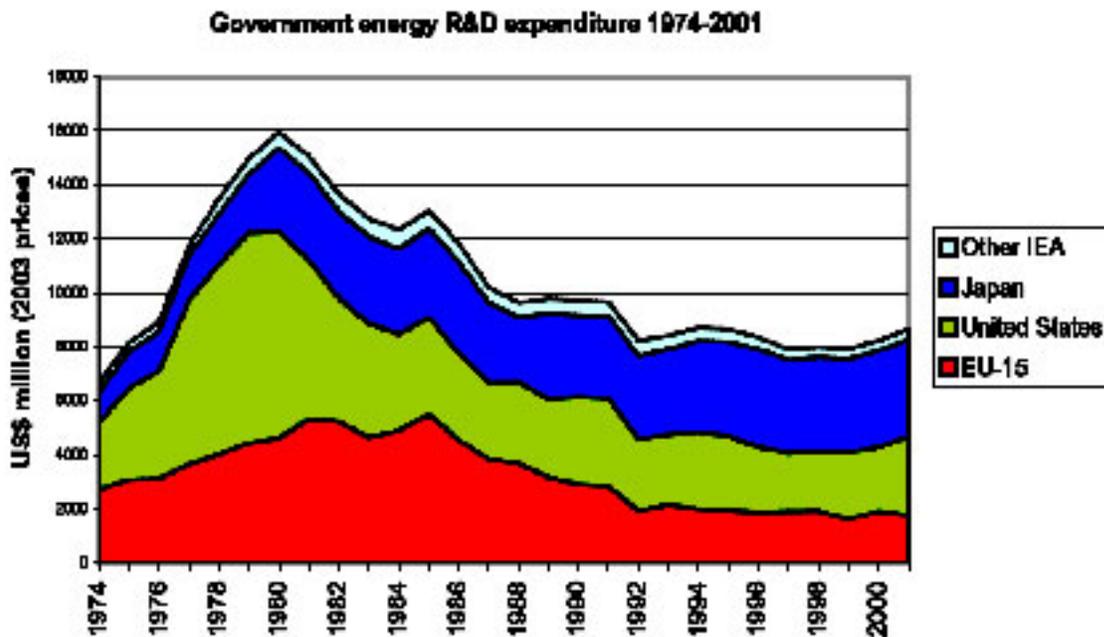


Figura 6. Inversión pública en investigación y desarrollo de varios países o grupos de países.

En la figura 7 se muestra la inversión pública en investigación y desarrollo por tecnologías renovables para el período 1974-2002. Es interesante ver el comportamiento del gasto por tecnología. Así por ejemplo, las tecnologías fotovoltaicas al igual que las de biomasa, han tenido un gasto más o menos constante desde los años 80's en adelante. En cambio, las tecnologías de calentamiento y enfriamiento solar tuvieron un apoyo importante entre 1977 y 1982, después se redujo significativamente. Algo similar paso con las tecnologías termo-solares de potencia y la geotermia.

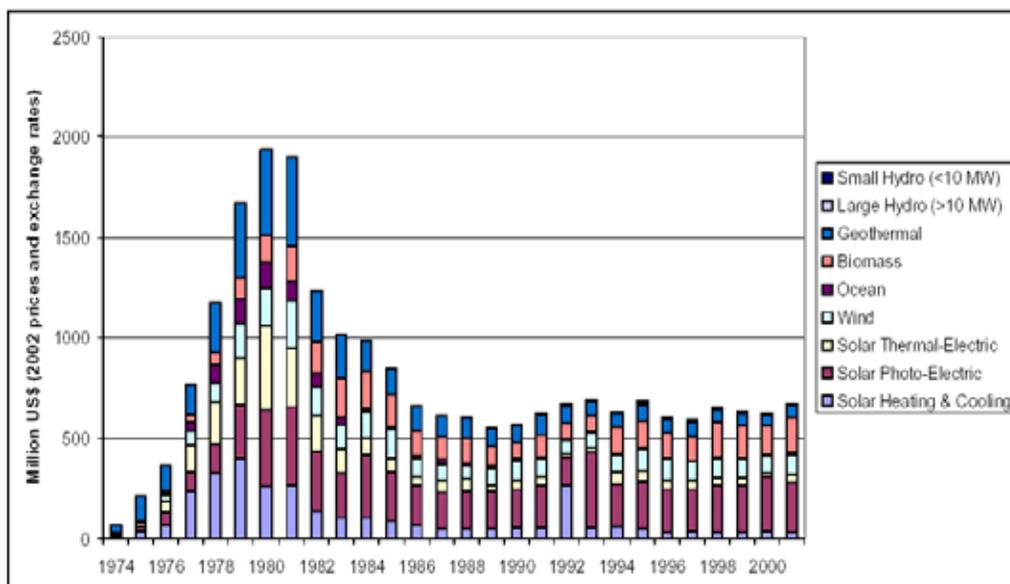


Figura 7. Inversión pública en investigación y desarrollo por rublos de tecnologías renovables para el período 1974-2002.

Los costos de producción de las diferentes tecnologías de ER son reducidos por factores como el escalamiento de la tecnología, la producción en serie, los mercados, y la investigación, el desarrollo y la innovación. La figura 8 muestra como en un lapso de 20 años la I+D+i puede reducir hasta un 60% el costo de las tecnologías; en tanto que el escalamiento, la producción en serie y los mercados pueden reducir los costos hasta un 40%.

Lo anterior ha tenido un impacto notable en la reducción de los costos de las diferentes tecnologías de energías renovables. Como ejemplo, se presenta la figura 9 que muestra la evolución de los costos nivelados de producción de electricidad, de las tecnologías de viento, solar fotovoltaica, solar fototérmica de potencia, geotermia y biomasa para etanol, desde el año 1980 hasta el año 2005 y después su proyección al año 2025. En todos los casos se ve una disminución considerable de los costos nivelados, tendiendo a un límite que parece constante en 2025.

Ahora contestemos a la pregunta de si ¿son competitivas o no las tecnologías de ER? Se puede decir que gracias al esfuerzo de estos últimos 25 años en I+D+i y a la implementación de políticas públicas visionarias adecuadas para la promoción y

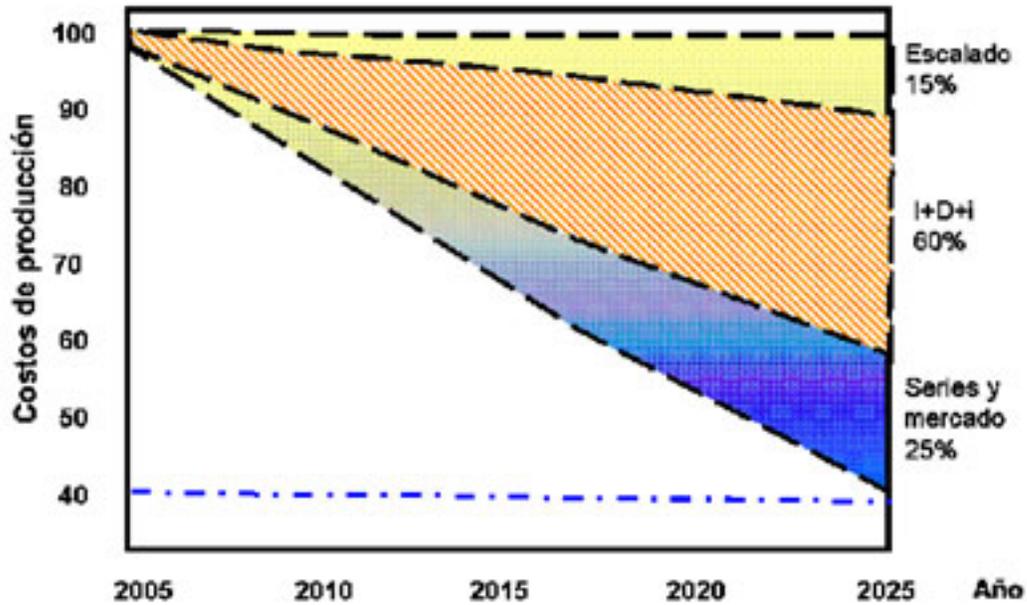


Figura 8. Impacto de la innovación en la reducción de costos.

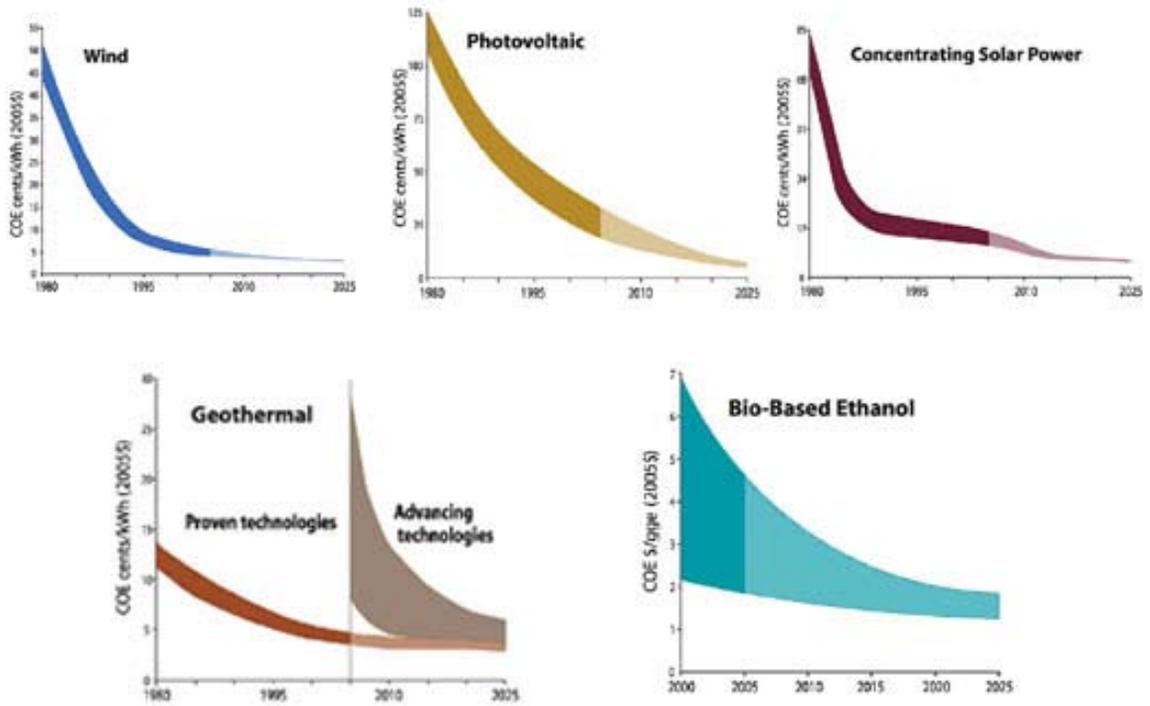


Figura 9. Evolución de los costos de las energías renovables: Costos nivelados de energía en USD constantes del 2005. Las gráficas son reflejo de las tendencias históricas de los costos, no de los datos históricos anuales precisos, [6].

utilización de las ER en algunos países, se ha logrado reducir los costos de estas tecnologías al punto de hacerlas competitivas en los mercados energéticos internacionales. Se espera que en el futuro cercano se incremente sustancialmente dicha competitividad. La Tabla 5 presenta los costos estimados para nuevas plantas de generación de electricidad. Aparecen las tecnologías fósiles, nucleares y renovables. La tecnología con costo de capital mas barata es la de combustión en turbinas de gas, seguidas por las de ciclo combinado con gas y al último esta la solar fotovoltaica. Nótese que la eólica esta a la mitad de la nuclear y por debajo de la de carbón pulverizado, aunque su factor de planta es 3 veces menor.

Tabla 5. Costos estimados para nuevas plantas de generación de electricidad (en USD del 2003).

	Capital (\$/kW)	Operación y Manten. (\$/kW)	Costes Variables (c\$ / kWh)	Combusti- ble (c\$ / kWh)	Factor de Capacidad (%)
Nuclear	1821	60,84	0,045	0,15	90
Carbón pulverizado	1122	25,51	0,319	0,43	85
Gas. Ciclo Combinado	586	10,63	0,00212	1,16	85
Combustión en Turbina de gas	457	8,50	0,00319	1,16	30
Solar fotovoltaica	3526	10,47	0	0	24,6
Solar termoeléctrica	2293	50,88	0	0	24,6
Eólica	976	27,15	0	0	28,9
Fuente: DOE e International Association for Energy Economics. NewsLetter 2003.					

La tabla 6 presenta los costos nivelados de producción de electricidad por kWh generado con USD del 2003. Se observa que la tecnología más barata, a los costos actuales de los hidrocarburos es la de ciclo combinado. Sin embargo, la eólica, la minihidroeléctrica y la biomasa de gasificación son competitivas con las de hidrocarburos y nuclear. La termosolar de potencia es competitiva en mercados minoristas y la solar fotovoltaica empieza a serlo.

Para que en los mercados eléctricos, cuyos costos hemos presentado, se extienda el uso de las FRE, se requiere que estas den garantía de despacho y se adapten a las curvas de demanda. Eso les dará un valor agregado en el mix energético que vendrá. Las energías renovables deben usarse eficientemente. Asimismo, la capacidad de hibridación, de almacenamiento de energía y de producción de combustibles renovables deben ser las herramientas que le den valor agregado a las nuevas tecnologías. Cada país deberá adaptarse a sus propios recursos naturales.

Tabla 6. Costo nivelado de producción de electricidad por kWh generado.

Fuente de Energía	Costo c\$/kWh
Nuclear	4-6
Carbón	3-5
Ciclo combinado de gas	2-4
Solar Fotovoltaica	20-80
Solar Termoeléctrica	12-18
Eólica	2-5
Biomasa gasificación	5-15
Hidroeléctrica (mini)	4-10

En un ejercicio responsable de planificación energética del país donde se decidirán que tecnologías deberán impulsarse o implementarse, se deben tomar en consideración puntos como: i) la seguridad en el suministro energético, ii) las reservas energéticas con las que se cuenta, iii) los precios (\$/Mtoe, \$/Kw) y los costos (c\$/kWh) de las tecnologías y iv) la minimización del impacto ambiental del uso de los sistemas energéticos.

La figura 10 presenta un escenario para la transformación sustentable del sistema mundial de energía que satisface las condiciones de planificación del párrafo anterior, [8]. Este escenario particular supone un crecimiento muy pronunciado de la economía mundial. En él se hizo la suposición de un incremento significativo en la eficiencia energética y sin embargo el pronóstico para el 2050, resulta en una demanda de energía aproximadamente del triple de la actual. Así mismo, como se puede ver en la figura, en este escenario, al final del siglo, el suministro de energía estará sustentado principalmente en fuentes renovables de energía. En la construcción de dicho escenario también se supuso el secuestro geológico de CO₂ y se encontró que las concentraciones de CO₂ en la atmósfera no serían mayores a 450 ppm. Esto conduce a que el calentamiento global probablemente no exceda los 2 °C.

Con todo lo dicho hasta ahora, la pregunta que viene es ¿Cuál es el estado actual que guardan las tecnologías de energías renovables que pueden hacer posible el futuro presentado en la figura 10?. Debido a que son varias las tecnologías de energías renovables, el espacio del presente escrito no alcanzaría a presentarlas todas. Por ello, solo se presentará el caso más emblemático de las energías renovables: la energía solar.

Un ejercicio de planificación energética responsable de un país debe incluir aspectos como:

- ⊕ Seguridad en el suministro energético
- ⊕ Reservas energéticas con las que se cuentan
- ⊕ Precios (\$/Mtoe, \$/Kw) y costos (c\$/kWh) de las tecnologías y
- ⊕ Minimización del impacto ambiental del uso de los sistemas energéticos.

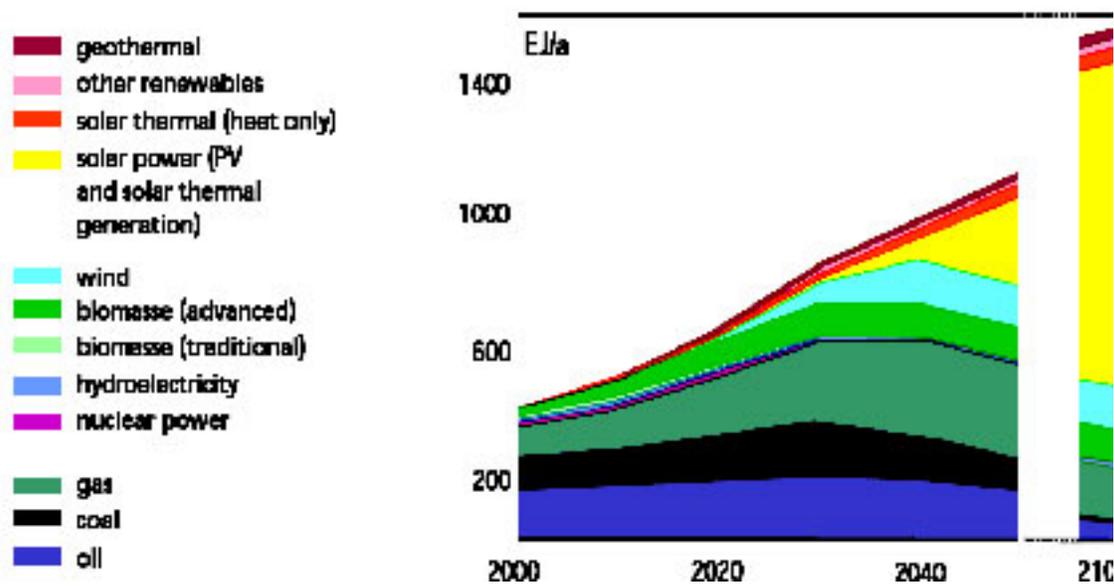


Figura 10. Escenario para la transformación sustentable del sistema de energía mundial [8].

Tecnologías del aprovechamiento de la energía solar

Los recursos energéticos renovables, como ya se comentó en la sección 1 son afortunadamente muy abundantes en el planeta. Solo como un ejemplo de la abundancia de las fuentes de ER, baste decir que la energía solar recibida cada 10 días sobre la Tierra equivale a todas las reservas conocidas de petróleo, carbón y gas. La figura 11, muestra la distribución de energía solar incidente en la Tierra dada en términos de la insolación diaria promedio anual medida en kWh por m² por año. Los paralelos 40°N y 35°S definen la llamada “Franja Solar” que tiene la peculiaridad de albergar al 70% de la población mundial y recibir la mayor cantidad de energía solar del planeta. Como se observa en la figura, México queda dentro de esta franja y su potencial de aprovechamiento de energía solar es uno de los más altos del mundo. Alrededor de tres cuartas partes del territorio nacional son zonas con una insolación media del orden de los 5 kWh/m² al día, el doble del promedio en EUA. Particularmente la zona del noroeste del país (los estados de Chihuahua, Sonora y Baja California) posee el recurso solar más abundante con insolaciones que llegan a los 6 kWh/m² al día.

¿Cómo se aprovecha la energía solar? Empecemos diciendo que la energía solar es energía electromagnética emitida por nuestra estrella más cercana: el Sol, que al interactuar con la materia dicha energía es transformada en otras formas de energía. Existen varios mecanismos naturales que transforman a la energía solar en alguna otra forma de energía útil para el ser humano. Entre esos mecanismos se encuentran los físicos, los químicos y los biológicos. Por razones de espacio, a continuación se presentarán solo algunas de las tecnologías que aprovechan estos mecanismos para satisfacer necesidades energéticas humanas y que hoy en día son comerciales.

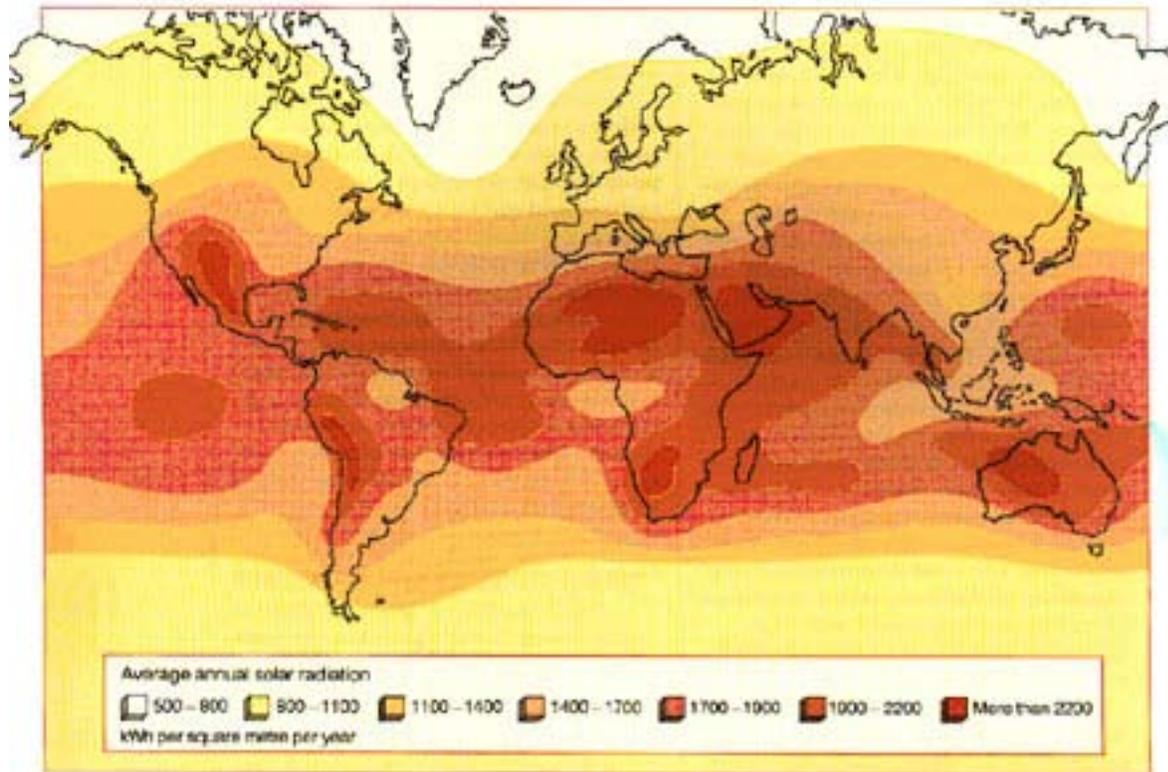


Figura 11. Distribución de la energías solar en el mundo, kWh / m² / año [].

Tecnologías fotovoltaicas

De las tecnologías solares, la fotovoltaica es en la actualidad la que tiene el más rápido crecimiento. Esta tecnología esta basada en las celdas solares. Como se sabe, la forma más común de las celdas solares se basa en el efecto fotovoltaico, en el cual la luz que incide sobre un dispositivo semiconductor de dos capas produce una diferencia del foto-voltaje o del potencial entre las capas. Este voltaje es capaz de conducir una corriente a través de un circuito externo de modo de producir trabajo útil.

Como se menciona en la sección 2, la industria de los paneles fotovoltaicos esta creciendo muy rápidamente; la potencia fotovoltaica se incrementó el año pasado en un 71%. La figura 12 muestra el desarrollo de la potencia global acumulada de sistemas PV instalados por regiones del mundo. Se observa claramente el crecimiento exponencial del acumulado. Además, en los últimos años, los europeos son los que han instalado más sistemas PV en su región. Esto es debido fundamentalmente a las políticas energéticas de la Unión Europea. Por otro lado, la figura 13 muestra la fabricación mundial de paneles fotovoltaicos por países, en el 2005. Ese año los japoneses fueron los que dominaron el mercado con el 46% seguido por los europeos con un 28%.

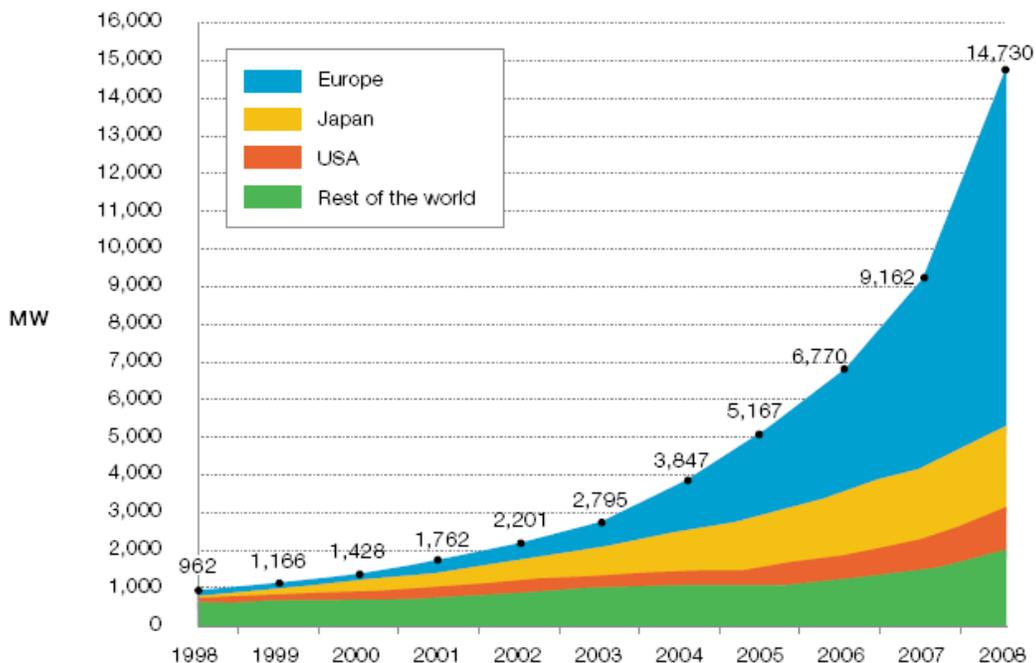


Figura 12. Desarrollo de la potencia global acumulada de sistemas PV por regiones del mundo [9].

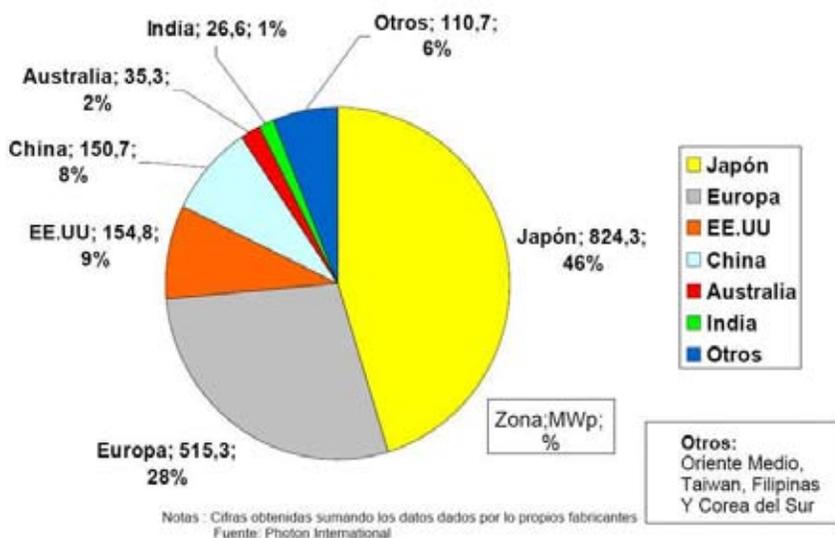


Figura 13. Fabricación mundial de paneles fotovoltaicos, en el 2005. Total al año: 1,815.7 MWp (ASIF)

Los mercados futuros de las celdas solares dependerán estrechamente del desarrollo de la tecnología, en donde los esfuerzos de investigación se centran en una combinación de eficiencia y costo de producción. La figura 13 muestra la evolución del precio del modulo fotovoltaico como función de la producción acumulada desde 1976 hasta el 2003, y construye escenarios futuros hasta el 2023 para la tecnología convencional de las celdas de silicio, para la tecnología emergente

de películas delgadas y para nuevas tecnologías que aún no conocemos.

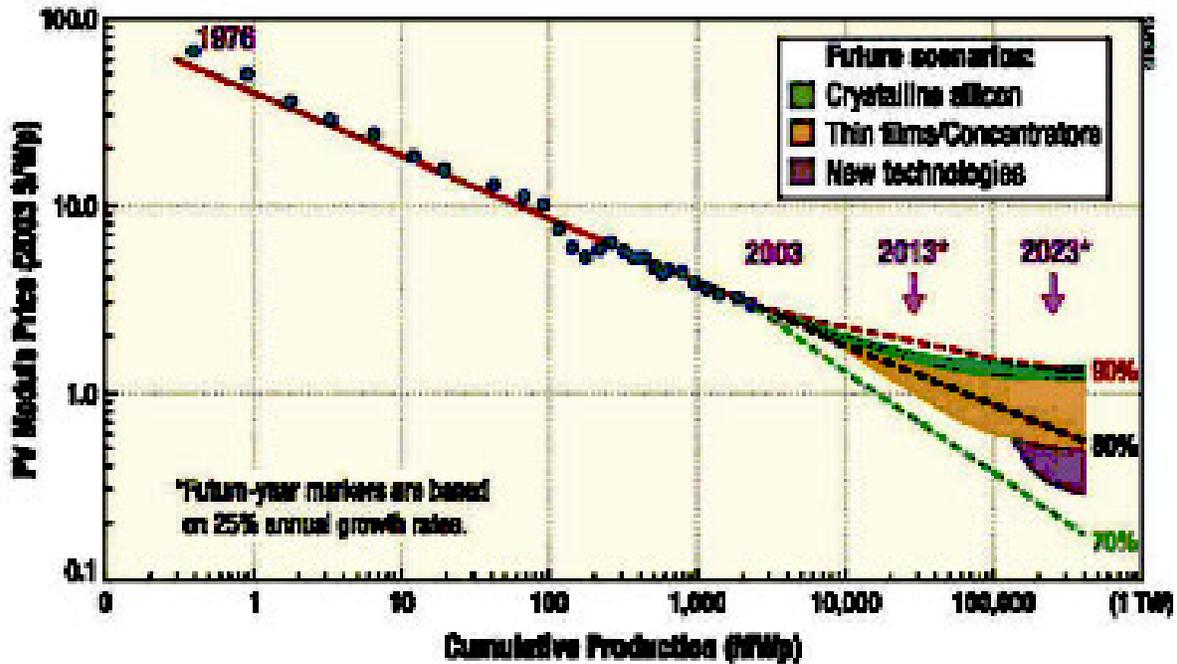


Figura 13. Precio del módulo fotovoltaico como función de la producción acumulada, [10].

Tecnologías de calentadores solares agua

Otra tecnología solar que está muy desarrollada y cuenta con una industria ampliamente establecida a nivel mundial y que también se encuentra en rápido crecimiento es la de los captadores solares para el calentamiento de agua para uso doméstico. Existen varios diseños de captadores solares: los planos, los de tubos evacuados, los de concentración solar. En todos ellos la energía solar es captada en una superficie absorbente que transfiere el calor a un fluido, típicamente agua.

La figura 14 muestra el mercado mundial de captadores solares planos cubiertos de vidrio con su producción anual medida por MWth para el período de 1982 a 2005 para diferentes países o grupos de países. En el año 2005 se alcanzaron en todo el mundo aproximadamente los 13 GWth. Se observa que los europeos y particularmente los chinos han venido incrementando su producción año con año, aunque el caso chino es realmente sorprendente: los mercados internacionales están saturados con sus productos.

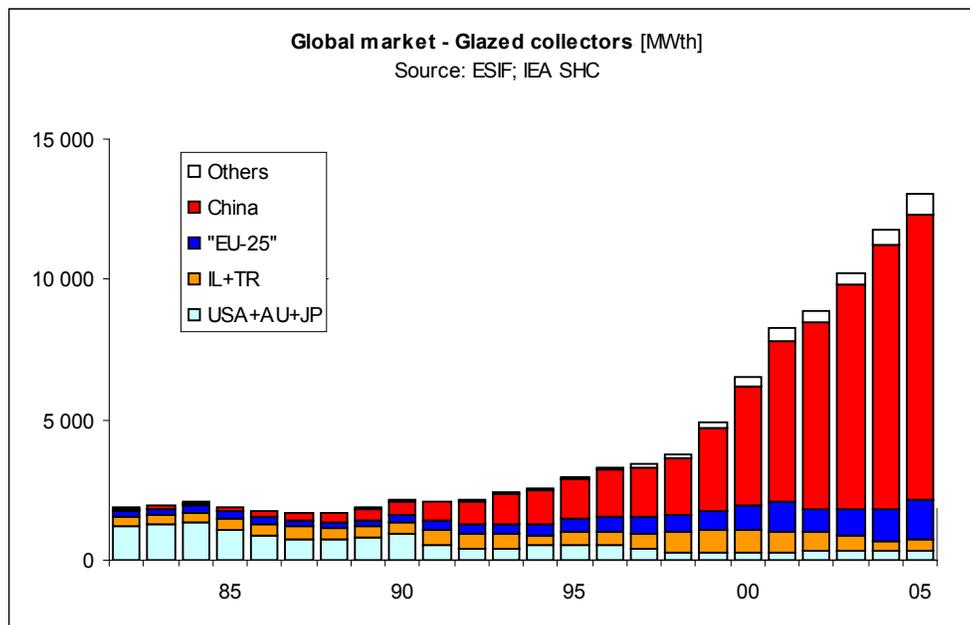


Figura 14. Mercado mundial de captadores solares planos cubiertos de vidrio.

Para darse cuenta de la importancia del mercado de los captadores solares, la figura 15 presenta la capacidad acumulada y la energía generada anual para varias energías renovables. La contribución de esta tecnología a las necesidades de energía es por mucho mayor que la electricidad solar (fotovoltaica y fototérmica), aunque sólo ligeramente mayor que la geotérmica y mucho menor que la de viento, a pesar de su gran capacidad instalada.

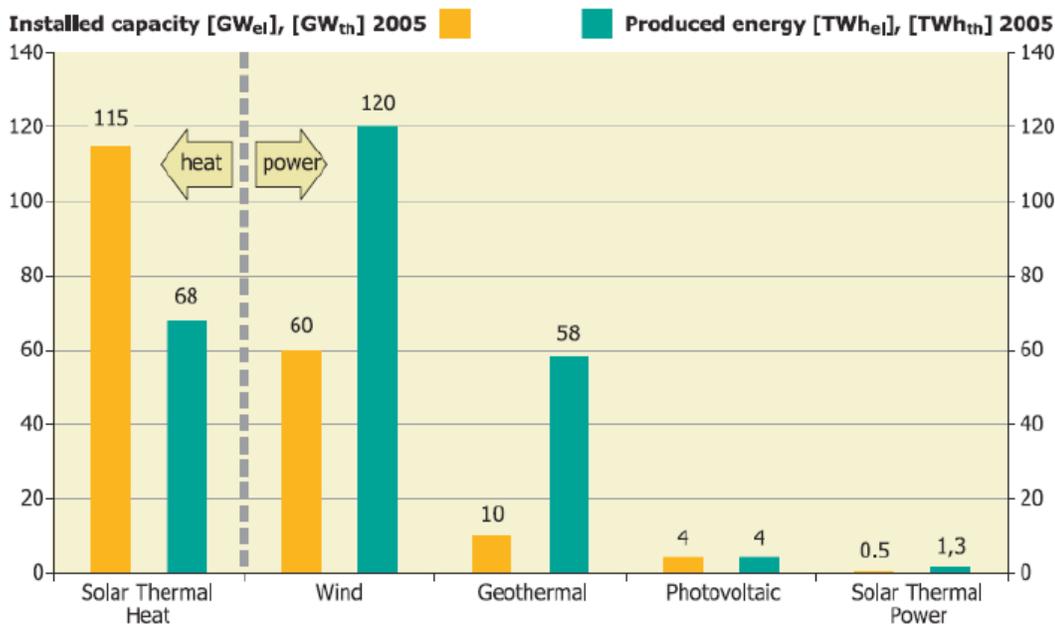


Figura 15. Capacidad acumulada y energía generada anual [11].

Potencia eléctrica termosolar

Finalmente, presentaremos las tecnologías termosolares para la generación de electricidad. De todas las tecnologías solares, estas tienen un potencial de desarrollo muy elevado, de hecho en los últimos años han tenido un rápido crecimiento. Estas tecnologías están basadas en sistemas ópticos de concentración solar.

Las plantas de potencia de concentración solar (PPCS) producen potencia eléctrica transformando la energía solar en energía térmica a alta temperatura. Esta energía térmica es transferida al bloque de potencia para producir electricidad. Así, las PPCS consisten de dos partes: una donde se colecta la energía solar (los concentradores) y se convierte en calor (el receptor), y otra que convierte el calor en electricidad (bloque de potencia).

Las plantas de potencia de concentración solar pueden ser dimensionadas para generar electricidad para poblados pequeños (10 kWe) o para aplicaciones conectadas a la red (hasta 100 MWe o más). Algunos sistemas usan almacenamiento térmico para períodos de nublados o para usarse en la noche. Otras plantas pueden combinarse con sistemas que operan con gas natural y las plantas híbridas resultantes ofrecen potencia despachable de alto valor. Estos atributos, junto con el record mundial de eficiencia de conversión solar-eléctrica (30% de eficiencia), hacen que estas tecnologías sean una opción muy atractiva en zonas del planeta dentro del cinturón solar con una alta insolación, como las que existen en el noroeste del país.

Existen cuatro tecnologías que están siendo promovidas internacionalmente. Cada una de ellas puede variar en diseños o en configuración. La cantidad de potencia generada por una PPCS depende de la cantidad de radiación solar directa que incide sobre ella. Estas tecnologías usan fundamentalmente radiación solar directa. La figura 16 muestra las configuraciones de cilindro-parabólicos y de Fresnel-lineal, ambos son configuraciones de foco lineal. La figura 17 muestra las configuraciones de disco-Stirling y de Receptor central, estas son configuraciones ópticas de foco puntual. La figura 18 muestra fotografías de estos sistemas

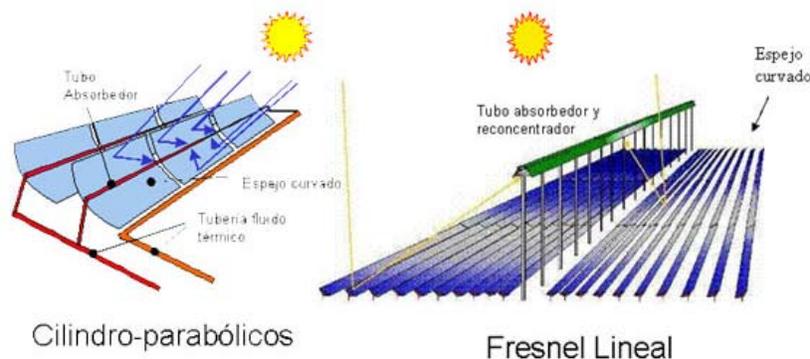


Figura 16. Arquitecturas para los sistemas de concentración solar en PPCS: Cilindro-parabólico y Fresnel-lineal.

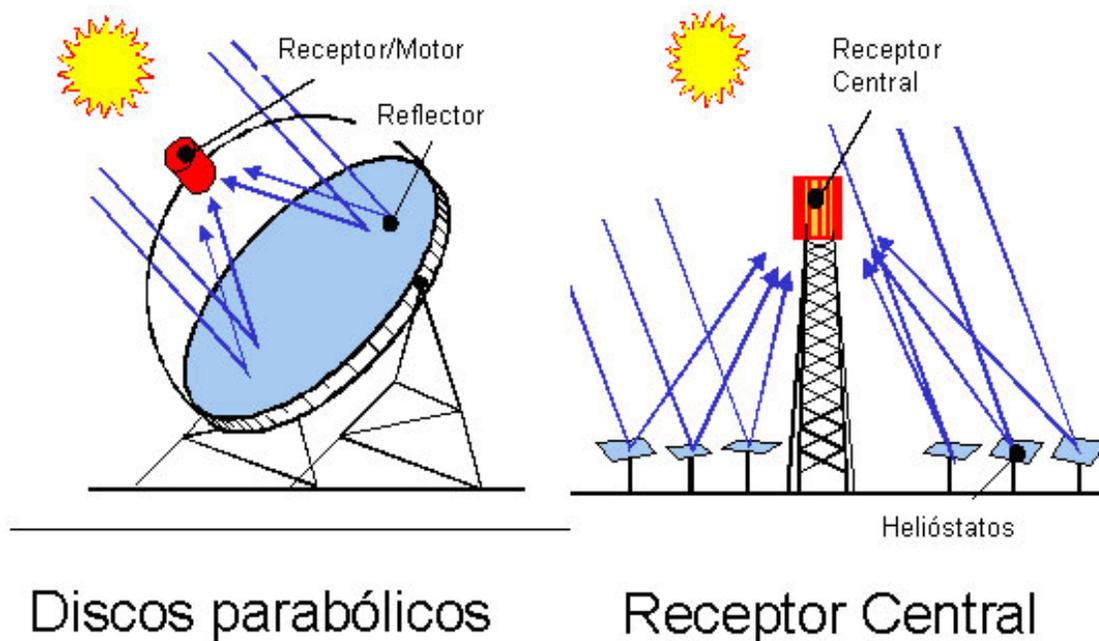


Figura 17. Arquitecturas para los sistemas de concentración solar en PPCS: Disco-Stirling y Receptor Central.

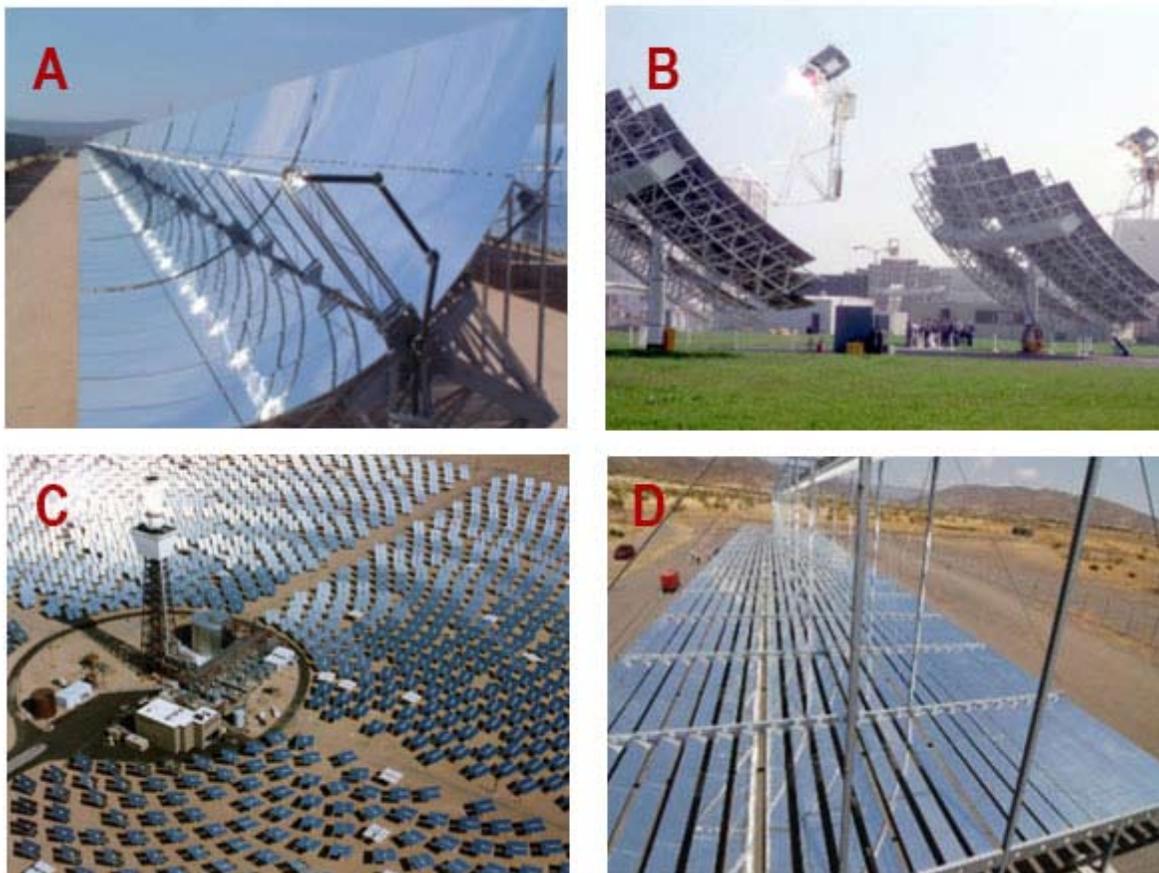


Figura 18. Plantas de potencia de concentración solar, cuatro arquitecturas: a) Cilindro-parabólico, b) Plato-Stirling, c) Receptor Central.

En los últimos años, y después de un largo periodo, de aproximadamente 15 años de no construir nuevas PPCS, se están construyendo a un ritmo acelerado, diferentes plantas en todo el mundo. El incremento es sorprendente y se puede afirmar que hay más de 6,400 MWe en construcción. Las tablas 7 y 8 listan algunas de estas plantas; las diseñadas como plantas híbrida-solar-fósil y las diseñadas solo solar.

Tabla 7. Algunos Proyectos de PPCS híbridas solar-fósil en desarrollo.

LOCATION	Cycle	Solar Technology	Solar Cap. MW	Aperture [m ²]
Algeria	Combined Cycle	Trough	64	400'000
Egypt	Combined Cycle	Trough	35	200'000
India	Combined Cycle	Trough	35	200'000
Mexico	Combined Cycle	Investor's Choice	>25	200'000
Morocco	Combined Cycle	Investor's Choice	30-60	200'000
Iran	Combined Cycle	Trough	67	600'000
Brazil	Combined Cycle	Investor's Choice	?	?
Australia	Regenerative Rankine	Linear Fresnel	36	132'500

Tabla 8. Algunos proyectos de PPCS solo solar

LOCATION	Cycle	Solar Technology	Solar Cap. MW	Aperture [m ²]
Spain (>20)	Steam Cycle	Trough (Andasol-type)	50	548'360
Spain	Steam Cycle	Tower (Solar Tres)	17	286'200
Spain	Saturated steam	Tower (PS10)	10	88'280
South Africa	Steam Cycle	Solar Tower	100	1'100'000
Israel	Steam Cycle	Trough	50	500'000
USA	Steam Cycle	Trough (Solargenix)	64	?
Portugal	Saturated steam	CLFR	6.6	?

Como ejemplo de estas nuevas plantas se presenta a la PPCS PS10 ubicada en San Lucar La Mayor en Sevilla, España, figura 19. Esta es una planta de 11 MWe con arquitectura de receptor central y es la primera planta comercial en su tipo que entró en operación en el 2008. En esta planta se utiliza el vapor sobresaturado producido en el receptor central como fluido de trabajo. El factor de capacidad de la planta es limitado. Ahora esta en construcción la PS20 con una potencia de 20 MWe. La figura 20 muestra una fotografía de la planta solar de torre central PS10 en operación (frente) y la planta PS20 en construcción (al fondo). Foto: Abengoa Solar.

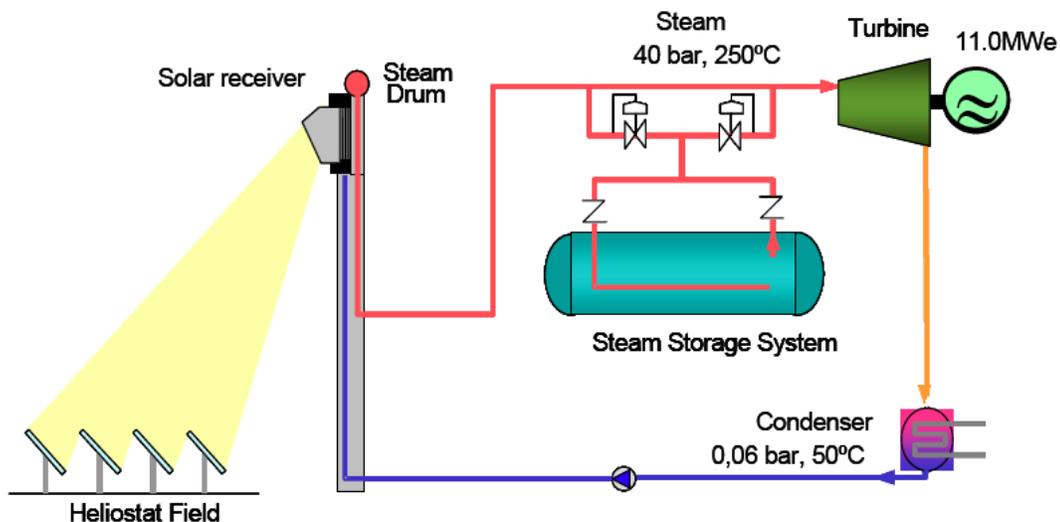


Figura 19. Diagrama de la planta de potencia de concentración solar de San Lucar La mayor en Sevilla, España.



Figura 20. Planta solar de torre central PS10 en operación (frente) y planta PS20 en construcción (al fondo). Foto: Abengoa Solar.

Conclusiones

Podemos decir que México ha estado haciendo algunos esfuerzos para desarrollar y promover a las ER. Sin lugar a dudas, la tecnología de FRE que más se ha impulsado es la tecnología geotérmica. Se tienen instalados en la actualidad 953 MWe con un desarrollo de 30 años. Esto nos ubica en el cuarto lugar mundial del uso de este recurso renovable. Se tiene un programa de desarrollo de plantas eólicas que actualmente suman 83 MWe en construcción. Se tiene en

proyecto construir un sistema solar de 25 MWe dentro de un complejo termoeléctrico de 950 MWe Ciclo Combinado en el estado de Sonora. Sobre bioenergía se ha aprobado una ley por el congreso y se tienen una iniciativa de producción masiva de etanol para alcanzar 7 mil 840 barriles al final del 2012. Más recientemente y debido a la reforma energética habrá fondos para investigación y desarrollo. Dada la magnitud del problema de la energía en el mundo y en el país, todas esas acciones, las considero limitadas, más aun cuando tenemos una abundancia del recurso renovable, particularmente el solar.

Podemos concluir que:

1. México requiere de un cambio de paradigma energético. Los hidrocarburos en México se acabarán en las próximas décadas. La infraestructura energética actual del país nos hace altamente dependientes del extranjero por tecnología y por importación de combustibles. El uso de hidrocarburos genera gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático.
2. Las energías renovables (ER) pueden ser la solución al problema energético de México y de su desarrollo sustentable. Las ER son un recurso muy abundante en el país que pueden contribuir a satisfacer la demanda energética de manera sustentable tanto de las ciudades como del campo. Las tecnologías de ER son limpias y su uso masivo garantizarían la disminución de los GEI. Para el 2015 el país puede tener un 10% de su oferta energética primaria y 18% de su oferta eléctrica con ER y para 2025, 20% de la oferta energética y 38% de la oferta eléctrica serían las metas para las ER. El país cuenta con los recursos humanos capaces de generar investigación y desarrollo para apropiarse las tecnologías de ER y promover una industria nacional. Ello implicaría la creación de algunos cientos de miles de nuevos empleos.
3. Para garantizar el desarrollo sustentable del país el estado mexicano debe comprometerse con una visión a largo plazo del aprovechamiento de las ER en México. Se deberán generar las políticas, los marcos legales, los incentivos económicos y los fondos de financiamiento para el desarrollo masivo de las ER en el país. En el caso del sector eléctrico es indispensable un régimen especial basado en tarifas garantizadas para alentar la generación distribuida con ER. Se tiene que desarrollar un plan nacional estratégico a corto, mediano y largo plazo, para el aprovechamiento integral de las ER en México. Se considera que deberemos crear una Comisión Nacional de ER (CNER), un Instituto Nacional de ER (INER) y una red nacional de centros de investigación regionales en ER.
4. Dadas las condiciones actuales del desarrollo de las tecnologías renovables y en particular de la solar en el mundo, existe todavía una gran oportunidad para que México ingrese a la competencia mundial por el desarrollo de la ER.

Referencias

1. IEA, 2008. Renewables Information 2008.
2. F. de Winter and R.B. Swenson, 2006. A wake-up call. Solar Today, March/April 2006.
3. Renewables Global Status Report: 2009 Update (Paris: REN21 Secretariat). REN21, 2009.
4. CFE, 2009. www.cfe.gob.mx
5. Balance Nacional de Energía 2008. SENER
6. <http://www.iea.org/rdd/eng>
7. NREL. Energy Analysis Office, 2005 (www.nrel.gov/analysis/docs/cost_curves_2005.ppt).
8. World in Transition – Towards Sustainable Energy Systems, Earthscan, London, ISBN 1-85383-882-9, http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003_engl.pdf.
9. 2013 Global market outlook for photovoltaics until 2013, EPIA.
10. T. Surek, “Crystal Growth and Materials Research in Photovoltaics,” J. Crystal Growth 275, 292 (2005).
11. Weiss, Werner, Irene Bergmann and Gerhard Faninger (2006), “Solar Heat Worldwide”. IEA Solar Heating and Cooling Programme.