



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

**USO TECNOLOGICO DE LA ENERGIA SOLAR**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERO QUIMICO**

P R E S E N T A :

**ROBERTO URIEL JIMENEZ ZUÑIGA**

ASESORA DE TESIS:

**I. Q. MARGARITA ALONSO ESPINOSA**

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

2005

UN: 351086



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

Uso Tecnológico de la Energía Solar

que presenta el pasante: Roberto Uriel Jiménez Zúñiga  
con número de cuenta: 9650869-3 para obtener el título de :  
Ingeniero Químico

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 15 de Marzo de 2005

PRESIDENTE	<u>IQ. Ariel Samuel Bautista Salgado</u>	
VOCAL	<u>IQ. Guadalupe Franco Rodríguez</u>	
SECRETARIO	<u>IQ. Margarita Alonso Espinosa</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>MC. Ricardo Paramont Hernández García</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>IQ. Gilberto Atilano Amaya Ventura</u>	

Este trabajo está dedicado:

Con todo cariño para mis padres, Guillermo Jiménez Tapia y Silvia Zúñiga Dorantes, por haberme dado la vida, todo su cariño, confianza y apoyo en cada momento. A ustedes debo la culminación de esta meta. Gracias por su esfuerzo, por su infinita paciencia y por ser un gran ejemplo para mis hermanos y para mí. Con admiración y respeto para ustedes, papá y mamá.

A mi abuelita, Catalina Tapia Bertiz, por todo su cariño y sus cuidados. Gracias por tus consejos y por ser un aliciente muy importante en mi vida. Siempre te llevaré en mis pensamientos y en mi corazón.

A mis hermanos, Cynthia y Alejandro, por su comprensión y apoyo en los momentos más difíciles. Gracias por soportarme y por los momentos de alegría que me han dado a lo largo de mi vida.

A San, por haberme ayudado a mirar. Gracias por ayudarme a descubrir la dicha y la desgracia de vivir en este mundo chambón y jodido. De alguna manera este trabajo fue idea tuya, gracias por leer los borradores y por todas tus sugerencias.

No consigo sacarme de la cabeza el presentimiento de que sufriremos, alguna vez, un Juicio Final. Y nos imagino a todos interpelados por fiscales que nos señalarán con la pata o con la rama, acusándonos de haber convertido el reino de este mundo en un desierto de piedra:

- ¿Qué han hecho ustedes de este planeta? ¿En qué supermercado lo compraron? ¿Quién les ha otorgado a ustedes el derecho de maltratarnos y exterminarnos?

Y veo un alto tribunal de bichos y plantas dictando sentencia de condenación eterna contra el género humano.

¿Pagaremos justos por pecadores? ¿Pasaremos todos la eternidad en el infierno? ¿Asados todos a fuego lento junto a los envenenadores de la tierra, el agua y el aire?...

EG

## ÍNDICE

OBJETIVO.....	iv
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>CAPÍTULO 1. NATURALEZA DE LA ENERGÍA.</b>	
1.1 LA UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA .....	5
1.2 FUENTES NO RENOVABLES DE ENERGÍA.....	7
1.2.1 ENERGÍA FÓSIL .....	8
1.2.2 ENERGÍA NUCLEAR.....	11
1.3 FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA.....	13
1.3.1 ENERGÍA HIDRÁULICA .....	14
1.3.2 ENERGÍA EÓLICA .....	15
1.3.3 LA BIOMASA.....	17
1.3.4 ENERGÍA SOLAR.....	18
1.3.5 ENERGÍA GEOTÉRMICA .....	19
1.3.6 ENERGÍA OCEÁNICA .....	21
<b>CAPÍTULO 2. APROVECHAMIENTO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN MÉXICO Y EL MUNDO.</b>	
2.1 LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN MÉXICO .....	23
2.1.1 ENERGÍA HIDRÁULICA .....	25
2.1.2 ENERGÍA EÓLICA .....	26
2.1.3 LA BIOMASA.....	27
2.1.4 ENERGÍA SOLAR .....	28
2.1.5 ENERGÍA GEOTÉRMICA .....	30
2.2 LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN EL MUNDO.....	32

### **CAPÍTULO 3. LA FUENTE SOLAR.**

<b>3.1 LA ENERGÍA SOLAR.....</b>	<b>37</b>
<b>3.2 LA RADIACIÓN.....</b>	<b>39</b>
<b>3.3 DISTRIBUCIÓN DE LOS RAYOS SOLARES.....</b>	<b>40</b>
<b>3.4 LA CONSTANTE SOLAR.....</b>	<b>40</b>
<b>3.5 RADIACIÓN ATMOSFÉRICA.....</b>	<b>42</b>

### **CAPÍTULO 4. CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR.**

<b>4.1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>45</b>
<b>4.2 CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR EN ENERGÍA TÉRMICA.....</b>	<b>46</b>
<b>4.3 EL EFECTO INVERNADERO.....</b>	<b>47</b>
<b>4.4 EL ORIGEN DEL COLECTOR.....</b>	<b>48</b>
<b>4.5 EQUIPOS PARA EL APROVECHAMIENTO TÉRMICO DE LA RADIACIÓN SOLAR.....</b>	<b>49</b>
<b>4.5.1 COLECTORES SOLARES PLANOS.....</b>	<b>50</b>
4.5.1.1 LA CUBIERTA O PLACA TRANSPARENTE.....	51
4.5.1.2 LA PLACA ABSORBENTE.....	54
4.5.1.3 LOS TUBOS DE CIRCULACIÓN DEL FLUIDO.....	55
4.5.1.4 EL AISLANTE TÉRMICO.....	57
4.5.1.5 LA CARCASA.....	58
4.5.1.6 TIPOS DE COLECTORES SOLARES PLANOS.....	59
4.5.1.6.1 COLECTORES SOLARES PARA CALENTAMIENTO DE LÍQUIDOS.....	60
4.5.1.6.2 COLECTORES SOLARES PARA CALENTAMIENTO DE GASES.....	62
<b>4.5.2 COLECTORES CONCENTRADORES.....</b>	<b>65</b>
4.5.2.1 TIPOS DE COLECTORES CONCENTRADORES.....	69
4.5.2.1.1 CONCENTRADORES DE CANAL PARABÓLICO.....	70
4.5.2.1.2 SISTEMA DE RECEPTOR CENTRAL.....	72
4.5.2.1.3 CONCENTRADORES DE DISCO PARABÓLICO.....	74
<b>4.6 COLECTORES FOTOVOLTAICOS.....</b>	<b>77</b>
4.6.1 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN. EL EFECTO FOTOVOLTAICO.....	77
4.6.2 CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONAMIENTO DE LAS CELDAS SOLARES.....	78

<b>4.6.3 TIPOS DE CELDAS FOTOVOLTAICAS. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES .....</b>	<b>81</b>
<b>4.6.4 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS .....</b>	<b>82</b>
<b>4.6.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....</b>	<b>85</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>87</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>91</b>



## **OBJETIVO:**

El objetivo principal del presente trabajo es ofrecer una introducción al conocimiento de la naturaleza y aplicaciones tecnológicas de la energía solar, conocer algunos de los avances más recientes en la materia, las ventajas que ofrece como fuente de energía frente a otras alternativas, sus posibles alcances y sus limitaciones. La energía solar, al ser un recurso tan abundante en nuestro país, es una de las alternativas más interesantes. Esta fuente tiene una gran variedad de aplicaciones, por lo que sería conveniente continuar con el estudio de las mismas para ponerlas en funcionamiento y, de ser posible, desarrollar otras adicionales. De tal manera, el avance en el conocimiento de ésta y otras tecnologías renovables evitará el rápido agotamiento de las reservas de combustibles fósiles, pero sobre todo, se logrará la satisfacción de las necesidades energéticas sin sacrificar nuestro entorno.

## INTRODUCCIÓN

Algunos de los recursos más importantes de la naturaleza han sido utilizados para fines prácticos en beneficio del hombre desde tiempos muy remotos. Dichos recursos son tan importantes que sin ellos, la vida simplemente no sería posible. De tal manera, el empleo de energía es una condición indispensable para el mantenimiento de la vida, no sólo del hombre sino en general, ya que todos los seres vivos requerimos de ella para llevar a cabo nuestros procesos biológicos. Del mismo modo, la energía ha sido siempre un elemento cardinal para el desarrollo de las civilizaciones humanas.

Si bien las alternativas con que contamos para satisfacer nuestros requerimientos energéticos son diversas, gran parte de éstas tienen su origen en la energía solar. Así, entre las formas de energía más importantes de que disponemos y que proceden de la energía radiante del Sol, se encuentran: la energía eólica, la de la biomasa, la obtenida a partir de combustibles fósiles, la hidráulica, la de las olas y la de las mareas.

El viento es producido por corrientes de aire, originadas a su vez por diferencias de presión entre masas de aire que han sufrido un calentamiento desigual por efecto de los rayos solares. El Sol envía energía calorífica y luminosa que las plantas utilizan para transformar el agua, ciertas sales y el dióxido de carbono en sustancias orgánicas que les sirven de alimento, lo que constituye el proceso conocido como fotosíntesis. A través de este mecanismo las plantas crecen para después convertirse en alimento de gran parte de los organismos que habitan el planeta, aunque también pueden dar origen a una gran variedad de recursos biológicos que constituyen la biomasa, que es otra fuente de energía. O bien puede ocurrir que residuos vegetales queden sepultados y experimenten durante siglos transformaciones metamórficas para convertirse en carbón o, por medio de bacterias, en gas y en petróleo. Al igual que con el viento, el Sol calienta el mar y da lugar a gradientes térmicos que originan flujos de agua. La energía del Sol evapora el agua de los océanos, de los lagos, de los ríos, del suelo y de la vegetación, y el viento transporta las moléculas de agua hacia niveles superiores de la atmósfera para dar lugar a la formación de nubes, que devuelven el agua a la tierra en forma

de lluvia. Debido a su elevación el agua de lluvia posee considerable energía potencial, que se transforma en energía mecánica o hidráulica cuando el agua se reincorpora a las corrientes de ríos, que a su vez la transportan al mar. Las olas, por su parte, se generan por efecto del viento sobre la superficie de los mares, lo que significa que se derivan de la energía solar. Asimismo, las mareas son resultado de la atracción gravitacional que ejercen el Sol y la Luna sobre la tierra y sobre el mar.

De tal manera, podemos darnos cuenta de que el Sol nos envía una gran cantidad de energía y, por lo tanto, es indispensable utilizarla eficientemente.

Es tal la energía solar que puede satisfacer todas nuestras necesidades energéticas, en el caso de que sepamos cómo aprovechar de forma eficiente la luz que continuamente vierte sobre nuestro planeta.

El actual nivel de vida y los modelos económicos adoptados por los gobiernos nos han llevado a un creciente consumo de energía, usualmente obtenida en gran escala a partir de los combustibles fósiles, de las hidroeléctricas y de las centrales nucleares.

La utilización de la energía en un país depende de diversos factores, entre los que se encuentran la densidad de su población, su geografía y el clima. Aunque el aumento en el uso de la energía se relaciona directamente con el crecimiento de la población, globalmente se relaciona más directamente con el desarrollo económico. Por otra parte, al aumentar el consumo se eleva también el precio del producto a la vez que se agotan sus reservas. Pero además, el problema no es únicamente de costos y de abastecimiento sino que paralelamente el uso y, sobre todo, el abuso de las fuentes de energía convencionales —entre las que se encuentran principalmente los combustibles fósiles, tales como el petróleo y el carbón— implican la paulatina destrucción de la naturaleza. Dichas materias primas y sus derivados, en sus fases de transformación para convertirse tanto en productos como en formas de energía aprovechable, generan diversas emisiones y residuos contaminantes que provocan las alteraciones ambientales que ya están a la vista. El entorno que nos rodea se ha deteriorado seriamente y su degradación continúa a medida que pasa el tiempo, justamente como resultado de tales sistemas de energía y de la cultura de consumo. Mientras el mundo se vuelve más industrializado en un intento por mejorar la calidad de vida de la sociedad, los problemas ambientales aumentan de igual forma.

El actual problema de la sociedad de consumo no tiene fácil solución. Desde que se conoce la existencia del hombre, éste ha buscado el aprovechamiento de los recursos de su entorno

para vivir de la manera más confortable posible. Con este propósito cada vez se consume más de estos recursos. Pero esto tiene como inconveniente el hecho de que a la naturaleza le es imposible reponerse a la velocidad con que se le extrae el capital natural. Por ello es necesario que veamos la calidad de vida de forma diferente a como la vemos ahora.

La humanidad entera está sufriendo ya las consecuencias de la devastación de la tierra, la intoxicación del aire, el envenenamiento del agua, los cambios caóticos del clima y la dilapidación de los recursos naturales.

Son estas circunstancias las que están propiciando la búsqueda de otras alternativas en lo que se refiere al suministro energético, con la intención de evitar el agotamiento de nuestros recursos naturales y de nuestras fuentes de energía no renovables, pero sobre todo, para lograr la preservación del medio ambiente ya que en realidad el inconveniente principal de una política energética basada en combustibles fósiles radica en las emisiones contaminantes que resultan de la combustión de estos compuestos, más que en la escasez de sus reservas.

En esta búsqueda se han encontrado fuentes de abastecimiento energético que son poco nocivas para el medio ambiente, a las que se les conoce como energías renovables, debido a que se producen de forma continua y a que son inagotables. La principal fuente de energía renovable es el Sol ya que la energía radiante que envía a la Tierra se traduce en una variedad de efectos al atravesar la atmósfera, algunos de los cuales son aprovechables como recursos energéticos.

Por tales motivos cobra importancia la búsqueda del máximo aprovechamiento de la radiación solar. Es necesario darnos cuenta de que tenemos a nuestro alcance una fuente de energía inmensa y muy mal aprovechada, que cuenta con millones de años de existencia y que prácticamente no tiene fin a escala humana, que además no genera residuos ni contaminantes de ninguna especie, por lo que su utilización contribuye a reducir el efecto invernadero producido por las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y el cambio climático provocado por este efecto.

Por lo tanto, es trascendental buscar por todos los medios posibles el aprovechamiento de esta fuente energética que puede liberarnos definitivamente de la enorme dependencia del petróleo y de otros combustibles fósiles, que son altamente contaminantes y que tarde o temprano se agotarán.

Por otra parte, es conveniente señalar que existen ciertos aspectos particulares de este tipo de energía a los que debemos enfrentarnos. Además de las dificultades que implicaría en sí

misma la adopción de una política energética avanzada, que tuviera como base a la energía solar u otras fuentes renovables, debe considerarse el hecho de que esta energía está sometida a continuas variaciones.

Es necesario continuar con el desarrollo de la tecnología de captación, transformación, acumulación y distribución de la energía solar, para lograr que ésta sea una alternativa cada vez más competitiva a escala mundial. Además, con su difusión y promoción en centros educativos se contribuye a que la energía solar se convierta en una realidad en el futuro al iniciar a los alumnos en el uso de tecnologías ecológicas y en la cultura del respeto al medio ambiente.

Es evidente que resulta imposible prolongar por mucho tiempo los actuales patrones de generación y consumo de energía sin amenazar nuestra propia existencia. Por lo tanto, debe pugnarse por una transición energética que a la vista de las condiciones actuales puede considerarse urgente.

Se trata de un proceso nada sencillo, pero indispensable, en el que la energía solar y otras energías renovables deberán ser algo más que una simple alternativa a tener en cuenta.

Este trabajo consiste básicamente en una investigación bibliográfica acerca del aprovechamiento técnico de la energía solar, cuyo propósito ha sido previamente establecido.

Así, en el primer capítulo se destaca la importancia del suministro energético para el desarrollo de las actividades productivas de cualquier nación, señalando los distintos recursos con que cuenta la humanidad para la satisfacción de dicho suministro, sin pasar por alto los riesgos que implica el abuso en el consumo de algunos de ellos y mencionando, por otra parte, los beneficios que ofrece el uso de fuentes alternas de energía.

En el segundo capítulo se ofrecen algunas cifras que dan una idea del grado de desarrollo de las fuentes renovables de energía en nuestro país, además de citar algunos de los avances logrados al respecto en otras naciones.

En el tercer capítulo se exponen características generales de la fuente de energía más abundante que existe: el Sol. Se describe además de manera muy breve, la naturaleza de la energía que éste nos proporciona, así como algunos de los factores que deben considerarse al momento de estimar la disponibilidad de este recurso a nivel de la superficie terrestre.

Finalmente, el cuarto capítulo está dedicado a la descripción de los distintos equipos empleados para la captación y aprovechamiento de la energía solar, componentes de los mismos y principios que rigen su funcionamiento.

## **CAPÍTULO 1. NATURALEZA DE LA ENERGÍA.**

### **1.1 LA UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA.**

Desde la antigüedad los recursos energéticos han sido utilizados por el hombre para satisfacer algunas de sus necesidades básicas, produciendo calor y trabajo a partir de dichos elementos. El calor tiene una gran variedad de aplicaciones, como la climatización de espacios, la cocción de alimentos, o la producción o transformación de algunos compuestos químicos.

Por otro lado, el trabajo se utiliza para un sinnúmero de procesos en los cuales es necesario vencer fuerzas de oposición: para levantar una masa, para deformar un cuerpo, estirar una liga o un resorte o hacer fluir un líquido.

En este sentido, calor y trabajo son necesidades fundamentales en cualquier grupo humano. Para producirlos, el hombre ha empleado a lo largo de la historia una gran variedad de recursos. Al principio el calor era producido por medio de la combustión de leña, mientras que el trabajo en pequeña escala era producido por la fuerza humana, a mediana escala se obtenía de ciertos animales domesticables -que eran empleados como bestias de carga, medios de transporte o como herramientas para la agricultura, etc.- y a gran escala podría extraerse, por ejemplo, del viento que se empleaba para mover los grandes veleros que transportaban mercancías, o aquéllos que servían como buques de guerra.

Sin embargo, debido al extraordinario crecimiento de la población mundial, junto con el desarrollo tecnológico alcanzado a través de la historia, la disponibilidad de los recursos energéticos se ha convertido en uno de los principales problemas de hoy en día.

Son muchos factores los que determinan el uso de la energía en un país, entre los que se encuentran la geografía, la densidad de población, el clima, la disponibilidad de recursos que proporcionen dicha energía y el costo de producción de la misma. No obstante, por la importancia que tiene para describir el grado de desarrollo de un país, el producto nacional bruto (PNB) debe procurar relacionarse con la utilización eficiente de la energía. Actualmente, aunque a veces el aumento en el uso de la energía está directamente ligado al crecimiento de

la población resulta más determinante el desarrollo económico del país en cuestión, dado que este factor implica -en gran medida- expansión industrial, lo cual demanda mayor consumo energético.

A partir de la revolución industrial el uso de la energía obtenida a través de fuentes convencionales -como son en nuestros días: la quema de combustibles fósiles, las hidroeléctricas, las centrales nucleares, etc.- ha ido en aumento casi cada año, hasta alcanzar en la actualidad un ritmo de crecimiento de aproximadamente un 2% anual. De esta manera nuestra sociedad se ha hecho extraordinariamente dependiente de los combustibles fósiles. Actualmente, la mayor parte de la energía consumida por los seres humanos es producida a partir de esta fuente.<sup>1</sup>

Existen diferentes estimaciones acerca de la cantidad disponible de combustibles fósiles; aquellas que se refieren a las cantidades recuperables de estos recursos indican que los más factibles de ser recuperados son carbón y lignito. Además, sólo un pequeño porcentaje de esta fuente energética ha sido empleada hasta la fecha, mientras que gran parte del petróleo recuperable y gas natural ha sido ya consumida. Pero además de la disponibilidad de estos recursos existen otros factores que deben tomarse en cuenta, tales como el precio del petróleo y los desajustes del mercado causados por el aumento en el precio de las gasolinas, diesel, lubricantes, aceites, etc. Por otra parte, esta excesiva dependencia ha dado lugar a problemas ambientales y conflictos políticos (éstos últimos derivados del hecho de que los combustibles fósiles existen sólo en un número limitado de países). Tales condiciones advierten, por lo tanto, la imposibilidad de prolongar por mucho tiempo los patrones actuales de producción y consumo de energía.

Por tal motivo, en algunos países el interés por los suministros energéticos ha llevado a la toma de medidas para asegurar abastecimientos alternativos, por lo que se han llevado a cabo importantes programas de investigación en las áreas de: fuentes de energía renovable, eficiencia, ahorro de energía y combustibles fósiles. Sin embargo, las soluciones a los problemas energéticos están forzosamente ligadas a consideraciones ambientales. Por ejemplo, un cambio masivo a carbón como fuente básica de energía en países que ahora dependen mayoritariamente de petróleo involucra un aumento de la actividad minera, lo que a su vez se traduce en virtual producción de deposiciones ácidas y liberación de gases

---

<sup>1</sup> De acuerdo con datos del Consejo Mundial de Energía y la Agencia Internacional de la Energía, las fuentes fósiles (petróleo, carbón y gas natural) representan aproximadamente el 80% de la base energética mundial.

invernadero (dióxido de carbono a partir de la combustión del carbón y metano a consecuencia de la explotación de las minas de carbón).

Mientras que las estimaciones de las reservas de petróleo y gas natural y de su uso indican un veloz agotamiento de dichos recursos, las reservas mundiales de carbón son enormes y pueden satisfacer las necesidades energéticas por uno o dos siglos.<sup>2</sup> No obstante, su utilización está limitada por las alteraciones ambientales que se generan de su explotación minera, así como por las emisiones de dióxido de carbono, dióxido de azufre y otros contaminantes atmosféricos derivados de su combustión. Por lo tanto, ésta no es una alternativa viable ya que provocaría una situación ambiental que sería intolerable mucho antes de que las reservas se agotaran. Por tal motivo, deben buscarse nuevas alternativas que nos ayuden no sólo a disminuir el uso de los combustibles fósiles sino, incluso, a liberarnos definitivamente de la dependencia de estos recursos.

Existe una gran variedad de alternativas energéticas. Entre ellas se hace una distinción principal, clasificándolas en dos grupos: fuentes no renovables y fuentes renovables de energía.

## **1.2 FUENTES NO RENOVABLES DE ENERGÍA.**

Es considerada como no renovable aquella energía que se obtiene de recursos que están depositados, comúnmente en el subsuelo, en cantidades inicialmente fijas. Se llaman recursos no renovables porque se van agotando a medida que se consumen, y sus reservas disponibles están sujetas a la posibilidad técnica y económica de su explotación, al descubrimiento de nuevos depósitos, así como a la velocidad de extracción y consumo de las mismas.

Dentro de las fuentes de energía no renovable se encuentran básicamente la energía fósil y la energía nuclear.

---

<sup>2</sup> Algunos especialistas indican que el suministro de petróleo solamente está asegurado para un periodo de unas cuantas décadas. Si bien, estos cálculos se han realizado bajo la consideración de que el consumo se mantenga dentro de niveles similares a los actuales, esto es, que no aumente aunque tampoco se reduzca.



### 1.2.1 ENERGÍA FÓSIL.

Se conoce como energía fósil a aquélla que se obtiene de la combustión de ciertas sustancias que, según la geología, se produjeron en el subsuelo hace millones de años a partir de la acumulación y posterior degradación de enormes cantidades de residuos de seres vivos. Ejemplos de este tipo de energía son:

- a) **Petróleo.** Este compuesto, cuyo nombre proviene del latín *petroleum* (*petra*-piedra y *oleum*-aceite) que significa aceite de piedra, se originó a partir de un proceso que comenzó hace millones de años con la descomposición de residuos de organismos vegetales y animales que fueron sepultados y que fueron sometidos a enormes presiones y elevadas temperaturas. El petróleo es una mezcla de una gran diversidad de hidrocarburos en fase líquida, mezclados con una variedad de impurezas, entre las que se cuenta el azufre (también presente en el gas natural). Los compuestos de azufre pueden eliminarse de manera relativamente fácil del gas y del petróleo, convirtiendo a éstos en combustibles menos contaminantes que el carbón. Por destilación y otros procesos se obtienen las gasolinas, las naftas, el diesel, la turbosina, el coque y demás derivados del petróleo. Aunque en México éste es un recurso abundante, a nivel mundial ya no lo es debido a la sobreexplotación de que es objeto. Tanto en los países desarrollados como en los países en vías de desarrollo, la mayor parte de los sistemas de transporte -terrestres, marítimos y aéreos- consumen combustibles derivados del petróleo para su funcionamiento, sólo por mencionar una de sus múltiples aplicaciones. Fue a mediados del siglo XIX cuando se inició la utilización comercial del petróleo, principalmente como lubricante y materia prima para el alumbrado hasta el fin de la Primera Guerra Mundial. Pero lo que favoreció sobre todo el surgimiento de la producción a gran escala fue la expansión del automóvil, con lo que inició su carrera hasta llegar a convertirse en una de las principales fuentes energéticas, si no la más importante. El periodo de crecimiento más rápido en su utilización comenzó después de la Segunda Guerra Mundial, al completar sus aplicaciones con las de materia prima de la industria petroquímica. Es así como el petróleo se fue relacionando fuertemente con los sectores productivos de la economía mundial, constituyendo el motor de desarrollo de los países capitalistas, y la principal fuente de ingresos de los países productores, en su mayoría países en vías de desarrollo.

Aunque habitualmente se afirma que las reservas de combustibles fósiles están agotándose, existen pocas evidencias que confirmen esta idea. De acuerdo con algunas estimaciones, la producción mundial de petróleo continuará en aumento hasta alcanzar un máximo entre los años 2005 y 2015. Por otra parte, al ir mejorando las tecnologías de extracción, es posible obtener mayores cantidades de petróleo de un depósito. Conjuntamente con el desarrollo de nuevas tecnologías, se puede mejorar la eficiencia de la extracción a través de técnicas secundarias o terciarias de recuperación del petróleo, lo cual puede incluso duplicar la cantidad disponible de este recurso. Gran parte de éste es obtenido de yacimientos que habían sido ya abandonados o esencialmente agotados utilizando técnicas de recuperación primaria.

Así, parece que se dispondrá de petróleo por algunas décadas, aunque posiblemente sea a un costo mayor que el actual.

- b) **Gas Natural.** El gas natural, compuesto casi totalmente por metano, corresponde a la fracción más ligera de los hidrocarburos, por lo que se encuentra en los yacimientos en forma gaseosa. Es uno de los combustibles más limpios; cuando se quema produce principalmente dióxido de carbono, vapor de agua y pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno. El gas natural se ha convertido en una fuente energética muy atractiva, debido a recientes descubrimientos y desarrollo de nuevas fuentes de este combustible. Además de su uso como combustible, el gas natural se utiliza como materia prima en la industria petroquímica. Puede ser empleado, por ejemplo, para la síntesis Fischer-Tropsch de gasolina. No obstante que la velocidad de utilización de gas natural crece más que la del carbón o el petróleo, sus reservas conocidas siguen aumentando. El crecimiento del consumo mundial de este recurso se debe a que se ha convertido en la alternativa preferida para la generación de electricidad por su eficiencia en las turbinas de ciclo combinado y su combustión limpia. Una de las primeras aplicaciones del gas natural ha sido en la generación de vapor, sustituyendo o complementando en instalaciones mixtas, la acción de otros combustibles (sólidos o líquidos). El gas natural tiene aplicaciones en distintas ramas de la industria, como en la cerámica, en la industria del vidrio para operaciones térmicas, en la industria textil para el acabado de las fibras, en la industria química como materia prima y en la industria del cemento como combustible. Además de sus aplicaciones, el gas natural ofrece ventajas ambientales y en cuestión de seguridad

sobre otros combustibles: el gas natural presenta un rango de inflamabilidad muy limitado y una temperatura de ignición alta, por lo que la posibilidad de una explosión o incendio accidental es reducida; en caso de fugas el gas natural se disipa rápidamente en la atmósfera, debido a que es más ligero que el aire; es un combustible relativamente barato; promueve una mayor eficiencia en plantas de ciclo combinado generadoras de electricidad; presenta una combustión completa y limpia ya que casi no emite dióxido de azufre, el cual ocasiona la lluvia ácida; asimismo, el gas natural emite cantidades mucho menores de monóxido de carbono, hidrocarburos reactivos, óxidos de nitrógeno y dióxido de carbono, que otros combustibles fósiles. Además puede contribuir a mejorar la calidad del aire, ya que los vehículos que utilizan este combustible reducen sus emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos reactivos hasta en un 90 por ciento, en comparación con los vehículos que utilizan gasolina.

c) **Carbón.** El carbón se formó, al igual que otros combustibles fósiles, de residuos de plantas que fueron cubiertas por agua y se descompusieron poco a poco. A medida que se produjo esa descomposición, la materia vegetal perdió átomos de oxígeno e hidrógeno, formando depósitos con un alto contenido de carbono. Con el paso del tiempo, la arena y el lodo se fueron acumulando sobre estos yacimientos. La presión de las capas superiores, los movimientos de la corteza terrestre, y el calor volcánico, comprimieron y endurecieron los depósitos hasta formar un material rico en carbono, conocido por carbón. Desafortunadamente, durante el proceso de formación se incorporaron también ciertas cantidades de otros elementos naturales, que se liberan durante la combustión del carbón. Entre éstos se encuentran además de dióxido de carbono y agua, cantidades apreciables de contaminantes del aire, principalmente dióxido de azufre, fluoruro de hidrógeno, uranio y otros metales radiactivos, así como metales pesados. Por medio de técnicas modernas es posible llevar a cabo la eliminación de algunas de estas impurezas, especialmente del azufre.

A nivel mundial la principal reserva energética es el carbón, que se encuentra disponible en abundancia en distintas regiones, incluyendo países en vías de desarrollo, pero no en México. Aunque la quema doméstica de carbón ha disminuido bastante en los países desarrollados, aún se utiliza en gran parte de éstos, así como también en países en desarrollo para la producción de energía eléctrica, ya que el calor producido de su quema

puede aprovecharse para generar vapor, que a su vez se emplea para accionar turbinas. Sin embargo, los problemas ambientales que provoca el uso de este recurso son aún mayores que los producidos por el petróleo y sus derivados.

Así, aunque las reservas de petróleo son abundantes sólo a corto plazo (para un lapso de unas cuantas décadas), las de carbón son suficientes como para disponer de ellas durante algunos siglos. Asimismo, las enormes cantidades de gas natural en sedimentos oceánicos y en el permafrost<sup>3</sup> podrían duplicar las reservas de combustible, en caso de que pudieran ser explotadas.

No obstante, como ya se dijo anteriormente, el problema más grave acerca del uso de los combustibles fósiles en la actualidad no es el hecho de que sus reservas se estén agotando, sino lo altamente contaminante que resulta su combustión.

### **1.2.2 ENERGÍA NUCLEAR.**

Esta fuente de energía se produce a partir de la modificación de los núcleos atómicos de ciertos elementos que tienen esa capacidad. Al llevar a cabo esta modificación, cierta cantidad de su masa es transformada en energía. Las cantidades de energía que pueden obtenerse a través de procesos nucleares superan enormemente a las que pueden lograrse por medio de procesos químicos, que sólo involucran las regiones externas del átomo. Si bien la producción de energía nuclear no involucra combustiones, sí origina otros subproductos nocivos para el ambiente. La generación de energía nuclear puede llevarse a cabo mediante dos procesos: la fisión y la fusión de núcleos atómicos.

a) Fisión Nuclear. Este proceso consiste en la división de átomos pesados de ciertos elementos -tales como el uranio o el plutonio-, específicamente de los núcleos de dichos

---

<sup>3</sup> Permafrost, nivel del suelo que permanece helado durante todo el año, incluso durante el verano. Existen grandes zonas de permafrost a lo largo de Canadá, Alaska, norte de Europa, Asia y la Antártida. Groenlandia está cubierta casi en su totalidad por permafrost. Los indicios para determinar la edad del permafrost del hemisferio norte se basan en los numerosos descubrimientos de restos, incrustados en el suelo congelado, de mamuts, que se extinguieron hace 10.000 o 15.000 años, al término del último periodo glacial. La profundidad del permafrost está determinada por la temperatura ambiental, aunque sólo puede encontrarse en los suelos de regiones con climas muy fríos.

átomos, con lo que se logra la liberación de grandes cantidades de energía en forma de calor. Es justamente a través de este proceso que funcionan los reactores nucleares convencionales. Considerando solamente al isótopo uranio 235 como fuente de combustible fisible, las reservas recuperables totales de combustible nuclear son aproximadamente las mismas que las reservas de combustible fósil. Éstas son aún mayores si se considera el uso de reactores generadores<sup>4</sup>. El asombroso poder del átomo descubierto al final de la Segunda Guerra Mundial planteó grandes expectativas para la producción de energía abundante y económica. Si bien estas esperanzas todavía no se han cumplido totalmente, la energía nuclear proporciona un importante porcentaje de la energía eléctrica en algunos países en la actualidad, y es considerada por algunos como quizá la única fuente de energía eléctrica que puede satisfacer la demanda mundial sin provocar la degradación del medio ambiente, particularmente a través de la generación de gases invernadero, como ocurre en las reacciones de combustión de petróleo y carbón. Sin embargo, es necesario señalar que a diferencia de la fusión nuclear este proceso sí genera productos radiactivos, además de los riesgos que supone la existencia de centrales nucleares para los núcleos de población que se encuentren cercanos al sitio en que se hallen dichas instalaciones. En más de una ocasión se ha tenido conocimiento de accidentes nucleares de consecuencias desastrosas.

Debe destacarse que el uso a gran escala de la energía nuclear supone la generación de enormes cantidades de residuos altamente radiactivos, que pueden permanecer en el ambiente por muchísimo tiempo, y que son capaces de mantener su radiactividad durante miles de años afectando no solamente a los seres vivos de la actualidad sino también a los de generaciones futuras. Así, se agrega el inconveniente del manejo de los desechos radiactivos, que deben ser almacenados en sitios seguros o eliminados de alguna manera.

b) **Fusión Nuclear.** El proceso de fusión nuclear consiste en la producción de núcleos atómicos pesados a partir de la unión de dos núcleos ligeros, como puede ser el tritio. De hecho, las dos reacciones principales por medio de las cuales se puede producir energía a partir de la fusión son: la reacción deuterio-deuterio y la reacción deuterio-tritio. Teóricamente esta sería una fuente de energía abundante, debido a que existe una cierta fracción de tritio en el agua de los océanos. Por otra parte, la extracción de sólo el 2% del deuterio, también

---

<sup>4</sup> Reactores generadores, son aquellos que producen más material fisiónable del que consumen como combustible.

presente en los océanos, produciría cerca de un billón de veces tanta energía por fusión nuclear controlada como la que estaba originalmente presente en los combustibles fósiles, un aspecto limitado por la falta de éxito en el desarrollo de un reactor de fusión nuclear controlada. Es precisamente a partir de reacciones nucleares de fusión, también denominadas *termonucleares*, que producen energía las estrellas, entre las que se encuentra el Sol.

En la siguiente tabla se muestran las estimaciones sobre las reservas no renovables de energía:

Tabla 1.1. Reservas globales de energía (1988), en unidades de Q ( $10^{21}$ joules).		
<i>Tipo de combustible</i>	<i>Reservas conocidas</i>	<i>Reservas estimadas</i>
Carbón	25Q	118Q
Petróleo	5Q	9Q
Gas Natural	4Q	10Q
Uranio	2Q*	2Q*
Total	36Q	139Q
*El uso de cierto tipo de reactores puede aumentar estos valores a aproximadamente 100Q		

Fuente: Baird, Colin. «Química Ambiental». Barcelona, Reverté, 2001.

Todos estos recursos continuarán aportando significativas cantidades de energía, pero los daños ambientales originados de su uso han hecho indispensable la búsqueda de nuevas alternativas. Debido a limitaciones técnicas y económicas, algunas de estas alternativas todavía no se han desarrollado a gran escala, por lo que sólo se han utilizado parcialmente. A continuación se tratará sobre cada una de ellas.

### 1.3 FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA.

Se conoce como energía renovable a la que puede explotarse ilimitadamente ya que su cantidad disponible no disminuye a medida en que ésta se aprovecha, debido a que se produce continuamente, por lo que es prácticamente inagotable a escala humana. Las energías renovables son, además, fuentes de abastecimiento respetuosas del medio ambiente porque su

captura y utilización –en la mayoría de los casos– no dan lugar a la emisión directa de gases invernadero u otros contaminantes.

Existen distintas fuentes de energía renovable, dependiendo de los recursos naturales empleados para su generación. Son fuentes de energía renovable: la hidráulica, la eólica, la biomasa, la solar, la geotérmica, la energía de las olas y de las mareas.

En la actualidad se depende enormemente del carbón, el petróleo y el gas natural para la producción de energía, sin embargo, estos son recursos finitos que eventualmente se agotarán. En contraste, las fuentes de energía renovables son constantemente restablecidas, por lo que no se extinguirán. Para alcanzar un esquema de desarrollo sustentable es indispensable que la mayor parte de los recursos, y sobre todo la energía, sean del tipo renovable. El Sol es la fuente principal de energía renovable ya que de él provienen –directa o indirectamente– casi todas las demás, como se verá a continuación.

### **1.3.1 ENERGÍA HIDRÁULICA.**

El agua es parte fundamental de la naturaleza y de la vida del ser humano. La energía radiante del Sol, dentro del ciclo hidrológico, evapora el agua de los océanos, lagos, ríos e incluso del suelo y de la vegetación. Y el vapor asciende hacia las capas superiores de la atmósfera. Como el aire se enfría al ascender, el agua se condensa en pequeñas partículas que forman las nubes. Después que estas partículas aumentan de tamaño se precipitan a la tierra en forma de lluvia que se reincorpora a las corrientes de los ríos, que a su vez la transportan al mar. El agua, al fluir por los ríos genera energía cinética que el hombre ha aprovechado desde hace siglos. Hace más de cien años esa energía, que hasta entonces era utilizada básicamente para moler el trigo, como hacían los antiguos griegos y romanos, comenzó a emplearse para la generación de electricidad<sup>5</sup>. Fue, de hecho, hasta mediados del siglo veinte la principal fuente de que se sirvió el hombre para su producción a gran escala. Las centrales hidroeléctricas requieren de grandes embalses de agua contenidos por una presa y funcionan convirtiendo la energía cinética y potencial de una masa de agua en energía eléctrica. El caudal de agua es controlado y se puede mantener constante. Al forzar un flujo descendente del agua, es posible mover una turbina cuyo movimiento de rotación es transferido mediante un eje a un generador

---

<sup>5</sup> La primera central hidroeléctrica fue construida en 1880 en Northumberland, Gran Bretaña.

de electricidad. Son pocas las instalaciones hidroeléctricas que aprovechan el flujo de un río, ya que la mayoría de éstas utilizan embalses y cascadas en las que la presión del agua –y por consiguiente el rendimiento energético obtenido– es superior. Aunque la explotación de este recurso ofrece numerosas ventajas, dado que es renovable, es autóctono (lo cual evita importaciones), no genera calor ni emisiones contaminantes (lluvia ácida, gases invernadero, etc.) y genera puestos de trabajo en su construcción, mantenimiento y operación, es conveniente recordar que se requiere de grandes extensiones de terreno para el almacenaje de agua, lo cual involucra deforestación o inundación de amplias zonas provistas de vegetación, con lo que se ve afectado el ecosistema local.

De las principales plantas generadoras de energía –como las que emplean carbón, gas natural y petróleo– las instalaciones hidroeléctricas son las más eficientes en lo que se refiere a la transformación de energía potencial en electricidad. Asimismo, la energía hidráulica ofrece los costos más bajos para la generación de electricidad de todas las fuentes disponibles. Además una planta hidroeléctrica puede responder casi instantáneamente a la demanda de generación eléctrica, simplemente regulando el flujo de agua que llega a las turbinas. La energía hidráulica ha sido por más de un siglo una fuente confiable para la generación de electricidad. Debido a que el ciclo hidrológico se efectúa continuamente, este recurso es inagotable. La energía potencial del agua es la fuente de energía de este proceso y, a diferencia de las tecnologías basadas en combustibles fósiles, aquí la fuente de energía no es consumida o agotada durante el proceso.

### **1.3.2 ENERGÍA EÓLICA.**

La energía eólica es aquella que se obtiene a través de la fuerza del viento. Este fenómeno es producto de movimientos del aire atmosférico ocasionados básicamente por el calentamiento desigual –provocado por el Sol– de masas de aire que tienden a igualar sus presiones, aunque también existe un efecto de la rotación de la Tierra y otro de la atracción gravitacional de la Luna y el Sol. De acuerdo con algunas estimaciones, aproximadamente el 2% del calor que la Tierra recibe del Sol se transforma en viento, pero sólo una pequeña fracción puede ser aprovechada debido a que gran parte de estos vientos ocurre a grandes alturas o sobre los océanos, mar adentro. Como resultado de la orografía específica de cada lugar, algunas regiones experimentan condiciones de viento casi constantes.



El aprovechamiento de la fuerza del viento para realizar trabajo útil es casi tan antiguo como la civilización. Una de las primeras y más sencillas aplicaciones fue la de las velas para la navegación. Se han encontrado referencias escritas acerca de la existencia de molinos en la antigua Persia que datan de hace dos mil quinientos años. Durante veinticinco siglos el viento ha movido las aspas de los molinos, para moler granos o para bombear agua. Es en el siglo XX cuando el hombre comienza a usar la energía eólica para producir electricidad, aunque en un principio fue sólo para autoabastecimiento de pequeñas instalaciones. La generación de electricidad a gran escala se ha conseguido en décadas recientes por medio de grandes regimientos de molinos de viento de avanzada tecnología, cuyas aspas o hélices hacen girar un eje central conectado a un generador eléctrico<sup>6</sup>. Este tipo de instalaciones son conocidas como *granjas de viento*. Aquellos vientos que presentan velocidades promedio entre 5.0 y 12.5 metros por segundo son los que se consideran aprovechables.

En la década de los noventa, al tomarse conciencia de la necesidad de modificar el modelo energético, surge la energía eólica como un recurso renovable competitivo en términos económicos con las fuentes de energía convencionales. Dinamarca fue el primer país en implantar la energía del viento como una fracción importante en la capacidad de generación eléctrica<sup>7</sup>, y es en este lugar donde se encuentran algunas de las mejores instalaciones de este tipo, así como en California (EE.UU.).

Para octubre de 1996, la granja de viento más grande construida hasta entonces en Europa fue inaugurada en Carno, Gales, con capacidad para generar suficiente electricidad para 150,000 hogares. En regiones septentrionales, incluyendo partes de Alaska, Canadá, los países Escandinavos y Rusia, habitualmente se tienen fuertes condiciones de viento, adecuadas para la generación de energía. Al mismo tiempo, la escasez de otros recursos energéticos hace de la energía eólica una alternativa interesante para muchas de estas regiones.

---

<sup>6</sup> Los actuales aerogeneradores comerciales de fuerza se encuentran disponibles desde 500 hasta 1,500 KW de potencia nominal; al día de hoy, existen prototipos de hasta 3,000 KW. De manera muy general, con un aerogenerador cuyas aspas tienen un diámetro de 40 metros y sujeto a vientos con velocidad promedio de 8 metros por segundo, se pueden tener 600 KW de capacidad, lo cual es suficiente para proveer de electricidad a un conjunto habitacional de 200 departamentos.

<sup>7</sup> En Dinamarca, ya desde mediados de la década de los 90 el viento proporcionaba el 10% de la energía eléctrica.

Si bien existe el potencial para emplear esta tecnología en numerosas partes del mundo, en años recientes el mayor crecimiento en instalaciones de energía eólica se ha conseguido en Alemania y en la India.

El aprovechamiento de este recurso, además de ayudar a reducir emisiones contaminantes al disminuir la dependencia de combustibles fósiles, presenta como ventaja el hecho de que el tiempo de construcción de instalaciones para su explotación es menor con respecto a otras opciones energéticas.

Gracias al desarrollo tecnológico y a la reducción del costo de producir electricidad empleando molinos de viento, la energía eólica ha dejado de ser una fantasía, para convertirse en una realidad que se consolida como alternativa a las fuentes contaminantes.

### **1.3.3 LA BIOMASA.**

Esta fuente de energía constituye también una forma de energía solar, ya que es producto de la fotosíntesis. Por medio de este mecanismo las plantas elaboran su propio alimento y el de otros seres vivientes en las cadenas alimenticias. De esta forma, gracias a la fotosíntesis se obtienen productos como la madera, que tiene una gran variedad de aplicaciones, además de su valor energético. La biomasa -abreviatura de "masa biológica"- comprende una amplia diversidad de tipos de combustible que se obtiene de recursos biológicos, tales como: la vegetación, cultivos acuáticos, residuos forestales y agrícolas, urbanos, desechos animales, etc. Estos materiales son transformados por el reino animal, incluido el hombre, a través de diferentes procedimientos que dan lugar a elementos utilizables directamente, pero también a subproductos que pueden encontrar aplicación en el campo energético. El ser humano además la transforma por medios artificiales para obtener bienes de consumo. La forma de aprovechar la biomasa como recurso energético puede ser a través de la combustión directa, como tradicionalmente se ha aprovechado en México la leña y el bagazo de caña, o bien mediante la conversión de la biomasa en diferentes hidrocarburos a través de distintos procesos.

El empleo de madera, de residuos agrícolas y de estiércol ha sido, tradicionalmente, una fuente de energía en países en vías de desarrollo. Sin embargo, debido a que su uso doméstico y en pequeña escala es contaminante para el aire, además de ineficiente, se ha reducido gradualmente, cediendo lugar a las formas convencionales de energía, tales como combustibles fósiles y electricidad, conforme se ha desarrollado la economía de tales países.

La energía que se deriva de la biomasa es renovable indefinidamente. Al contrario de las energías eólica y solar, la de la biomasa es fácil de almacenar. Actualmente se ha desarrollado la tecnología para la utilización de la biomasa a gran escala en instalaciones no contaminantes del aire, en donde se produce vapor a partir de la quema de madera. Otra alternativa es gasificar la madera o hacerla digerir por bacterias para convertirla en combustible a base de alcohol. De tal manera, los métodos empleados para llevar a cabo la transformación de la biomasa en energía útil pueden ser clasificados en: termoquímicos (combustión, pirolisis, etc.) o biológicos (como es el caso de la fermentación alcohólica).

La producción mundial de biomasa se encuentra estimada en alrededor de 146 billones de toneladas métricas al año, primordialmente a partir del crecimiento no controlado de plantas. Al ser tan abundante, este recurso podría ser utilizado para reemplazar gran parte de los 100 millones de toneladas métricas de petróleo y gas natural consumidas actualmente en la manufactura de productos químicos en el mundo cada año. Dentro de las fuentes de biomasa que pueden ser empleadas para la producción de químicos están los granos y cosechas de caña de azúcar (para producir etanol), semillas, productos secundarios de animales, abono, y aguas residuales (las últimas dos para la generación de metano).

#### **1.3.4 ENERGÍA SOLAR.**

Como se verá más adelante, la energía solar que recibe nuestro planeta es resultado de un proceso de fusión nuclear que se presenta en el interior del Sol. Sin embargo, de la enorme cantidad de energía generada mediante dicho proceso nuestro planeta recibe sólo una pequeña fracción. No obstante, esa energía resulta una cantidad enorme en relación al tamaño de nuestro planeta. Básicamente, recogiendo de forma adecuada la radiación solar, podemos obtener calor y electricidad (ver Capítulo 4).

La luz del Sol es una excelente fuente de energía debido a que es inagotable, ampliamente disponible y económica, además, su uso no produce contaminantes químicos del aire o el agua. En la actualidad el Sol envía a nuestro planeta, anualmente, alrededor de cuatro mil veces más energía que la que consumimos. Es por ello que el uso de sólo una pequeña fracción de la energía solar que llega a la Tierra, sería suficiente para cubrir todas las necesidades energéticas. En los Estados Unidos, por ejemplo, con eficiencias de conversión del 10 al 30%, se requerirían colectores que cubrieran un área aproximada de una décima a una trigésima

parte del estado de Arizona para satisfacer las necesidades actuales de energía en dicho país. En menos de 40 minutos, los Estados Unidos reciben más energía en forma de luz solar que la que obtienen a partir de la quema de combustibles fósiles en un año. La luz del Sol es el recurso energético más abundante en el mundo, y durante miles de años los seres humanos hemos servido de esta fuente tanto para obtener luz y calor como para producir alimentos. Sin embargo, la luz solar se caracteriza por ser una fuente de energía de baja densidad y por su naturaleza intermitente. Hoy, se desarrollan tecnologías que concentran la luz solar y la transforman en otras formas de energía que presentan una gran variedad de aplicaciones, tales como la producción de electricidad, vapor y agua caliente tanto para uso doméstico como para procesos industriales. La aplicación más simple de la energía solar -después de su uso directo como luz, por ejemplo, para la iluminación de espacios- es el calentamiento de edificios y agua. Esto se consigue a través de sistemas, llamados *pasivos*, que normalmente involucran diseños arquitectónicos que mejoran la absorción y retención de la energía solar que incide sobre esos edificios. Los *sistemas activos* son aquéllos que requieren fuentes adicionales de energía para su funcionamiento, por ejemplo bombas que hacen circular aire, agua u otros fluidos, desde los colectores solares -que absorben la luz solar y transfieren calor a dichos fluidos- hasta sitios donde se almacena la energía. Además de estas aplicaciones existen dos métodos más complejos que son empleados para llevar a cabo la generación de electricidad a partir de luz solar. Uno de ellos es la *conversión solar térmica eléctrica*, la cual transforma indirectamente la energía del Sol en energía eléctrica; y la otra, la *conversión fotovoltaica* de energía, que transforma directamente la radiación solar en electricidad. Más adelante se explicarán con mayor detalle las distintas formas de aprovechamiento de este recurso.

### **1.3.5 ENERGÍA GEOTÉRMICA.**

La energía geotérmica es otra forma de energía renovable que puede ser aprovechada. Esta energía no proviene del Sol, sino que tiene su origen bajo la superficie terrestre. La energía geotérmica consiste en extraer calor producido por el magma de la tierra, que se encuentra cerca de la superficie en las zonas con alta actividad volcánica. El calor se extrae en forma de

vapor, agua caliente o rocas incandescentes que se utilizan para la generación de vapor. Estas formas de calor han sido empleadas como fuentes de energía por cerca de un siglo.<sup>8</sup>

El agua y el vapor que se obtienen a partir de esta fuente en ocasiones brotan de forma espontánea hasta alcanzar la superficie, mientras que en otras se requiere el uso de ciertos procedimientos, tales como la perforación de pozos en roca volcánica. Aunque en algunos casos el agua extraída es tan pura que puede ser usada para la ganadería y el riego de cultivos, en otros, el agua contiene sales corrosivas y minerales disueltos. Por lo general el empleo de calor proveniente de agua contaminada requiere que ésta sea inyectada nuevamente a la reserva de la cual fue extraída —a una profundidad por debajo de los mantos acuíferos— después de haberle extraído el calor, para evitar la contaminación de las aguas superficiales. Además, por medio de este procedimiento se recicla el agua geotérmica y se reabastece la reserva.

Por otra parte, el uso de las rocas incandescentes requiere la fractura de estas formaciones, seguida por la inyección de agua que se recupera en forma de vapor. Si bien esta técnica se encuentra aún en estado experimental, promete alrededor de diez veces más energía que la producida a partir de las fuentes de vapor y agua caliente.

En la mayoría de los casos el calor que se obtiene es utilizado para la generación de energía eléctrica. Diversos atributos de los recursos geotérmicos hacen de éstos una fuente de energía conveniente. La extracción y el uso de la energía geotérmica no involucra la combustión de combustibles fósiles, por lo que no existe la liberación de dióxido de carbono y otros gases formados durante la combustión de estos materiales. El uso de los recursos geotérmicos es benéfico, además, porque permite la diversificación de las fuentes energéticas de los países, a partir de recursos disponibles localmente. Una de las desventajas de esta energía es la emisión de sulfuro de hidrógeno durante su extracción, aunque el impacto ambiental es mucho menor al producido por una planta térmica convencional. Algunas plantas geotérmicas producen materiales sólidos o lodos, que requieren su eliminación en sitios adecuados. Por otro lado, las plantas geotérmicas no precisan de grandes extensiones de terreno ni necesitan de almacenamiento y transporte de combustibles. Estas características reducen incluso el impacto visual de las plantas en las regiones donde se encuentran. La

---

<sup>8</sup> La Energía Geotérmica fue empleada por primera vez para la producción de electricidad en el año de 1904 en Larderello, Italia, y desde entonces ha sido desarrollada en Japón, Rusia, Nueva Zelanda, las Filipinas y el norte de California en los Estados Unidos.

posibilidad de producción de energía geotérmica a largo plazo ha sido demostrada por medio de la generación continua de electricidad en las instalaciones de Larderello, en Italia, desde 1913; en Wairakei, Nueva Zelanda, desde 1958; y en California desde 1960. De hecho, ningún yacimiento geotérmico ha sido abandonado debido al agotamiento del recurso. Sin embargo, se ha experimentado la disminución de la presión y la producción, por lo que la investigación en las instalaciones de California se ha centrado en la reducción de estos efectos a través de la inyección de agua para mantener la presión de las reservas.

Su principal limitante es el alto costo en infraestructura, ya que se requiere de equipo especializado con alta resistencia para la perforación de pozos. Con todo, esta fuente de energía alberga diversas expectativas y su desarrollo continúa.

### **1.3.6 ENERGÍA OCEÁNICA.**

Los océanos reciben, almacenan y disipan energía a través de distintos fenómenos físicos. Esta energía existe en forma de mareas, olas, diferencias de temperatura, gradientes salinos y biomasa marina. Cada uno de estos elementos presenta diferencias significativas con respecto a los demás en términos de sus procesos físicos, técnicas de explotación y estado de desarrollo.

La diferencia de temperatura oceánica es producida debido a que el Sol calienta más la superficie del agua que las profundidades. Esta diferencia puede ser empleada como una fuente de energía, por ejemplo, para proporcionar calor que impulse un ciclo termodinámico que produzca otras formas de energía. Las técnicas de conversión de la energía térmica del océano, que se encuentran actualmente en la etapa de prototipo, son costosas y ampliamente restringidas a regiones tropicales. En cuanto a la energía de los gradientes salinos, alguna vez objeto de interés, no se espera que sea explotada a corto plazo.

Las olas son ocasionadas por las mareas y por efecto de los vientos que inciden sobre la superficie de los mares, lo que significa que de forma indirecta tienen su origen en la energía del Sol. Esta forma de energía puede ser utilizada para la generación de electricidad y como energía mecánica. Sin embargo, el aprovechamiento de la energía de las olas se encuentra todavía en sus inicios. Antes deben desarrollarse pequeños dispositivos que se instalen en las líneas de playa, pero su rango de aplicación y potencial es limitado. Es improbable, al menos

por unas cuantas décadas, que se lleve a cabo la instalación de plantas más eficaces a lo largo de la costa, aunque el mayor potencial energético del océano se localiza en dicha región.

Por otra parte, las mareas son ocasionadas por atracción gravitacional de la Luna y el Sol que actúa sobre los océanos. Los movimientos relativos de estos cuerpos ocasionan que la superficie oceánica se eleve periódicamente, dando lugar a una variedad de ciclos. Se ha propuesto la construcción de presas costeras en regiones donde se presentan mareas especialmente altas y bajas, que hagan posible la generación de electricidad. Aunque los sistemas de energía oceánica ofrecen un enorme potencial, sólo la energía de las mareas puede ser explotada empleando tecnología comercialmente disponible, y aun así está siendo aprovechada sólo en unas cuantas plantas piloto. En general, este recurso no es abundante en México.

A pesar de sus diferencias, estas energías -la energía térmica del océano, la de los gradientes salinos, la de las olas y la de las mareas- comparten ciertas características. En cada caso el flujo total de energía es muy grande, sin embargo, estos flujos son esparcidos sobre áreas muy extensas, produciendo así energía de baja densidad y el aumento de los costos de captación de la energía. Por otro lado, debido a que gran parte del potencial técnico existe en áreas alejadas de los centros de consumo energético, parece inevitable que solamente una pequeña fracción del potencial técnico global será utilizado en un futuro próximo.

Así, podemos darnos cuenta de que el problema fundamental acerca de los recursos energéticos no es la escasez de su suministro. En el siglo que apenas inicia, la atención debe centrarse, principalmente, en los enormes daños provocados al medio ambiente y a la salud humana, debido a la enorme cantidad de emisiones contaminantes que se derivan del uso de los combustibles fósiles. Es de vital importancia reducir la extraordinaria dependencia de estos recursos. De ser así, se favorecerán la investigación y el desarrollo tecnológico al diversificar nuestras fuentes de energía.

## **CAPÍTULO 2. APROVECHAMIENTO DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN MÉXICO Y EL MUNDO.**

### **2.1 LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN MÉXICO.**

En México como en el contexto internacional, el suministro de energía tiene un papel muy importante, debido a que es fundamental para el desarrollo de todas las actividades productivas y, por tanto, para el progreso económico y social del país.

De hecho, el sector energético es una de las actividades económicas más importantes en nuestro país. El 40% del total de las inversiones públicas está relacionado de alguna manera con proyectos energéticos. La generación de energía está basada primordialmente en los hidrocarburos que México produce en grandes cantidades: de la oferta total de energía en el año 2000, el 82% se obtuvo a partir de estos compuestos (64.4% del petróleo y 17.6% del gas natural). De este total, una parte se exporta y el resto se emplea para el consumo interno, esencialmente en los sectores industrial y de transporte, así como para uso habitacional, comercial y público.

Para satisfacer la demanda nacional de energía, además de contar con grandes reservas de combustible fósil, México posee un potencial muy importante en materia de recursos energéticos renovables.<sup>9</sup> El aprovechamiento de estos recursos permitirá la diversificación de las fuentes de energía, el desarrollo tecnológico e industrial, y la disminución de los daños provocados al ambiente por la producción, distribución y uso final de las formas convencionales de energía.

Con esta finalidad, el sector energético nacional se ha propuesto avanzar en el campo de las energías renovables a través del desarrollo de proyectos para la generación de energía a partir de estas fuentes. Como ejemplo de esto, se pueden mencionar los proyectos

---

<sup>9</sup> En el caso de la energía solar, por ejemplo, según reporta la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), se puede afirmar de manera muy general que la República Mexicana recibe, en tan sólo seis horas, tanta energía en forma de luz solar como la que consumirá durante todo un año a partir de fuentes convencionales.



hidroeléctricos de "Chicoasen" y "El Cajón" (1,686 MW), y el proyecto geotérmico "Los Azufres" (107 MW), desarrollados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Sin embargo, como consecuencia de la dispersión y la baja densidad energética de las fuentes renovables de energía, habitualmente se requiere de grandes extensiones de terreno para conseguir niveles de aprovechamiento comparables a los de sistemas que utilizan combustibles fósiles. Por otra parte, los sistemas de aprovechamiento de energías renovables deben situarse en el lugar en el que se dispone del recurso, lo que en muchas ocasiones sucede en regiones apartadas de donde se encuentra la necesidad. A pesar de estas circunstancias, en nuestro país se ha logrado el desarrollo de proyectos para la explotación de estos recursos.

Actualmente, existen en México diversas actividades realizadas por universidades, industrias e institutos que buscan el aprovechamiento de la energía solar en sus distintas manifestaciones. El avance e interés en el desarrollo de proyectos, prototipos, equipos y sistemas para la captación, transformación y uso de las energías renovables se inició a partir de la década de los setentas y continúa hasta hoy.

Para llevar a cabo la planeación de estrategias sobre el aprovechamiento de las energías renovables en México, el organismo de gobierno encargado del sector energético, la Secretaría de Energía (SENER), cuenta con el apoyo de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), que fue creada desde 1989. Por su parte, la CONAE estableció desde hace algunos años, una alianza con la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES), y juntas operan el Consejo Consultivo para el Fomento de las Energías Renovables (COFER).

De acuerdo con el Programa Energía y Medio Ambiente hacia el Desarrollo Sustentable SENER-SEMARNAT 2002, en los últimos años México ha seguido una política que busca paralelamente el crecimiento económico y la disminución del impacto sobre el medio ambiente, considerando factores como la eficiencia energética, ahorro de energía, diversificación de fuentes energéticas, desarrollo de energías limpias y programas de gestión ambiental. Todo con el objetivo de asegurar el suministro energético a largo plazo en el país e incrementar el abasto, para extender su disponibilidad hacia quienes carecen de servicios de energía. De ser cierto, estas acciones favorecerán la disminución en el consumo de recursos no renovables, reducirán la tasa de crecimiento de emisiones contaminantes globales y, por consecuencia, el

impacto ambiental derivado de la generación de energía.<sup>10</sup>

A pesar de todos los esfuerzos realizados, en la actualidad sólo una pequeña fracción del total de la demanda energética nacional se satisface a través de fuentes renovables de energía. En el año 2000, por ejemplo, la generación de energía eléctrica a partir de centrales termoeléctricas constituyó el 80.7% del total, en tanto que las fuentes renovables sólo contribuyeron con el 20.3% de la producción, siendo las grandes hidroeléctricas las más representativas (17.3%).

### **2.1.1 ENERGÍA HIDRÁULICA.**

Las relativamente pequeñas caídas y corrientes de agua con que cuenta el país, ofrecen la posibilidad de generar electricidad en pequeñas instalaciones. En 1999, esta fuente de energía representaba el 14.4% de la generación eléctrica nacional. En el 2001, el Sistema Eléctrico Nacional alcanzó una capacidad efectiva de 38,518 MW, de los cuales 25% correspondieron a fuentes hidroeléctricas. Según estudios realizados por el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) en canales de riego, el potencial aprovechable es superior a los 3,000 MW. Por su parte, la CONAE ha identificado tan sólo en una región montañosa, ubicada entre los estados de Veracruz y Puebla, hasta 100 sitios aptos para el aprovechamiento de este recurso, con los cuales se conseguiría una generación de 3,570 GWh anuales, equivalentes a una capacidad media de 400 MW. A su vez, la CFE ha estimado la existencia de un potencial hidroeléctrico equivalente a una potencia instalable de aproximadamente 43,000 MW, distribuido en el territorio nacional en por lo menos 500 sitios.

Adicionalmente, la CONAE promueve entre particulares el desarrollo de proyectos para la explotación de este recurso, demostrando que la habilitación de centrales minihidroeléctricas es rentable. Estos proyectos cuentan con una potencia instalada inferior a los 10 MW y se localizan en pequeños ríos, por lo que no requieren grandes presas ni excesivas inversiones. En la actualidad México cuenta con minicentrales en operación en la CFE, Luz y Fuerza del Centro, LFC, y en los sistemas independientes de particulares, como se muestra a continuación:

---

<sup>10</sup> El Programa Energético-Ambiental SENER-SEMARNAT 2002 está fundamentado tanto en el Plan Nacional de Desarrollo 2001-2006 como en el Programa Sectorial de Energía 2001-2006 y se vincula al Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales de la SEMARNAT para el mismo periodo.

Tabla 2.1 Resumen de centrales en operación en México						
<i>Institución o empresa</i>	<i>Número de centrales</i>	<i>Número de unidades</i>	<i>Potencia instalada (MW)</i>	<i>(%)</i>	<i>Generación media (GWh)</i>	<i>(%)</i>
CFE	13	30	21.7	28.4	70.3	32
LyFC	9	14	11	14.4	32	14.4
Independientes	61	77	43.5	57	118	53.5
TOTAL	83	121	76.3	100	220.2	100

Fuente: Estudio de la situación actual de la minihidráulica nacional y potencial en una región de los estados de Veracruz y Puebla, CONAE, 1997.

Estos datos muestran claramente que en nuestro país la producción minihidroeléctrica se encuentra predominantemente a cargo del sector privado. Según información de la Secretaría de Energía se espera que para el año 2010 se cuente con 225 MW instalados y 972 GWh de generación, considerando un crecimiento anual de 6% a partir del año 2003 y un factor de planta de 49%. Los costos de instalación dependen fundamentalmente de las características físicas del sitio donde se realice el proyecto. De acuerdo con datos de la Secretaría de Energía, el rango de valores para una inversión es de 800 a 60,000 dólares por KW instalado, con costos de generación de 3 a 45 centavos de dólar por KWh.

### 2.1.2 ENERGÍA EÓLICA.

Aunque el potencial eólico del país no ha sido evaluado con precisión, las mediciones puntuales o de pequeñas redes anemométricas, efectuadas principalmente por el IIE, estiman un potencial superior a los 5,000 MW disponibles en zonas identificadas: sur del Istmo de Tehuantepec (2,000 a 3,000 MW); las penínsulas de Baja California y Yucatán; la región central del altiplano y las costas del país. Dicho potencial equivale al 14% de la capacidad total de generación eléctrica instalada actualmente, aunque ahora posee mejores posibilidades de desarrollo, debido a la disminución de costos que han llegado a ser casi competitivos con los de generación de energía a través de fuentes convencionales y por las modificaciones a la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica y su Reglamento. En México se ha logrado un progreso importante con respecto a la generación de electricidad a partir de la fuerza del viento. Los avances en el desarrollo de esta tecnología en nuestro país incluyen:

- La instalación por parte de CFE de la central eólica Guerrero Negro, ubicada en la península de Baja California Sur, y cuya capacidad es de 0.60 MW.

- La instalación de una máquina de 0.55 MW por la empresa Cementos Apasco en Ramos Arizpe, Coahuila.
- La construcción de una central de 1.6 MW de capacidad en La Venta, Oaxaca, que entró en operación a mediados de 1994. Dicha central está formada por 7 aerogeneradores Vestas (Daneses) de 225 KW cada uno. Está construida en un lugar donde el IIE realizó mediciones desde 1984 y ubicó el sitio como uno de los más ventosos en el Sur del Istmo de Tehuantepec. Presenta factores de planta anuales del orden del 60%, cuando la media en Dinamarca y California es del orden del 25%. Esta minicentral representa la primera experiencia para CFE de la interconexión de eoloeléctricas al sistema eléctrico interconectado.
- Existe registro de poco más de 3 MW instalados en pequeños generadores y aerobombas<sup>11</sup> de agua, que en el año 2000 generaron cerca de 10.5 GWh.

Además de estas instalaciones para el año 2010 se espera contar con 187 MW eólicos instalados, que representarán 608 GWh de generación eléctrica.

Actualmente los costos típicos de inversión en instalaciones eólicas son aproximadamente de 1,000 dólares por KW instalado y los costos de generación entre 5 y 11 centavos de dólar por KWh, con múltiples beneficios económicos y ambientales.

### **2.1.3 LA BIOMASA.**

En México existe un amplio potencial de aprovechamiento de los distintos tipos de biomasa. Las comunidades rurales aisladas del país, satisfacen a partir de la biomasa la mayor parte de sus necesidades energéticas. De acuerdo con algunas estimaciones, la leña proporciona cerca del 75% de la energía que se consume en hogares rurales.

Adicionalmente, en nuestro país se ha empezado a centrar la atención en el potencial que ofrece el aprovechamiento de residuos, sobre todo urbanos, considerando las cantidades que se manejan en las grandes ciudades. Estos residuos y los desechos de animales, desde hace tiempo se han venido utilizando en instalaciones a nivel de prototipo en el Instituto de

---

<sup>11</sup> Las aerobombas son sistemas eólicos para bombeo de agua que se utilizan en algunos estados de la República tales como Chihuahua y Sonora, y que son muy útiles en localidades rurales aisladas de la red de suministro, o cuyas condiciones geográficas impiden la electrificación convencional.

Investigaciones Eléctricas y en el Instituto de Ingeniería de la UNAM. Por su parte, la CONAE ha desarrollado diversos estudios para evaluar el potencial de aprovechamiento de este recurso, entre los que se encuentra la caracterización del biogás producido por residuos sólidos urbanos. En el sector agroindustrial, concretamente en la industria de la caña de azúcar, se ha establecido un potencial de generación de electricidad, a partir de bagazo de caña, superior a los 3,000 GWh al año.<sup>12</sup>

De acuerdo con estudios realizados por el IIE, la producción de residuos sólidos municipales en el país es de 90,000 toneladas diarias, con lo que se podría conseguir una capacidad de generación aproximada de 150 MW.

La CRE, por su parte, concedió desde 2001 dos permisos para la explotación de biogás de rellenos sanitarios municipales con fines de generación eléctrica, lo que representa 11 MW de capacidad instalados y una generación potencial de 54 GWh. Adicionalmente, se cuenta con 22 permisos autorizados para generar electricidad en sistemas híbridos, combustóleo-bagazo de caña, con una capacidad total de 201 MW y 350 GWh de generación.

Los costos de inversión en proyectos con esta tecnología se encuentran en un rango de 630 a 1,170 dólares por KW instalado, con lo que la electricidad producida tiene un costo de 4 a 6 centavos de dólar por KWh generado.

#### **2.1.4 ENERGÍA SOLAR.**

El potencial de explotación de energía solar en México es uno de los más altos del mundo, cerca de tres cuartas partes del territorio nacional son regiones con una insolación media del orden de los 5 KWh/m<sup>2</sup> al día, esto es, el doble del promedio en los Estados Unidos. Esto quiere decir que con un sistema de captación y transformación de energía solar en electricidad que tuviera una eficiencia del 100% bastaría un metro cuadrado para suministrar energía eléctrica a un hogar mexicano promedio que consume 150 KWh por mes.

Según informa la CONAE, en México se fabrican calentadores solares planos desde hace más de cincuenta años y en la actualidad existen cerca de 50 fabricantes registrados de estos equipos. Para 1999, se contaba en el país con 328,000 m<sup>2</sup> de este tipo de sistemas, la mayor parte de ellos instalados en la Ciudad de México, Guadalajara, Cuernavaca y Morelia.

---

<sup>12</sup> El Instituto de Investigaciones Eléctricas ha estimado un potencial superior a 1,000 MW provenientes del uso de biomasa de la industria cañera.

Por otra parte, la utilización de sistemas fotovoltaicos ofrece oportunidades para la electrificación de zonas aisladas, así como para el soporte de la red en regiones con fuerte demanda, como el noroeste del país.

En nuestro país, los primeros en desarrollar la tecnología de generación de electricidad a partir de celdas fotovoltaicas, fueron investigadores del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV). Dichos científicos desarrollaron una pequeña planta piloto con una capacidad de producción de fotoceldas que consiguió suministrar electricidad a un número importante de aulas dentro del sistema nacional de telesecundarias en la década de los setenta.

Al día de hoy se tienen instalados entre 10 y 15 MW en sistemas fotovoltaicos dispersos, aplicados en la iluminación doméstica, telefonía rural, bombeo de agua y telecomunicaciones. La capacidad instalada de estos sistemas aumentó de 7.1 MW en 1993 a 13 MW en el año 2000. El IIE se ocupa en un proyecto sobre sistemas fotovoltaicos conectados a red, con el propósito de estudiar la factibilidad de disminuir la demanda de los sectores residencial y comercial en el noroeste del país.

Por su parte, la CFE cuenta con una planta híbrida -llamada así porque combina el uso de combustibles fósiles y fuentes alternativas de energía- en San Juanico, Baja California Sur, que consta de 17 KW fotovoltaicos, 10 KW eólicos y un motogenerador diesel de 80 KW.<sup>13</sup> Asimismo, dicho organismo pretende llevar a cabo la instalación de una central híbrida Ciclo Combinado-Termosolar (combina el empleo de gas natural y energía solar) al norte del país.<sup>14</sup> La CONAE estima que para el año 2010 se cuente con 24 MW instalados y 13 GWh de generación, con base en un crecimiento anual de 6% en la instalación de los sistemas, y un factor de planta de 25%.

En la actualidad se cuenta con estudios experimentales, en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, para la generación de energía eléctrica a partir de

---

<sup>13</sup> Para este proyecto CFE recibió la asistencia técnica y económica de Arizona Public Service y el Departamento de Energía de los Estados Unidos de Norteamérica. Inició operaciones en marzo de 1999, su vida útil es de 20 años, y pretende evitar una emisión de 39,000 toneladas de CO<sub>2</sub>.

<sup>14</sup> Esta central se instalará en el estado de Sonora. Cuenta con el apoyo del Banco Mundial, The Global Environmental Facility y el Gobierno Federal. Se proyecta que entre en operación para el año 2006, con una capacidad total de 245 MW, de los cuales 220 MW corresponden al ciclo combinado y sólo 25 MW a la energía solar. La vida útil del proyecto es de 25 años, lo que equivale a evitar la emisión de 642, 000 toneladas de CO<sub>2</sub>.

tecnología termosolar. Esta opción ofrece amplias perspectivas de aplicación, principalmente en la región noroeste del país.

Los costos de generación e inversión para las diferentes tecnologías y aplicaciones son distintos. En general, resultan elevados en comparación con las tecnologías convencionales. Los costos para sistemas fotovoltaicos, según la SENER, se encuentran en un orden de 3,500 a 7,000 dólares por KW instalado y de 25 a 1,560 centavos de dólar por KWh generado. Para los sistemas fototérmicos los costos se estiman en un rango de 2,000 a 4,000 dólares por KW y de 10 a 25 centavos de dólar por KWh.

### **2.1.5 ENERGÍA GEOTÉRMICA.**

Después de las grandes hidroeléctricas, la geotermia es la segunda fuente importante de energía renovable en nuestro país, con una capacidad instalada al año 2000 de 860 MW. Se ha calculado, según estudios de CFE, un potencial geotérmico susceptible de ser desarrollado de alrededor de 12,000 MW. En el contexto internacional es importante mencionar que México ocupó en 1999 el tercer lugar a nivel mundial en generación de electricidad a través de fuentes geotérmicas (5,623 GWh) y que su potencial geotérmico probado es 14 veces mayor. La región con mayor potencial para el desarrollo de este recurso es el cinturón volcánico que comprende la Sierra de Chihuahua y algunas regiones de la península de Baja California.

Aunque el uso de este recurso presenta el inconveniente de que desprende residuos de sulfuro de hidrógeno gaseoso, cuando el fluido caliente es extraído de debajo de la superficie terrestre, el impacto ambiental que se produce es mucho menor al de una planta térmica convencional, que opera con combustóleo.

A pesar de que se tiene la certeza de que nuestro país cuenta con un potencial muy importante en materia de recursos renovables, en el Programa Sectorial de Energía, el gobierno federal ha reconocido el retraso que existe con respecto al aprovechamiento de dichas fuentes energéticas y subraya la importancia de ampliar su participación en el suministro nacional de electricidad.

Por otro lado, el Programa Energético-Ambiental SENER-SEMARNAT 2002 señala que dicho sector se ha dado a la tarea de crear una serie de políticas y medidas destinadas a promover

el desarrollo de energías renovables a gran escala conectadas a la red, principalmente en materia de energía eólica que, por su desarrollo, puede competir con formas convencionales de generación eléctrica.

Como parte de tales estrategias, en años recientes, SENER, SEMARNAT y el IIE emprendieron el desarrollo de un Sistema de Información Geográfica sobre Energías Renovables. A su vez, la CONAE, inició el desarrollo de un Programa para la instalación masiva de Colectores Solares para Calentamiento de Agua de Uso Doméstico en el Sector Residencial de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Es importante que este tipo de acciones se lleven a cabo, para promover el desarrollo de tecnologías limpias, pero deberían llevarse a cabo no sólo en sectores residenciales, sino sobre todo en las regiones más marginadas de la Ciudad de México y el resto del país, que es precisamente donde más se necesitan. La implantación de este tipo de sistemas beneficiaría de modo substancial a los sectores más necesitados de la población, ya que al contar con suministro energético pueden, por ejemplo, realizar más fácilmente la preparación de sus alimentos así como la conservación de los mismos, además de acceder a una serie de servicios básicos, tales como los servicios de agua, salud e iluminación, necesarios para el mejoramiento de la calidad de vida. Estos sistemas les ofrecerían ventajas adicionales ya que, una vez instalados, el consumo energético es gratuito y el mantenimiento del equipo es prácticamente nulo, lo que se traduce en un beneficio económico.

Ya sea para proporcionar energía a regiones marginadas, o para satisfacer la demanda energética de las grandes ciudades, las energías renovables deben ser consideradas por aquellos que toman las decisiones a nivel nacional, regional y empresarial.

Para que esto suceda deben llevarse a cabo una serie de acciones, entre las que se encuentran:

- Impulsar la investigación y el desarrollo tecnológico nacionales.
- Adecuar y adoptar los avances tecnológicos internacionales en la materia.
- Promover la incorporación de dichos avances en el desarrollo futuro de los sistemas energéticos nacionales.
- Impulsar la educación -a todos los niveles de la sociedad- en materia de aprovechamiento de los recursos energéticos renovables y en la cultura de respeto al medio ambiente, para favorecer la formación de recursos humanos especializados en el



conocimiento de las energías renovables, con la participación de instituciones educativas y de investigación, organizaciones no gubernamentales, medios de comunicación, gobierno federal, gobiernos locales, etc.

- Desarrollar programas de difusión de los beneficios sociales, económicos y medio ambientales que la implantación de estas energías involucran.

De tal manera, se favorecerá la formación de personal capacitado en el diseño, instalación y mantenimiento de equipos para el aprovechamiento de las energías renovables, con lo que la tecnología local avanzará hacia el desarrollo sustentable.

## **2.2 LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN EL MUNDO.**

En el contexto internacional, el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía y la investigación científica en este sentido han registrado importantes niveles de crecimiento en años recientes. Esto se debe a varios factores, entre los que se pueden mencionar: la preocupación internacional con respecto del cambio climático global, el interés de algunos países por diversificar sus fuentes de energía con la finalidad de reducir su dependencia de importaciones energéticas y tecnológicas y conservar sus recursos no renovables, y la tendencia a la baja en los costos de implementación de estas tecnologías.

Frente a las circunstancias actuales, diversas instancias –incluidas la comunidad internacional, algunas naciones, el sector privado, las organizaciones no gubernamentales, universidades e institutos– han llevado a cabo acciones que buscan promover una mayor participación de las energías renovables como fuentes de energía primaria, lo que bien podría ser el inicio de una transición energética.

El interés que han despertado las energías renovables en años recientes queda de manifiesto en las políticas energéticas y ambientales de diversos países, orientadas hacia el cumplimiento de acuerdos internacionales en materia de cambio climático, lo que involucra la reestructuración del sector energético en dichas naciones. La renovación, por ejemplo, del sector eléctrico ha funcionado en diversos puntos del orbe como un marco regulador para fomentar el uso de fuentes renovables de energía en la generación de electricidad. La

diversificación de las fuentes de energía en la generación de electricidad<sup>15</sup> tiene especial importancia si se toma en cuenta que este sector es responsable del 37.5% de las emisiones globales de carbono.<sup>16</sup>

Una muestra de lo que se está haciendo en respuesta a esta situación, es el caso de Alemania y Dinamarca, en donde se han decretado leyes según las cuales se otorga una prima por cada KWh generado con energías renovables. En consecuencia, las instalaciones eólicas en Alemania, que en 1990 aportaban menos de 100 MW, aumentaron a 6,113 MW para fines del año 2000, mientras que en Dinamarca la producción de aerogeneradores se multiplicó por seis entre 1996 y 2001. De igual manera, en España se cuenta con un régimen especial para las energías renovables que establece el otorgamiento de primas a la electricidad generada a partir de estas fuentes. En el caso de España, la capacidad eólica instalada creció de 455 MW en 1997 a 1,495 MW en 1999, y para 2001 ya era de 2,900 MW (ver Tabla 2.2). Este tipo de estímulos forma parte de políticas nacionales de promoción de las energías renovables, como la Electricity Feed Law (EFL) de Alemania, y la Non Fossil Fuel Obligation (NFFO) del Reino Unido, que exige a las compañías eléctricas regionales a comprar electricidad procedente de fuentes renovables, que a su vez reciben un subsidio del Fossil Fuel Levy.

Igualmente en España, más concretamente, en la ciudad de Madrid, desde marzo de 2003 se aprobó una resolución que obliga a que todos los edificios nuevos –y los que sean reestructurados en su totalidad– incorporen colectores solares para el calentamiento de agua de uso sanitario.<sup>17</sup> Asimismo, el Consejo Superior de Deportes firmó un Acuerdo Marco de

---

<sup>15</sup> De acuerdo con datos de la Agencia Internacional de la Energía para 1998, la generación de electricidad a nivel mundial dependía 63.4% en carbón, petróleo y gas natural.

<sup>16</sup> En España, por ejemplo, conforme a los resultados del estudio "Impactos Ambientales de la Producción de Electricidad", elaborado por la empresa AUMA y auspiciado por ocho instituciones, el IDAE, el CIEMAT y la Asociación de Productores de Energías Renovables-APPA: el impacto ambiental provocado por la generación de electricidad a partir de energías convencionales es 31 veces superior al de las energías renovables. Dicho estudio analiza los impactos de ocho tecnologías de generación de electricidad: lignito, petróleo, carbón, energía nuclear, gas natural, energía eólica, minihidráulica y fotovoltaica, de las cuales las tres primeras resultaron las más contaminantes, en ese orden. Asimismo se analizaron impactos ambientales en doce grandes categorías, entre las que se encuentran: calentamiento global, disminución de capa de ozono, generación de residuos, agotamiento de recursos energéticos, etc.

<sup>17</sup> De acuerdo con esta disposición elaborada por el Ayuntamiento de Madrid, con la asistencia del IDAE, deberán incorporarse paneles solares térmicos para generar, por lo menos, del 60 al 75% de toda el agua caliente que consuman los edificios mencionados. En cuanto a este tipo de medidas Madrid tuvo un retraso de casi tres años respecto a Barcelona, en donde una resolución de este tipo es de obligado cumplimiento desde julio de 2000.

colaboración con el IDAE, para instalar tecnología solar térmica en sus centros deportivos de alto rendimiento de las ciudades de Madrid y Granada. Por su parte, Euskadi ha elaborado un Programa Marco Ambiental de Desarrollo Sostenible: el Programa Marco Ambiental de la Comunidad Autónoma del País Vasco. En este documento se fijan los lineamientos a seguir para evitar que continúe la degradación ambiental, entre los que resaltan la recuperación de suelos públicos contaminados o el aumento en el uso de las energías renovables, entre otros objetivos.

En Cuba cada metro cuadrado del territorio recibe diariamente 5 KWh de energía solar (el promedio en más de la mitad del territorio mexicano, según datos de la SENER). Esta cifra se mantiene prácticamente constante a lo largo de todo el año y en todo el país. Gracias a eso, cientos de escuelas y hospitales rurales de la isla cuentan con electricidad. Aunque más del 95% del territorio cubano está electrificado, en las zonas rurales y montañosas este porcentaje sólo alcanzaba el 80%, debido a las condiciones geográficas que dificultan la instalación de líneas eléctricas. La solución se ha encontrado en las energías renovables, principalmente en la solar fotovoltaica, como asegura el coordinador de la RedSolar de CubaSolar, sociedad fundada en 1994 para el desarrollo de las fuentes renovables de energía y el respeto al medio ambiente.<sup>18</sup> También este país ha desarrollado un programa para el aprovechamiento de las renovables. El corazón de este programa es el azúcar: la caña de azúcar –su principal cosecha de exportación– proporciona casi el 30% de la energía que se consume en Cuba. Después de que la caña es cosechada, el bagazo es empleado para accionar la planta procesadora en su totalidad. Posteriormente, *inyectan* la electricidad sobrante a la red general. Existen 156 molinos de azúcar en Cuba, cada uno de los cuales produce de 20 a 80 KWh por tonelada de bagazo. Incluso comprimen las partes de desecho de la planta, como las hojas y los tallos, para ser empleados como combustible sólido.

En Europa, gracias a las políticas de promoción de las renovables, también se aprovecha la energía de la biomasa, especialmente en los sistemas de electricidad y calefacción que utilizan como fuente de energía primaria desechos agrícolas y forestales.

Estos son sólo algunos casos particulares del avance que se ha tenido a nivel mundial en relación a las energías renovables. A continuación se ofrecen algunos datos adicionales al respecto:

---

<sup>18</sup> Esta sociedad fue galardonada por el PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) en el año 2001.

Tabla 2.2 Las energías renovables en datos y cifras	
<i>Solar</i>	
Porcentaje de crecimiento mundial en la producción de celdas fotovoltaicas en 1999	29%
Reducción en dólares del costo por watt instalado en sistemas fotovoltaicos entre 1973 y 2000	De 200 a 10
Watts que puede generar una celda fotovoltaica de un metro cuadrado	150
m <sup>2</sup> instalados de sistemas termosolares en el país en 2000	373,000
Porcentaje del crecimiento mundial anual de colectores solares planos para calentamiento de agua con energía solar desde 1993	14.8%
m <sup>2</sup> de colectores solares instalados en Alemania en 1998	470,000
m <sup>2</sup> de colectores solares instalados en México en 1998	32,400
<i>Eólica</i>	
Porcentaje de crecimiento mundial de la capacidad de generación eólica en los últimos tres años	30%
Capacidad mundial acumulada en generación eólica al año 2001	18,449 MW
Porcentaje de reducción de los costos de la tecnología para el aprovechamiento eólico entre 1992 y 1997	50%
Capacidad de generación eólica en EU en 2001	2,800 MW
Cantidad de turbinas eólicas instaladas en California en 1994	15,000
Capacidad de generación eólica en España en 2001	2,900 MW
Aportación de la energía eólica en la producción de electricidad en Navarra, España	23%
Aportación de la energía eólica en la producción de electricidad en México	2%
Potencial eoloelectrico técnicamente aprovechable en México	5,000 MW (equivalente a 14% de la capacidad total de generación eléctrica instalada actualmente)
<i>Minihidroeléctrica</i>	
Potencia mundial instalada en centrales hidroeléctricas en 2000	35,500 MW
Capacidad minihidroeléctrica de China	14,300 MW
Capacidad minihidroeléctrica de Japón	3,381 MW
Capacidad minihidroeléctrica de EU	3,019 MW
Capacidad minihidroeléctrica de Brasil	950 MW
Capacidad de generación de una caída de agua de 100 metros con un gasto de 3 metros cúbicos por segundo	3,000 KW (capacidad suficiente para electrificar 1,000 departamentos)
<i>Biomasa</i>	
Expectativa de crecimiento mundial de la generación con biomasa para el año 2020	30,000 MW

Fuente: CONAE.

A pesar de los avances registrados en los últimos años, es necesario, por razones que ya se han expuesto, continuar con el desarrollo de la tecnología que permita una transición hacia una base energética menos dependiente de combustibles fósiles, lo que significa menos intensiva en carbono y menos agresiva con la naturaleza.

En los capítulos siguientes se abordará el tema central de este trabajo: el conocimiento de la energía solar, los diferentes sistemas utilizados para su captación y transformación, y algunas de sus aplicaciones prácticas.

## CAPÍTULO 3. LA FUENTE SOLAR.

### 3.1 LA ENERGÍA SOLAR.

Con el propósito de aprovechar al máximo la energía que el Sol nos proporciona, debemos conocer sus características. Si bien el estudio de las tecnologías empleadas para captar y transformar la energía del Sol en otras formas de energía involucra distintas áreas del conocimiento, es conveniente comenzar precisamente por la comprensión de lo que constituye la fuente energética de nuestro interés.

El Sol es una enorme esfera de gases a elevadas temperaturas que por efecto gravitacional de su masa domina el sistema planetario que incluye a la Tierra. Se encuentra ubicado a una distancia media de 150 000 000 km con respecto a nuestro planeta. De acuerdo con algunos cálculos se estima que el diámetro del Sol es de 1 390 860 km, es decir, cerca de 109 veces mayor que el diámetro de la Tierra. El volumen del Sol supera en un millón de veces el de la Tierra, mientras que su masa es sólo 300 000 veces mayor, lo que indica que su densidad es mucho menor. El Sol ha brillado en el cielo desde hace unos cinco mil millones de años, y se calcula que todavía no ha llegado ni a la mitad de su existencia.

El globo solar gira sobre sí mismo, pero no lo hace como un cuerpo sólido, sino que se observa que su zona ecuatorial tiene un periodo de rotación de 25 días, mientras que el de las zonas polares es de 30 días. Por otra parte, el Sol presenta un movimiento propio, como la mayor parte de las estrellas, de 20 km/s hacia la dirección en que se encuentra la estrella Vega. Debido a que las mediciones de la temperatura del Sol se llevan a cabo a través de métodos indirectos, basados en diferentes modelos, no todas las estimaciones al respecto coinciden. Según algunos estudios la temperatura de la fotosfera, es decir, la superficie externa del Sol, es de 6 260 °C, mientras que su núcleo alcanza los diez millones de grados centígrados.

El Sol genera su energía por medio de reacciones nucleares que se producen de manera constante como resultado de la fusión de protones en el interior de su núcleo.<sup>19</sup> La generación

---

<sup>19</sup> En esta reacción dos átomos de hidrógeno se combinan, liberando energía, para formar un átomo de helio.

de energía proviene, por tanto, de la pérdida de masa del Sol, que se convierte en energía de acuerdo con la ecuación de Einstein,  $E = mc^2$ , donde E es la cantidad de energía liberada cuando desaparece la masa m; c es la velocidad de la luz.<sup>20</sup>

Como resultado de tales reacciones se originan continuos desprendimientos de calor que elevan la temperatura de la superficie solar. Parte de este calor es emitido al exterior como radiaciones.

El Sol, se compone de cierto número de capas concéntricas, aunque sólo es posible observar por medios ópticos, o registrarse con aparatos, la cubierta exterior o atmósfera solar. No es posible observar directamente las capas internas del Sol, pero se han calculado teóricamente algunos detalles de su estructura, cuya comprobación se ha podido efectuar por métodos indirectos. Entre las regiones del Sol se encuentran el núcleo, la zona de radiación, la zona de convección y la fotosfera.

El núcleo es la región comprendida dentro del 23% del radio solar a partir del centro. Esta zona corresponde a tan sólo el 15% del volumen, pero contiene el 40% de la masa y ahí se genera el 90% de la energía. La densidad de los gases presentes en esta región supera unas cien veces a la del agua en condiciones normales. Alrededor del núcleo se presenta la zona de radiación, en donde la propagación del calor se realiza principalmente por radiación electromagnética. Esta región abarca del 23 al 70% del radio del Sol, a partir del centro. Aquí la densidad de los gases es semejante a la del agua y la temperatura es menor a la del centro solar: unos 2.5 millones de grados centígrados. Esta zona radiante se mantiene mientras la materia solar está totalmente ionizada, pero a medida que aumenta la distancia del centro los átomos comienzan a estar sólo parcialmente ionizados. De tal manera aparece una zona en la que la propagación del calor se realiza esencialmente por convección. Esta región va del 70 al 100% del radio solar, su temperatura es ligeramente menor a la de la zona anterior (2 millones de grados centígrados) y su densidad es 10 veces menor a la del agua. En las capas exteriores de la región convectiva la densidad de materia disminuye. Dichas capas constituyen lo que se considera como la atmósfera solar.

Es evidente que, como todo el Sol se encuentra en forma gaseosa, desde el núcleo hasta las regiones más externas, no existe una superficie física claramente definida, como en nuestro

---

<sup>20</sup> Se estima que el Sol emite actualmente unos  $3.8 \times 10^{23}$  KW, como resultado de la conversión de masa en energía, esto es: unos 4.7 millones de toneladas por segundo.

planeta. Sin embargo se hace esta distinción en función de las características que presenta cada región.

La atmósfera solar se divide en tres capas: la fotosfera, la cromosfera y la corona. La fotosfera es considerada como la superficie del Sol, debido a que es una región opaca,<sup>21</sup> de donde se emite la mayor parte de la radiación solar hacia el espacio. Su profundidad es de tan sólo 350 km, lo que representa menos de una milésima del radio solar. Por ser opaca, la fotosfera impide la observación del interior del Sol. La cromosfera es una franja luminosa de color rosado y de aspecto dentado que se puede observar durante los eclipses totales del Sol. Su espesor aparente es de unos 8 000 km. La corona solar es una aureola blanca que rodea a la cromosfera, irregular, sin límites definidos y que se extiende hasta una distancia de 3 millones de kilómetros, aproximadamente. De manera semejante a lo que ocurre con la atmósfera de la Tierra, la corona es cada vez más tenue a medida que aumenta la distancia con respecto del núcleo solar, hasta confundirse con el vacío que existe en el espacio interestelar. Aunque físicamente no existe discontinuidad entre estas tres regiones, se diferencian claramente en sus propiedades ópticas, lo que como consecuencia implica métodos de observación distintos para cada una de ellas.

### **3.2 LA RADIACIÓN.**

La emisión del calor del Sol se produce por efecto del fenómeno físico conocido como radiación, que consiste en transmitir energía en forma de ondas electromagnéticas que se desplazan por el espacio en todas direcciones. De hecho, cualquier cuerpo que se halle a una temperatura distinta del cero absoluto emite energía en forma de radiación, razón por la cual, en ocasiones, a la radiación térmica se le denomina también *radiación de temperatura*. De esta manera, la Tierra recibe los efectos de las ondas térmicas emitidas por el Sol. Estas ondas electromagnéticas son los rayos solares que se transmiten por un movimiento ondulatorio a través del espacio. Aunque la naturaleza de las ondas electromagnéticas es siempre la misma, éstas difieren en su longitud de onda.

---

<sup>21</sup> Opaco, en óptica, significa que impide el paso de la radiación. En este sentido, un espejo es opaco; una fuente luminosa puede ser opaca. Así, una lámpara de neón, emite luz desde su superficie, pero no podemos ver su interior debido a que es opaca. Por lo tanto, el significado de la palabra, en este contexto, es diferente del que se le da en el lenguaje común. En este caso, lo opuesto a opaco es transparente.



Así, la radiación del Sol se separa en el espacio en una gran variedad de longitudes de onda, que incluyen desde las ondas de radio hasta los rayos gamma. Sin embargo, para los fines del aprovechamiento de la energía solar, sólo es importante la radiación térmica, constituida por las fracciones que se describen de manera breve a continuación.

### **3.3 DISTRIBUCIÓN DE LOS RAYOS SOLARES.**

A partir del estudio de la distribución de la radiación solar en diferentes longitudes de onda se ha determinado que alrededor de la mitad de la energía total emitida por el Sol se encuentra en el intervalo de longitudes de onda que son perceptibles por el ojo humano. Dicha fracción constituye la banda radiante visible, cuyos componentes forman la luz visible o rayos luminosos.

El resto de los rayos solares es invisible. La mayor parte de éstos se sitúan por encima de la banda visible: son los rayos infrarrojos o caloríficos, llamados así por su alto poder energético. Presentan una longitud de onda relativamente grande y ofrecen fenómenos de difracción muy interesantes.

Existe también una pequeña fracción de rayos que se halla por debajo de la banda visible y que reciben el nombre de rayos ultravioleta.

La relación entre los distintos tipos de rayos emitidos por el Sol (considerando únicamente aquéllos que componen la radiación térmica) es la siguiente:

- Los rayos de luz visible constituyen cerca del 47% de la radiación total.
- Los rayos infrarrojos, el 46%.
- Y los rayos ultravioleta, el 7% restante.

### **3.4 LA CONSTANTE SOLAR.**

Entre los factores que determinan el flujo luminoso que incide sobre nuestro planeta se encuentran: la distancia Tierra-Sol y la relación geométrica entre estos cuerpos.

Mucho se ha discutido acerca de si el Sol emite un flujo de energía constante, o se trata de un flujo variable. De acuerdo con algunos estudios, la variación del flujo energético proveniente del Sol es menor al 1% a lo largo de un ciclo solar, que tiene una duración de 22 años, aunque

no se conoce con certeza el origen de estas variaciones. No obstante, para aplicaciones en el campo de la ingeniería, la cantidad de energía emitida por el Sol puede considerarse constante. En realidad, la disponibilidad de este recurso a nivel de la superficie terrestre está mucho más ligada a la diversidad de fenómenos físicos y químicos que se verifican en la atmósfera que a las variaciones solares.

La radiación emitida por el Sol junto con sus circunstancias geométricas respecto de nuestro planeta dan como consecuencia que sobre la atmósfera terrestre incida una cantidad de energía prácticamente constante, lo que ha conducido a la definición de la llamada constante solar: el flujo de energía procedente del Sol que incide cada segundo sobre una superficie perpendicular a la dirección de los rayos solares, situada a la distancia media Tierra-Sol (que es igual a  $1.5 \times 10^{11}$  m), medido fuera de la atmósfera terrestre, es conocido como constante solar,  $G_{sc}$ .

Dado que se trata de un *flux* de energía,<sup>22</sup> la constante solar se expresa en unidades de energía, tiempo y área, es decir en:  $J/s \cdot m^2$ , o bien  $W/m^2$ .

Para comprender mejor, en seguida se aclaran algunos puntos de este concepto. En primer lugar se trata de un flux de energía, esto significa que la constante solar se refiere a una cantidad de energía que incide instantáneamente sobre una superficie de área unitaria. Segundo, esta superficie hipotética es perpendicular o normal a la dirección de propagación de la luz. Es claro que una superficie en posición oblicua respecto de la dirección de los rayos solares recibirá un menor flux de energía. En tercer lugar, la superficie hipotética se encuentra situada a la distancia media de la Tierra al Sol. Como todos sabemos, la intensidad de la radiación solar es mucho mayor en Mercurio que en la Tierra, y que en nuestro planeta es mucho mayor que en Plutón. Como la órbita que describe la Tierra alrededor del Sol no es circular sino elíptica, la distancia Tierra-Sol no es constante, por lo que debe considerarse un valor promedio para poder hablar de una constante. Finalmente, dado que se trata de un flux de energía constante, la superficie hipotética debe estar situada fuera de la atmósfera terrestre, para evitar la atenuación de la radiación ocasionada por las condiciones meteorológicas que se presentan en la atmósfera.

Aunque en los últimos años ha variado el valor comúnmente aceptado para  $G_{sc}$ , esto se debe a las técnicas de medición empleadas y no al hecho de que haya variado la magnitud de la

---

<sup>22</sup> Flux = flujo/área. Si hablamos de energía: flujo de energía = energía/tiempo. Por lo tanto, cuando se mencione el término *flux*, esto significa: flux de energía = energía/(tiempo x área).

energía que nuestro planeta recibe del Sol. Por lo general se considera un valor aproximado de:

$$G_{SC} = 1\,370 \text{ W/m}^2$$

Tal flux de energía, sin embargo, es percibido en la superficie terrestre con menor intensidad, debido que sufre ciertas alteraciones como consecuencia de la variedad de fenómenos meteorológicos que ocurren en la atmósfera. La energía capturada por el sistema terrestre es, en promedio, igual a  $342 \text{ W/m}^2$ .

Parte de esta energía es absorbida y dispersada en la atmósfera por moléculas de distintos gases que se encuentran presentes en ella, así como por las nubes. La fracción de la radiación solar que no es absorbida en la atmósfera, reflejada por las nubes o dispersada de nuevo hacia el espacio, alcanza la superficie terrestre, en donde una parte es reflejada y el resto absorbida. La fracción absorbida calienta la superficie y posteriormente es emitida como radiación infrarroja a la atmósfera. A su vez, esta energía emitida por la superficie caliente es absorbida esencialmente por vapor de agua y dióxido de carbono, los cuales son tan abundantes en la atmósfera que pueden capturar una gran parte de la energía en las regiones más bajas de la misma. Estos fenómenos constituyen lo que podría denominarse como *radiación terrestre o atmosférica*.

Para el propósito de emplear la luz solar como una fuente de energía, es necesario tener un mejor conocimiento de todos estos efectos, ya que ellos influyen de manera decisiva en la disponibilidad de la misma a nivel de la superficie terrestre.

### **3.5 RADIACIÓN ATMOSFÉRICA.**

El Sol es nuestra fuente natural de calor y por lo tanto cualquier superficie que reciba la influencia directa de sus rayos aumentará su temperatura original como consecuencia de ello. El hecho de que existan diferencias considerables en la acción solar durante el verano y el invierno, se debe primordialmente a que los rayos solares, al incidir sobre la superficie terrestre, se desvían más o menos en su inclinación, de la perpendicularidad ideal. Cuanto más se aproximen a esa perpendicularidad mayor será su acción térmica.

Ahora, si se toman en cuenta las transformaciones que sufre la radiación solar al incidir sobre la atmósfera y atravesarla, es decir, desde un punto de vista meteorológico, cabe distinguir los siguientes tipos de rayos:

- Rayos solares directos: son aquéllos recibidos directamente del Sol, sin sufrir ninguna dispersión atmosférica por efecto de las nubes, niebla, polvo, u otros agentes presentes en la atmósfera. Un ejemplo de este tipo de rayos es la radiación extraterrestre, que es aquélla que incide sobre la atmósfera y que determina la constante solar. Este tipo de rayos corresponde a la fracción de luz solar que proviene directamente del Sol, y que incide sobre un plano perpendicular a la dirección de la misma.
- Rayos difusos: son los que se reciben del Sol después de ser desviados por dispersión atmosférica. Presentan una radiación más débil, aunque también son térmicamente aprovechables. Este tipo de radiación es originada por la incidencia de los rayos solares sobre partículas de muy variada especie y origen que flotan en el aire, tales como moléculas gaseosas, gotas de agua, bióxido de carbono, polvo, etc., que ocasionan una dispersión capaz de alterar la radiación original. De hecho, este fenómeno de dispersión de los rayos solares es el que produce el característico color azul del cielo. Un ejemplo de esta radiación es la que se recibe a través de las nubes, que pueden llegar a disipar hasta el 80% de la radiación solar que incide sobre ellas. Como se verá más adelante, la radiación difusa no puede ser utilizada por algunos de los sistemas diseñados para el aprovechamiento de la energía solar. Tal es el caso de los dispositivos fotovoltaicos y de los colectores concentradores, con excepción de los concentradores fijos o semifijos.
- Rayos reflejados: son aquellos rayos, provenientes de la radiación directa o difusa, que se reflejan como resultado de su incidencia sobre la superficie terrestre.
- Radiación global: es la suma de las radiaciones solares directa, difusa y reflejada que inciden sobre una superficie. Conocer el valor exacto de la radiación global es de gran importancia para efectuar el cálculo de la cantidad de energía disponible en cada lugar.

Precisamente con ese propósito, es necesario considerar, además de los efectos atmosféricos sobre la radiación del Sol, otros factores tales como la ubicación geográfica del sitio en que se desea aprovecharla. Dichos elementos, determinan el valor de la radiación global en un punto dado, es decir, determinan la intensidad de la radiación y el grado de soleamiento de tal lugar.

Mientras que la intensidad de la radiación se refiere al flux de energía, expresado en  $W/m^2$ , la insolación o soleamiento es el número de horas diarias que una región determinada se encuentra expuesta a los rayos del Sol.

La medición de estos parámetros se lleva a cabo en estaciones meteorológicas que cuentan con dispositivos especiales para dicho propósito. Dichos aparatos consisten en instrumentos que miden directamente la radiación solar, y son conectados a aparatos registradores (sistemas de cómputo) que generan gráficos a partir de los datos obtenidos. Un ejemplo de este tipo de instrumentos es el piranómetro, que se utiliza para medir la irradiancia solar global, o el pirheliómetro, que mide la irradiancia solar normal directa, es decir, la que incide de forma normal en dicho dispositivo, en todo momento. Dicho dispositivo requiere de un sistema de seguimiento solar para realizar tales mediciones. En todo caso, los datos de radiación son la mejor fuente de información para conocer la disponibilidad de este recurso. No obstante, existen métodos para calcular teóricamente estos valores a partir de las horas de insolación, porcentaje de posible insolación o nubosidad.

Asimismo, se han desarrollado cartas solares que sirven para determinar la posición del Sol en el cielo a diferentes tiempos a lo largo del año, con lo que se puede estimar teóricamente la cantidad de energía recibida en cada sitio.

Los procedimientos teóricos o prácticos empleados para calcular la cantidad de energía o radiación incidente sobre un sitio o sobre un equipo solar determinado no serán tratados en el presente trabajo, por lo que se sugiere consultar literatura especializada en la que además pueden encontrarse gráficos, tablas y mapas que reportan los valores de radiación y soleamiento para diferentes localidades en función de su latitud y longitud.

En Almanza *et al.* (2003)<sup>23</sup> se presenta una explicación detallada de aspectos relacionados con la evaluación de irradiaciones, entre los que se incluyen ecuaciones y modelos que permiten obtener datos teóricos, tanto para días despejados como para diversos tipos de condiciones atmosféricas, además de que se indica cual de los modelos resulta más apropiado para México. Asimismo, se ofrecen algunos mapas de irradiación solar global diaria promedio mensual y anual en la República Mexicana.

Adicionalmente, en dicho texto se proporcionan algunas otras referencias bibliográficas sobre temas relacionados que pueden consultarse si se desea mayor información al respecto.

---

<sup>23</sup> Almanza, R. et al. «Ingeniería de la Energía Solar II». México, D.F., Instituto de Ingeniería, UNAM, 2003.

## **CAPÍTULO 4. CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR.**

### **4.1 INTRODUCCIÓN.**

El propósito de este capítulo es describir los diferentes equipos empleados para el aprovechamiento de la energía solar.

Como ya se expuso anteriormente, el Sol parece ser el único que puede proporcionar a la humanidad una fuente de energía prácticamente ilimitada. Es por eso y por muchas otras razones, igualmente ya mencionadas, que es indispensable convertir en realidad su utilización popular en un futuro no muy lejano.

Lo primero que se debe hacer para aprovechar de manera adecuada este recurso es captar la energía proveniente del Sol que incide sobre un punto determinado de la superficie terrestre, para posteriormente distribuirla convenientemente transformada a los sitios en que será consumida finalmente.

Como se sabe, en días despejados e iluminados, el Sol calienta aquellos lugares sobre los que sus rayos inciden de forma directa, es decir: las paredes externas de una casa, el tejado, las copas de los árboles, los embalses de agua (lagos, lagunas, charcos, etc.), el terreno circundante y demás superficies expuestas, pero si ese calor emitido por el Sol es capturado de manera apropiada y transportado a donde se requiera su utilización, en lugar de calentar el agua de un estanque, la radiación solar puede llevar a cabo el mismo trabajo con el agua que se emplea para satisfacer las necesidades del hogar, sustituyendo así los procedimientos convencionales utilizados para cumplir con este propósito, tales como el empleo de calentadores de gas o el uso de leña.

Si bien la transformación de los rayos solares en calor útil para satisfacer las necesidades de una vivienda -ya sea calentando agua para los servicios sanitarios y la cocina, o aire para el acondicionamiento de interiores- es una de las aplicaciones de la energía solar más conocidas y utilizadas, no es el único beneficio que podemos obtener a partir de la explotación de este recurso. La energía solar tiene una amplia variedad de aplicaciones. Igualmente en forma de calor, puede aprovecharse mediante la construcción de hornos solares para uso doméstico o

industrial (por medio de espejos concentradores) o cocinas solares que pueden colocarse en el patio, la terraza o azotea de una casa, y que eliminarán el uso de combustibles. También se puede mencionar su uso en la destilación de agua de mar para producir agua potable, en el secado de cosechas e incluso para procesos de refrigeración. Una aplicación muy distinta de la radiación solar es en la generación de electricidad, mediante los llamados *sistemas fotovoltaicos*, que se describirán más adelante.

Así, a partir de la captación y conversión directas de la radiación solar se pueden obtener básicamente dos formas de energía útiles: calor y electricidad.

El calor se obtiene a través de dispositivos conocidos como *colectores solares*, y la electricidad, mediante *colectores fotovoltaicos*. Ambos procesos nada tienen que ver entre sí, ya que los principios de operación y características generales de los dispositivos empleados para efectuar cada uno de ellos son completamente diferentes.

Los mecanismos por los que se llevan a cabo estas transformaciones de la energía radiante del Sol, se explicarán a continuación.

#### **4.2 CONVERSIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR EN ENERGÍA TÉRMICA.**

Esto se realiza por medio de equipos que transforman directamente en calor la luz solar, en especial su componente infrarroja, la cual tiene un alto poder energético y alcanza cerca de la mitad del contenido total de las radiaciones solares. La captación de la energía se efectúa mediante un material absorbente que se somete de manera continua a la acción de los rayos solares y se calienta como consecuencia de ello. Dicho material es una superficie metálica, debido a que se calienta fácilmente por exposición a la luz solar. Posteriormente, el calor absorbido por la placa metálica es transferido a un fluido (agua o aire) para ser transportado hasta otro sitio, en donde será aprovechado en algún servicio útil, ya que generalmente no suele utilizarse en el lugar exacto en que se encuentra instalado el colector.

Antes de pasar a la descripción detallada de los sistemas empleados para la conversión térmica de la energía solar, es necesario explicar lo que se conoce como el *efecto invernadero*.<sup>24</sup>

---

<sup>24</sup> Aunque el principio es semejante, en este caso el "efecto invernadero" al que se refiere este texto no es aquel fenómeno que se presenta en la atmósfera terrestre.

### 4.3 EL EFECTO INVERNADERO.

Se ha establecido entonces que la base fundamental de los sistemas empleados para la conversión de la energía solar en energía térmica aprovechable es el colector solar. Estos equipos básicamente consisten en la aplicación práctica del efecto invernadero, que es aquel que aprovechan los invernaderos instalados en el campo o en los jardines para el cultivo de plantas delicadas que requieren de temperaturas especiales o distintas a la del exterior durante el invierno.

Independientemente de sus dimensiones, un invernadero consiste en un espacio cerrado para crear un ambiente aislado del exterior, con paredes y tejado de cristal. A través de los cristales pasan los rayos solares al interior de la estancia, proporcionando calor a ese espacio. De tal manera los cristales asumen una doble función:

- Por un lado permiten que la luz del Sol entre en el invernadero, calentando su interior en lugar de calentar la superficie externa de las paredes y el tejado, como ocurre habitualmente en construcciones cuya estructura no está constituida por cristales.
- Y por otra parte, el sistema a base de cristales evita que se origine el fenómeno opuesto, es decir, la radiación de adentro hacia fuera, lo que significaría pérdidas de calor, sobre todo cuando el Sol se haya ocultado y llegue la noche.

Así, el efecto invernadero consiste en aumentar la temperatura en el interior de un recinto mediante el empleo de cristales que admiten el paso de los rayos solares, sin permitir la radiación al exterior. Es obvio que para asegurar el buen funcionamiento de este tipo de construcciones es necesario aislar adecuadamente todas las uniones para evitar posibles fugas del calor acumulado.

La acción de los cristales se puede explicar al observar que cualquier cuerpo expuesto a la radiación solar, se comporta de alguna de las formas siguientes:

- Reflejará los rayos del Sol.
- Los dejará pasar a través de sí.
- Los absorberá en forma de calor, lo que en consecuencia aumentará su temperatura.



Los cristales entonces tienen la propiedad de permitir el paso de los rayos luminosos, que en el momento de penetrar en el invernadero (o recinto de que se trate), se transforman en rayos térmicos, debido a que cambian de longitud de onda. En otras palabras, esto significa que de la longitud de onda original, perteneciente al rango visible del espectro solar, pasan a otra que corresponde a la banda de los infrarrojos. Ante éstos, las placas de vidrio se comportan como un material aislante, ya que impiden su regreso al exterior, de manera que el calor absorbido queda atrapado en el interior del invernadero. El efecto invernadero queda representado en la figura que se muestra a continuación:

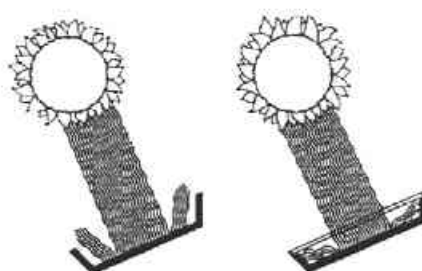


Figura 4.1. A la izquierda se muestra un colector abierto: parte de la radiación incidente es reflejada hacia la atmósfera. A la derecha, colector cerrado con un vidrio (principio de invernadero): la radiación es retenida dentro del panel.

#### 4.4 EL ORIGEN DEL COLECTOR.

Ahora, si se recubren o pintan con un material opaco de color negro –o gris muy oscuro– todas aquellas superficies interiores del invernadero que no estén constituidas por cristales, el calor será absorbido, y las continuas aportaciones caloríficas se acumularán sobre tales superficies, para después transferirse al aire que ocupa el espacio cerrado.

Para comprender mejor lo anterior tal vez sea necesario detenerse por un instante en el concepto de color. Se sabe que un cuerpo se percibe como negro porque refleja muy poca de la luz visible (para el ser humano) que incide sobre él.<sup>25</sup> Considerando que gran parte de la radiación solar corresponde al intervalo de longitudes de onda que constituyen el espectro

---

<sup>25</sup> Desde el punto de vista científico, se considera cuerpo negro aquel que absorbe toda la radiación incidente sobre él, independientemente de la longitud de onda de que se trate. Si bien ningún material conocido tiene esta característica, hay algunos que se acercan a ella a ciertas longitudes de onda.

visible, puede decirse entonces que los materiales de color negro son excelentes absorbedores de la radiación solar y, por consiguiente, formarán parte fundamental de los colectores solares.

Si además de *ennegrecer* las superficies citadas, se reducen las dimensiones del recinto, al tiempo que se acorta la distancia entre las superficies acristalada y absorbente, disminuye el volumen del aire contenido en éste, facilitando su calentamiento.

De tal manera, se ha trazado el esquema de lo que podría denominarse una caja-invernadero prototipo, que constituye la base del colector solar plano, componente clave en un equipo de captación de la energía solar para fines de generación de calor.

#### **4.5 EQUIPOS PARA EL APROVECHAMIENTO TÉRMICO DE LA RADIACIÓN SOLAR.**

Si un objeto cualquiera es expuesto a la radiación solar, su temperatura aumentará hasta llegar un momento en el que se establece un equilibrio entre la rapidez con la que absorbe calor y la rapidez con la que lo pierde. Las pérdidas de calor resultan de la emisión de radiación por parte del material calentado, del movimiento del aire circundante (más frío que el objeto en cuestión), y de la conductividad térmica de los cuerpos adyacentes a él. Por su parte, las ganancias dependen de la intensidad de la radiación solar y de la capacidad del material para absorber dicha radiación.

De manera general, los rayos solares pueden ser capturados para producir temperaturas aprovechables por medio de dos métodos:

- Colocando una cubierta transparente, ya sea de vidrio o de plástico, por encima de la superficie receptora.
- O concentrando la radiación solar que incide sobre una superficie extensa en un receptor de área pequeña.

De esta forma, los colectores solares pueden ser clasificados como colectores solares planos o como colectores concentradores.

Habitualmente los colectores solares planos permanecen fijos, aunque son movidos cada cierto tiempo para seguir al Sol de acuerdo con la estación del año. Los colectores concentradores, en cambio, son móviles, ya que necesitan seguir el movimiento del Sol a lo

largo del día. Los colectores solares planos son, por lo general, más económicos y absorben calor tanto de la radiación difusa como de la radiación directa, por lo que pueden operar aun en días nublados, aprovechando la luz que se filtra a través de las nubes. Por su parte, los colectores concentradores sólo pueden utilizar la radiación directa pero alcanzan temperaturas mucho más elevadas.

En ambos casos la superficie receptora debe ser lo más oscura posible, para absorber la mayor parte de la radiación y reflejar, únicamente, una pequeña fracción.<sup>26</sup>

#### 4.5.1 COLECTORES SOLARES PLANOS.

Un colector solar plano consiste básicamente en una placa metálica *ennegrecida* que absorbe la radiación solar y la convierte en calor. Por lo general, el calor absorbido por la placa metálica es utilizado directamente en el calentamiento del agua destinada a los servicios sanitarios domésticos, o de aire para la calefacción de hogares, oficinas, hoteles, comercios, etc. Para tal propósito se requiere de un sistema que consiste en una serie de tubos metálicos que están fijos a la placa y conectados entre sí, por cuyo interior circula el fluido que se encarga de transportar el calor absorbido por la placa hasta el sitio en donde será aprovechado (ver Fig. 4.2).

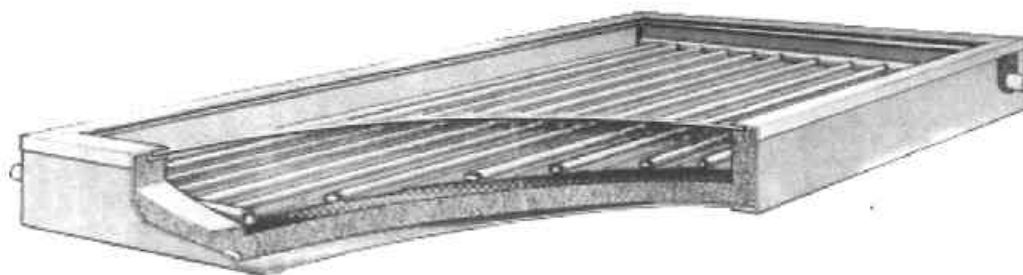


Figura 4.2. Colector de energía solar Amcor Solarion.

<sup>26</sup> Cerca del 98% de la radiación incidente sobre una superficie ennegrecida es susceptible de ser absorbida, con lo que pueden obtenerse temperaturas hasta de unos 70 °C en superficies descubiertas sometidas a soleamiento, y temperaturas de entre 100 y 150 °C si la superficie ennegrecida se encuentra en el fondo de una caja perfectamente aislada y cubierta con una placa de vidrio por el frente, por la cual entran los rayos del Sol.

El funcionamiento del equipo consiste esencialmente en la irradiación continua de los rayos solares sobre la placa metálica, que transfiere el calor absorbido al fluido. Simultáneamente, la placa pierde calor hacia los alrededores por medio de distintos mecanismos:

- Por convección, hacia las corrientes que circulan sobre la superficie de la placa.
- Por conducción, hacia el aire y otras partes de la estructura que contiene al receptor, que se encuentran a menor temperatura.
- Y por radiación infrarroja.

Sin embargo, las pérdidas de calor pueden ser reducidas considerablemente y con ello incrementar la temperatura de operación del colector; esto se consigue colocando una o más placas de vidrio o plástico transparente sobre la superficie de absorción en una caja cerrada herméticamente.

Para comprender mejor el papel que desempeña cada uno de los elementos que constituyen un colector solar plano (ver Fig. 4.3 y Fig. 4.4), a continuación se procederá a su descripción.

#### 4.5.1.1 LA CUBIERTA O PLACA TRANSPARENTE.

Este elemento es parte fundamental del sistema, ya que tiene la finalidad de permitir el paso de los rayos luminosos hacia la placa absorbente, pero sin admitir el paso de la radiación infrarroja emitida por la placa calentada hacia el exterior del colector.

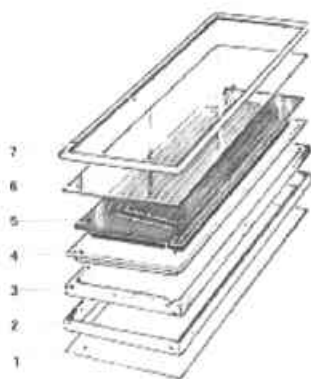


Figura 4.3. Componentes de un colector solar plano: 1, fondo de la carcasa; 2, estructura de la carcasa; 3, aislamiento térmico de 5 cm de espesor; 4, hoja de aluminio reflectante; 5, superficie absorbente, con circuito grabado roll-bond; 6, cubierta protectora de vidrio transparente, de 5 mm de espesor; 7, cierre del bastidor, marco del vidrio y cordón aislante de goma etilopropilénica (modelo Joannes).

Esto se debe a que la luz solar con longitud de onda menor a  $2.5 \mu$  (rayos luminosos o visibles) pasa a través de la cubierta transparente, pero la radiación de longitud de onda larga (infrarroja) emitida por la placa no atraviesa el vidrio en dirección contraria, por lo que es absorbida. Además de retener mediante el efecto invernadero el calor absorbido, la placa transparente tiene la función de reducir significativamente las pérdidas de calor por convección, que serían muy grandes si los rayos solares incidieran directamente sobre una superficie de absorción descubierta, con lo que la temperatura alcanzada sería mucho menor, como es el caso de los colectores de baja temperatura.<sup>27</sup>

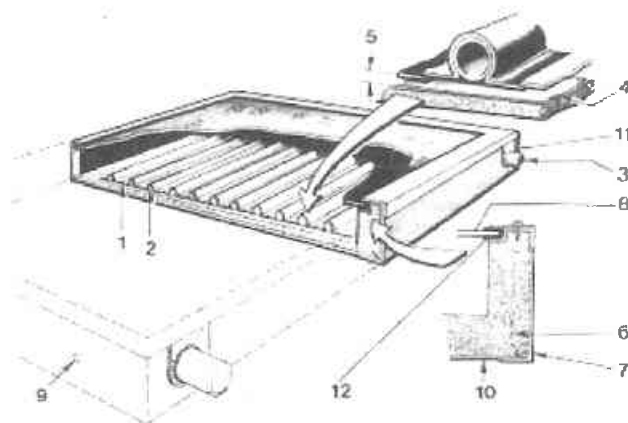


Figura 4.4. Detalle de un colector solar plano: 1, placa de absorción; 2, rejilla de tuberías de cobre; 3, conexión extrema de tubería; 4, hoja de aluminio; 5, cámara de aire; 6, aislante; 7, estructura exterior del colector (bastidor); 8, lámina de vidrio; 9, taladro para sujeción atornillada; 10, fondo del colector; 11, escuadra de refuerzo; 12, junta de caucho neopreno.

Por otra parte, la cubierta transparente (ya sea de plástico o de cristal) es pobre conductora de calor, por lo cual opera a menor temperatura que la superficie receptora ennegrecida. De tal modo, las pérdidas de calor son disminuidas.

La cubierta transparente puede ser de vidrio o de plástico incoloro. Por lo general, se emplea cristal templado o luna, usualmente de unos 3 mm de espesor, aunque puede llegar a tener espesores de 5 a 6.5 mm. Estos espesores son requeridos en ocasiones, debido a las fuertes

<sup>27</sup> Los colectores de baja temperatura son aquellos que no cuentan con cubierta transparente, por lo que no aprovechan el efecto invernadero. En consecuencia, alcanzan temperaturas aproximadas de 60 °C.

cargas de viento. El vidrio templado se utiliza por su resistencia al rompimiento, sin embargo, esto eleva el costo de los colectores.

Asimismo, se construyen algunos modelos más económicos con vidrio normal y espesores de 4 a 6 mm, pero son también más frágiles. Estos modelos pueden llegar a ocasionar dificultades al momento de la instalación, debido a las probabilidades de rompimiento, lo cual complica su manejo tanto al colocarlos como al instante de reemplazarlos.

A la vez que se instala el cristal, deben colocarse juntas que tienen el propósito de sellar el sistema cuando el vidrio se expanda por efecto del calentamiento que sufre a lo largo del día o se contraiga durante la noche.

Como ya se señaló, además de vidrio se pueden emplear materiales plásticos que actúan como cubierta o, incluso, como superficie de absorción del calor. Los materiales utilizados son aquellos que poseen una alta capacidad de transmisión, es decir, que tienen una transparencia semejante a la del vidrio. Como ejemplo de tales materiales se pueden mencionar: el policarbonato, el metacrilato y el cloruro de polivinilo, entre otros.

Normalmente se considera que un colector solar con una cubierta simple de vidrio alcanzará temperaturas cercanas a los 100 °C. Sin embargo, en ocasiones en que se requieren mayores temperaturas o en regiones muy frías, en las que una cubierta no es suficiente para reducir las pérdidas de calor de la superficie metálica, puede aplicarse un doble o triple acristalado, con lo que es posible conseguir temperaturas de entre 135 y 140 °C en el caso de un doble acristalado, y de 180 a 190 °C si el acristalado es triple. En este caso, se requiere de cuidado al momento de realizar el montaje de las placas, ya que éstas deben tener libertad para expandirse y contraerse, dado que la placa interior inmediata a la superficie absorbidora se calentará mucho como resultado de la radiación incidente y la convección proveniente de la misma, mientras que el cristal exterior permanecerá relativamente frío debido a la pérdida de calor por contacto con el aire exterior.

Si bien dos o más cubiertas transparentes son más eficientes que una, cada una de ellas reduce la radiación solar incidente (aproximadamente en un 8%) por absorción en el cristal o el plástico, debido a la reflexión en las interfaces cristal-aire.<sup>28</sup>

Es evidente que al aumentar el número de cubiertas se elevará el costo del colector, por lo que debe considerarse si la temperatura alcanzada realmente lo justifica.

---

<sup>28</sup> Cuando se emplean varias cubiertas transparentes, éstas se colocan con una separación aproximada de una pulgada, para reducir la circulación de aire entre las placas y, por tanto, las pérdidas de calor por convección.

#### 4.5.1.2 LA PLACA ABSORBENTE.

Es el elemento más importante del colector solar, debido a que es aquí donde se lleva a cabo la transformación de la energía radiante del Sol en energía calorífica, que puede ser aprovechada para distintos fines. La placa absorbente está compuesta por una lámina metálica (usualmente de acero, cobre o aluminio) a la que se le aplica un recubrimiento, con el fin de aumentar su capacidad de absorción de los rayos solares. Dicho recubrimiento consiste en una pintura opaca de color negro, que generalmente contiene un material conocido como *negro de humo* (empleado en la fabricación de pigmentos y tintas). Además de mejorar el rendimiento de la placa colectora, este tratamiento tiene la finalidad de evitar el deterioro que podría ocurrir por el paso del tiempo y la continua insolación a la que será sometida la superficie receptora. No está de más mencionar que es necesario preparar adecuadamente la placa antes de colocar el recubrimiento, con el propósito de evitar que éste se vuelva quebradizo con el transcurso del tiempo y se desprenda de la superficie de la placa.

Mediante la aplicación en forma apropiada de pintura negra, es posible conseguir un buen desempeño en colectores solares destinados al calentamiento de agua para uso doméstico, pero cuando se requiere de temperaturas mayores se puede usar otro tipo de materiales conocidos como *recubrimientos selectivos*.

Los recubrimientos selectivos son aquellos materiales que pueden absorber la mayor parte de la radiación solar perteneciente al espectro visible, debido a que presentan elevada absorptividad en el intervalo de longitudes de onda que va de 0.3 a 2.5  $\mu$ , y baja emisividad en el rango de los infrarrojos.

Las ventajas que ofrece este tipo de tratamientos sobre el uso de pintura negra se puede observar en la Tabla 4.1.

Existe además otro tipo de procedimientos para mejorar el poder de absorción de la superficie colectora, como es el empleo de tratamientos electroquímicos. Entre éstos, se encuentra el llamado *black chrome* (cromo negro), que presenta una gran receptabilidad y no pierde sus propiedades ni con el transcurrir del tiempo ni con la intensa acción de los rayos solares.

Por otra parte, se cuenta con modelos de colectores solares que emplean materiales plásticos como superficies absorbentes. Sin embargo, cabe mencionar que estos colectores solares de bajo costo tienen la desventaja de poseer una vida media muy corta, además de que son sensibles a las altas temperaturas que pueden llegar a alcanzarse muy fácilmente al ser expuestos a los rayos del Sol sin agua circulando en ellos.

Tabla 4.1. Comparación entre recubrimientos selectivos y pintura negra.	
<i>Recubrimiento selectivo</i>	<i>Pintura negra</i>
Alta absorptividad a longitudes de onda cortas (0.3 a 2.5 $\mu$ ) y baja emisividad a longitudes de onda largas (más de 2.5 $\mu$ ).	Tienen alta absorptividad y regular emisividad en todo el rango espectral.
Las características de operación del recubrimiento no se alteran con el tiempo.	Sus propiedades cambian durante la insolación.
Es resistente a la corrosión y a la oxidación.	Se deteriora con la humedad.
Es resistente a la acción del flujo solar, por lo que ofrece larga duración.	Se deteriora bajo el flujo de los rayos solares, por lo que su vida es muy corta.
Ofrece un buen desempeño en cuanto a su eficiencia de operación a lo largo de su vida útil.	Su eficiencia disminuye con el tiempo.
Soporta grandes variaciones de temperatura durante largos periodos de tiempo.	Usualmente se desprende como consecuencia de las variaciones de temperatura. Sólo sirve para aplicaciones de bajas temperaturas.
Debido a que involucran aplicaciones metálicas su conductividad es elevada.	Es a base de polímeros, por lo que presenta baja conductividad térmica.

Fuente: Kumar Kaushal, Devinder. «An Overview of Solar Termal Devices Based Solar Water Heating Systems & The Necessity of Using Solar Selective Coating». Gran Bretaña, Elsevier Science, 1997.

#### 4.5.1.3 LOS TUBOS DE CIRCULACIÓN DEL FLUIDO.

Éstos constituyen el circuito por cuyo interior deberá circular el fluido encargado de extraer el calor absorbido por la placa metálica. Al igual que la placa, éstos pueden ser de cobre, aluminio o acero. Los tubos se colocan inmediatos a la placa absorbente, generalmente por el lado expuesto a la acción solar, para recibir directamente y con mayor intensidad los efectos térmicos de la misma placa, así como la aportación adicional de los rayos solares.

El material de fabricación de los tubos, además de ser buen conductor de calor, debe tener resistencia a la corrosión. Normalmente se emplean tubos de pequeño o mediano calibre ( $\frac{1}{2}$ - $\frac{3}{4}$  de pulgada) para la construcción del circuito, y de mayor diámetro (1-1  $\frac{1}{4}$  de pulgada) para los cabezales de entrada y salida del colector.



Los tubos deben ser colocados de tal manera que recorran la superficie de la placa absorbente varias veces –en disposiciones paralelas, longitudinales o transversales– con el objetivo de aumentar el área de transferencia de calor (la superficie de contacto).



Figura 4.5. Circuito de tubos montados sobre la superficie absorbente.

El modelo que se muestra en la Figura 4.5 ejemplifica el patrón utilizado en los primeros diseños. Hoy en día se emplean otro tipo de arreglos (como el patrón tipo parrilla o reja), que dan lugar a la clasificación de los colectores solares planos en distintos grupos, como se verá más adelante en este mismo capítulo (ver Tipos de Colectores Solares Planos).

Otro aspecto que debe considerarse con respecto a los tubos es la forma en que serán fijados a la placa, de modo que exista el contacto adecuado entre ambos elementos para asegurar una buena transferencia de calor. Una de las opciones con que se cuenta para cumplir con dicho propósito es el empleo de cementos térmicos. Éstos consisten en un material que ofrece buen sellado metal-metal, alta resistencia mecánica y buena conductividad térmica. La composición de estos cementos está basada, generalmente, en un líquido (silicato de sodio) al que se agrega una importante cantidad de diminutas partículas metálicas (hierro). Al ser expuesto al ambiente, este compuesto se endurece y las partículas metálicas le confieren una excelente conductividad térmica, semejante incluso a la del acero.

En la Figura 4.6 se muestran algunos posibles diseños empleados para establecer contacto entre la placa colectora y el circuito de tubos. En el esquema de la parte superior se muestra un arreglo en el que los tubos se apoyan sobre la superficie de la placa metálica, mientras que en la parte inferior se observa que éstos se insertan en una lámina acanalada lo cual aumenta la superficie de transferencia de calor.

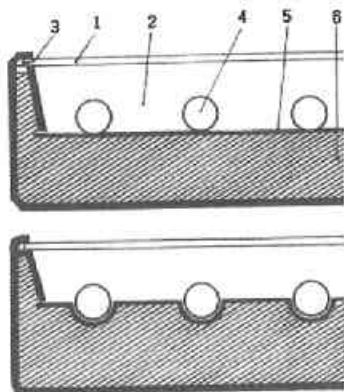


Figura 4.6. Detalle del contacto de las tuberías del circuito con la placa absorbente: 1, lámina de cristal; 2, cámara de aire; 3, junta aislante; 4, conductos del circuito; 5, placa absorbente; 6, aislante.

Otra modalidad es la que se presenta en la Figura 4.7, en la que la placa colectora, que está formada por una serie de placas de menor tamaño, rodea completamente los tubos del circuito, ofreciendo aun mayor superficie de contacto.

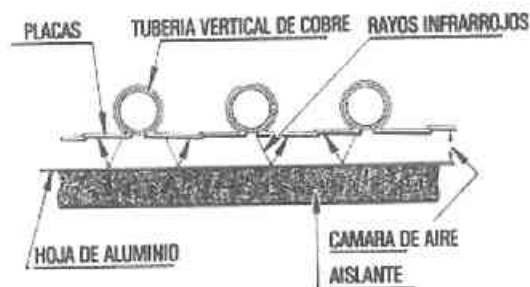


Figura 4.7. La placa absorbente está integrada por placas más pequeñas, soldadas entre sí y que envuelven a los conductos del circuito.

#### 4.5.1.4 EL AISLANTE TÉRMICO.

Este elemento puede estar formado por cualquier material que presente baja conductividad térmica, aún a temperaturas cercanas a los 100 °C. La finalidad del aislante es la de reducir al máximo las pérdidas de calor, por lo que se coloca inmediatamente por debajo de la placa, para forzar a que el calor absorbido se transfiera principalmente hacia el circuito portador del fluido de trabajo y no hacia el fondo del colector. El aislante se presenta en forma de bloques que tienen gruesos que van de los 5 a los 7 cm. Entre los distintos materiales empleados para la fabricación de estos aislantes se pueden mencionar: la fibra de vidrio, madera aglomerada,

espuma de poliuretano, poliestireno expandido y corcho, entre otros. Uno de los más empleados es la lana mineral, por su baja conductividad térmica, su bajo costo y su presentación en una gran variedad de anchos y espesores. Por otra parte, el empleo de espumas aislantes ofrece la ventaja adicional de proporcionar soporte estructural al colector, sin embargo es necesario tomar precauciones, debido a que la espuma puede llegar a fundirse, como resultado de las altas temperaturas que pueden alcanzarse en un colector expuesto a la acción de los rayos solares sin agua circulando en su interior.

Además de cubrir el fondo de la caja colectora el aislante debe colocarse a los lados de la placa de absorción (ver Fig. 4.4), para reducir las pérdidas caloríficas por los costados del colector.

#### **4.5.1.5 LA CARCASA.**

Todos los componentes anteriormente mencionados se colocan de forma paralela (ver Fig. 4.3) en el interior de una caja o carcasa. Este elemento es el que constituye la estructura del colector en combinación con la cubierta de vidrio, y junto con ésta última proporciona protección contra la intemperie a todos los elementos del colector.

La carcasa tiene forma rectangular y está compuesta por cuatro paredes laterales que constituyen el *bastidor*, y una lámina que cierra el sistema por la parte trasera.

Debido a que la caja del colector estará expuesta a la intemperie, es necesario utilizar materiales adecuados para soportar las inclemencias del tiempo (viento, lluvia, humedad, etc.). Asimismo, es necesario prevenir la aparición de corrosiones. Con este propósito, se emplean diversos materiales para la fabricación de la carcasa, entre los cuales se pueden mencionar: acero galvanizado, acero inoxidable, aluminio anodizado, poliéster reforzado con fibra de vidrio o madera debidamente tratada para resistir la humedad.

Otro elemento importante para el buen funcionamiento del colector es el empleo de empaques que tienen el objetivo de impedir fugas de calor, que disminuyen el rendimiento del colector. Éstos se colocan en la unión del bastidor con la placa transparente (ver Fig. 4.4), y consisten en materiales elásticos de larga duración, resistentes a la acción del Sol y a las condiciones climáticas. Por lo general se emplean caucho siliconado, neopreno u otros elastómeros.

En términos generales, se han descrito los componentes principales de un colector solar plano, así como los materiales empleados para la fabricación de cada uno de ellos. No

obstante, es necesario señalar que el diseño de cada colector depende primordialmente del uso específico que vaya a dársele. Así, será diferente si se trata de calentar el agua de una piscina, el agua de uso doméstico o el aire para acondicionamiento de interiores.

En general, para realizar estimaciones acerca del rendimiento de colectores solares planos es necesario efectuar el balance de energía correspondiente, con la finalidad de conocer el valor del calor útil transferido por el colector al fluido de trabajo, para lo cual deben considerarse diversos factores, entre los que se encuentran la energía solar incidente, el área efectiva del colector, la transmitancia del vidrio, la capacidad de absorción calorífica de la placa colectora, la capacidad calorífica del fluido de trabajo, las pérdidas de calor hacia los alrededores, la temperatura media de la placa colectora y la temperatura del ambiente. No obstante, existen algunas dificultades que se presentan al efectuar este análisis, dado que el calor útil está en función de la temperatura media de la placa, la cual depende a su vez de variables que cambian continuamente con el tiempo, como la radiación solar incidente y la temperatura del fluido de trabajo al momento de entrar al colector.

Una vez que se conoce el valor del calor útil puede efectuarse el cálculo de la eficiencia del colector, la cual se define como la relación entre el calor útil y la energía solar incidente sobre el colector en un mismo periodo de tiempo. En Almanza y Muñoz (1994)<sup>29</sup> se presentan, en el capítulo 3 dedicado a colectores planos, las expresiones que corresponden a los distintos procesos de transferencia de calor que tienen lugar en un calentador solar de agua, aunque dichas expresiones pueden emplearse para calentamiento de aire, con las debidas modificaciones.

#### **4.5.1.6 TIPOS DE COLECTORES SOLARES PLANOS.**

De acuerdo con el tipo de fluido empleado para remover y transportar el calor absorbido por la superficie colectora, se pueden clasificar en las siguientes categorías:

- Colectores para calentamiento de líquidos (agua).
- Colectores para calentamiento de gases (aire).

---

<sup>29</sup> Almanza, R. y Muñoz, F. «Ingeniería de la Energía Solar». México, D.F., editado por El Colegio Nacional, 1994.

#### 4.5.1.6.1 COLECTORES SOLARES PARA CALENTAMIENTO DE LÍQUIDOS.

Dentro de los colectores solares para calentamiento de líquidos, se puede hacer, a su vez, una subdivisión, según sea el arreglo que presenta el circuito de tubos. De tal modo, se distinguen tres grupos principales:

- Sistemas de serpentín.
- Sistema rollbond.
- Sistema de tubos de calor.

El primero de ellos consiste en un circuito que recorre varias veces la superficie de la placa absorbadora, con el propósito de aumentar la superficie de contacto entre ambos elementos, y favorecer, por tanto, la transferencia de calor. En la Figura 4.8 se observa un ejemplo de este tipo de circuitos, el cual presenta un conducto de entrada del líquido y otro de salida. El fluido viaja a través del circuito sin pasar dos veces por el mismo sitio y aumenta su temperatura conforme avanza por él. Del lado derecho se muestra otra opción, en la que se observan dos tubos en posición horizontal localizados en ambos extremos del colector; uno de ellos está conectado al cabezal de entrada y el otro al de salida. En medio de los tubos distribuidores horizontales se localiza una serie de tubos del mismo calibre, colocados en forma perpendicular a ellos y paralelos entre sí, formando lo que se conoce como patrón o arreglo tipo *reja* o *parrilla*. El funcionamiento de este sistema consiste en alimentar, por la parte inferior del colector, agua fría que penetra en los tubos verticales y va aumentando su temperatura a medida que los recorre, hasta alcanzar la parte superior, por donde sale el agua ya caliente.

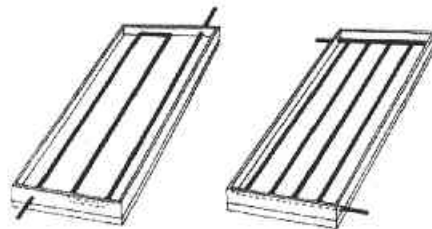


Figura 4.8. Variantes en los circuitos de tubos.

El sistema rollbond en cambio elimina el uso de tubos independientes que deben colocarse sobre la placa colectora, ya que los conductos están formados por la placa misma. Para

fabricar este tipo de modelos se emplean dos láminas metálicas, usualmente de cobre o aluminio. Dicho proceso consiste en dibujar el esquema del circuito que se desea utilizar sobre la lámina que será colocada en la parte superior (superficie de absorción), para posteriormente colocar la otra lámina por debajo de la primera y soldar ambas placas mediante calor y presión sobre toda la superficie, con excepción de las áreas trazadas con el diseño del circuito. A continuación se crean los conductos mediante la inserción de una aguja especial en el borde de las zonas no soldadas, que inyecta un fluido a presión para inflar el esquema de tubos. La figura siguiente muestra un sistema de este tipo.

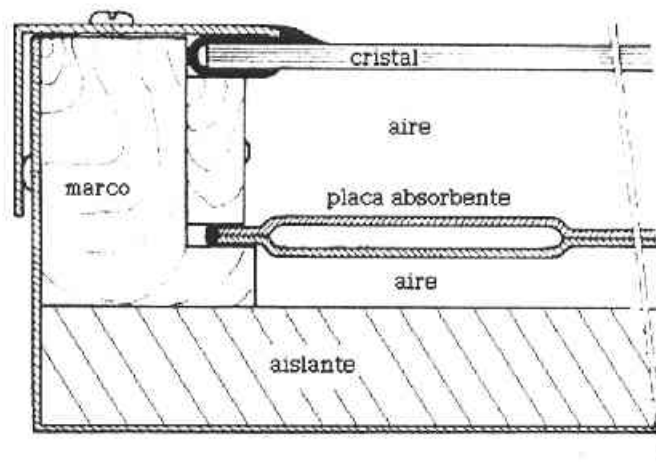


Figura 4.9. Sistema rollbond formado por dos placas metálicas.

El último de estos sistemas, el de los tubos de calor, consiste en un sólo tubo que atraviesa la placa de un extremo a otro. Como se puede observar en la Figura 4.10, en este tipo de colectores se coloca el tubo de circulación del fluido por debajo de la superficie metálica, a diferencia de todos los demás sistemas. Asimismo, se puede apreciar que la placa es más larga que en los sistemas convencionales, lo que se hace con el objetivo de ofrecer suficiente superficie de contacto, ya que debe contrarrestarse el hecho de que el tubo recorre la superficie de la placa una sola vez. Estos modelos pueden llegar a tener longitudes de entre 5 a 6 m.

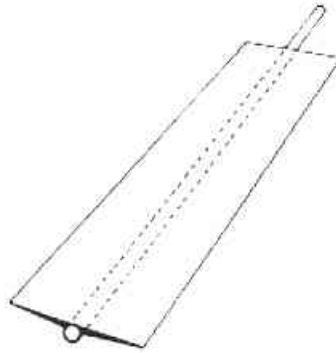


Figura 4.10. Sistema de tubos de calor.

#### 4.5.1.6.2 COLECTORES SOLARES PARA CALENTAMIENTO DE GASES.

Por lo que hace a los colectores para calentamiento de gases, se pueden distinguir dos grupos principales:

- Aquéllos cuya placa de absorción se encuentra descubierta.
- Y los que presentan la superficie de absorción cubierta por una placa transparente.

Los colectores solares de placa descubierta para calentamiento de aire son los más simples de entre todos los tipos de colectores solares planos. Estos modelos consisten simplemente en un conducto de aire, formado por la placa absorbidora de la radiación solar y la capa de material aislante térmico, tal como se muestra en la Figura 4.11. Este tipo de colectores se utiliza ampliamente en operaciones de secado de cosechas.

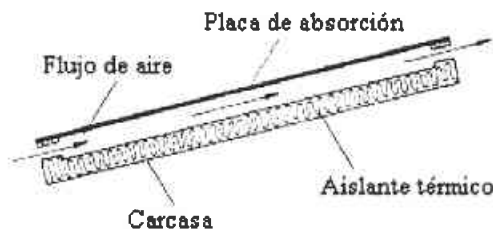


Figura 4.11. Esquema de un colector solar de placa descubierta para calentamiento de aire.

Debido a que la superficie colectora se encuentra descubierta, estos sistemas presentan grandes pérdidas de calor a través de la misma, lo que se traduce en una baja eficiencia térmica. Sin embargo, el pobre rendimiento de estos colectores es compensado por su bajo costo de construcción.

Las pérdidas de calor por la parte superior del colector pueden ser disminuidas mediante la colocación de una o más placas transparentes, como se describió anteriormente. Los calentadores solares de aire con cubierta son más eficientes que los colectores del tipo que se muestra en la figura anterior, pero su costo de construcción es más elevado. Este tipo de sistemas se emplea para conseguir aumentos de temperatura de 10 a 35 °C por encima de la ambiental. Los colectores solares de placa cubierta para calentamiento de aire se pueden clasificar en los siguientes grupos:

- Colectores solares de paso frontal. En éstos, el aire que será calentado viaja a través del conducto formado por la cubierta transparente y la placa de absorción, cuya cara posterior se encuentra aislada. Por lo tanto, la transferencia de calor se lleva a cabo de la cara frontal de la placa metálica hacia la corriente de aire circulante, tal como se muestra en la Figura 4.12.

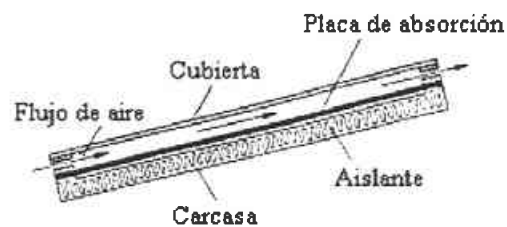


Figura 4.12. Esquema de un colector solar de paso frontal con cubierta para calentamiento de aire.

- Colectores solares de paso posterior. Aquí, la placa de absorción se coloca directamente detrás de la cubierta transparente, con una capa de aire entre ambas. El aire que será calentado circula entre la placa metálica y la capa de aislante térmico, realizándose la transferencia de calor desde la cara trasera de la placa colectora (Fig. 4.13). Estos colectores han resultado ser, por lo general, más eficientes que los del tipo de paso frontal.



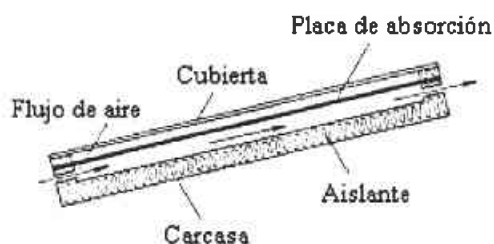


Figura 4.13. Esquema de un colector solar de paso posterior con cubierta para calentamiento de aire.

- Colectores solares de placa suspendida. En estos modelos la placa colectora se encuentra sujeta entre la cubierta y la capa de aislante térmico. Aquí, el aire que se va a calentar recorre ambos lados de la placa metálica, aumentando el área de transferencia de calor. Por lo tanto, la superficie de absorción se encuentra a menor temperatura y, en consecuencia, las pérdidas de calor por radiación serán mínimas. Existen dos arreglos distintos del colector de placa suspendida: el de paso paralelo y el de doble paso (Fig. 4.14). Los colectores solares de placa suspendida ofrecen mayores eficiencias que los de placa descubierta, paso frontal o paso posterior.

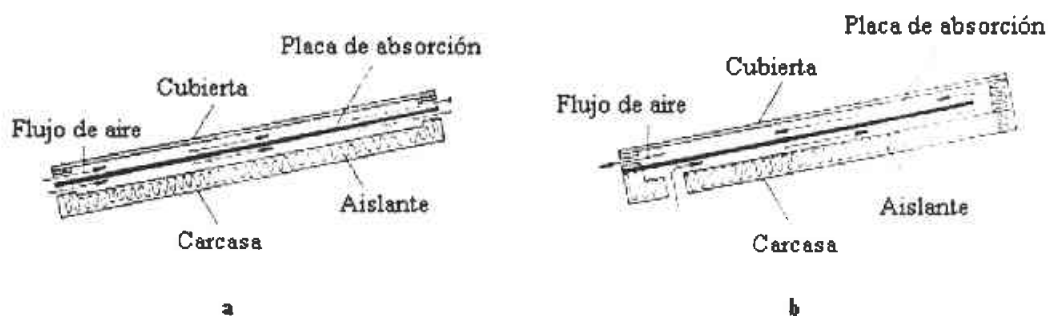


Figura 4.14. Esquema de colectores solares de placa suspendida cubierta para calentamiento de aire: de paso paralelo (a) y de doble paso (b).

Debe recordarse que los colectores, del tipo que sean, deben estar correctamente orientados hacia el Sol. Los colectores pueden colocarse en posición vertical, horizontal o inclinada. La orientación depende, entre otros factores, de la ubicación geográfica (latitud) y de la estación del año. Por lo general, los sistemas típicos utilizan colectores montados sobre los tejados,

aunque otros se adaptan en las fachadas de casas y edificios, cuando el diseño arquitectónico así lo permite. En el hemisferio norte se orientan hacia el sur, con un ángulo de inclinación, con respecto a la horizontal, igual a la latitud; y en el hemisferio sur se orientan hacia el norte. Durante el invierno se recomienda que los colectores solares planos estén inclinados al ángulo de latitud más  $15^\circ$  y en verano al ángulo de latitud menos  $15^\circ$ . Los colectores planos cuya inclinación es pronunciada, ofrecen ventajas adicionales sobre los que se encuentran en posición horizontal, ya que al estar tan inclinados son menos propensos a acumular nieve o polvo sobre sí, lo que puede suceder por estar expuestos a la intemperie.

Habitualmente, los colectores solares planos son montados en una posición fija, pero si las unidades no son demasiado grandes y pesadas, en ocasiones es práctico moverlos ligeramente, de vez en cuando, para conseguir una buena captación de la energía, conforme cambia la estación.

No obstante, la ventaja que podría obtenerse al mover este tipo de colectores continuamente durante el día para seguir al Sol, no es lo suficientemente grande como para justificar la instalación de un mecanismo automático que se encargue de moverlos.

Una vez que se han descrito los detalles, tanto de los elementos fundamentales que integran los colectores solares planos como de las distintas clases de colectores, clasificados ya sea de acuerdo al fluido de trabajo o a la disposición de los tubos o componentes del sistema, a continuación se tratará sobre otro tipo de colectores solares, igualmente empleados para la generación de energía calorífica. Éstos son: los colectores concentradores.

#### **4.5.2 COLECTORES CONCENTRADORES.**

Aunque por medio de colectores solares planos pueden satisfacerse algunas de las necesidades energéticas básicas, tanto en hogares como en otros sitios, existen otras aplicaciones, principalmente a nivel industrial, para las que se requiere de mayores temperaturas que las que este tipo de sistemas puede ofrecer.

Precisamente para tales propósitos son utilizados los colectores concentradores, con los que se pueden alcanzar fácilmente temperaturas mucho más elevadas, si bien son más costosos y necesitan moverse continuamente para estar orientados hacia el Sol, ya que sólo pueden utilizar la radiación directa.

Para obtener temperaturas más altas es necesario aumentar la intensidad de la energía solar, lo que se consigue concentrando la luz del Sol que incide sobre una superficie amplia en un área pequeña, por medio de lentes o espejos generalmente curvos, hechos de cristal, metal o plástico.

Así, mientras los colectores solares planos se basan en el efecto invernadero, los colectores concentradores se basan, como su nombre lo indica, en la concentración de los rayos solares. La radiación solar concentrada por medio de estos dispositivos, puede producir temperaturas de hasta 3 500 °C, dependiendo de la calidad del colector.<sup>30</sup>Incluso, en la literatura se menciona que, a través de este procedimiento, es *teóricamente posible* alcanzar temperaturas cercanas a las de la superficie solar (aprox. 6 000 °C).

En la mayoría de los casos los colectores concentradores están constituidos básicamente, por una superficie reflectante, generalmente curva, sobre la que inciden los rayos solares, y una superficie absorbidora en donde se concentra el calor *reflejado* (Fig. 4.15).

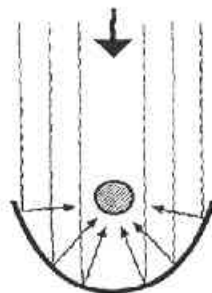


Figura 4.15. Principio de la concentración de rayos solares.

Dado que la concentración de la radiación solar es un mecanismo diseñado para conseguir altas temperaturas, la superficie de absorción debe ser pequeña en relación con la superficie reflectante, ya que las pérdidas caloríficas son proporcionales al área de absorción. Por lo tanto, al utilizar un receptor pequeño es posible captar aproximadamente la misma cantidad de radiación solar que en la superficie reflectante, a la vez que se reducen las pérdidas caloríficas al disminuir el área del mismo.

---

<sup>30</sup> Por ejemplo, con un colector concentrador rudimentario, hecho de una estructura plástica revestida con una película de plástico aluminizado, es posible obtener temperaturas de 500 °C o mayores.

Al parecer, la técnica de la concentración de los rayos solares ya era conocida en la antigüedad: se dice que en el siglo III a. C., en Siracusa, el famoso matemático y físico Arquímedes utilizó la concentración de rayos solares, mediante un gran número de escudos pulidos empleados como reflectores, para incendiar las velas de los barcos romanos enemigos; y que el científico francés Antoine Lavoisier estuvo cerca de fundir platino, cuyo punto de fusión es de aproximadamente 1 200 °C, en un horno solar de dos lentes, hace poco más de dos siglos.

Tal y como puede apreciarse en la Figura 4.15, los rayos solares que inciden sobre la superficie reflectante curva, son proyectados hacia la parte central del colector, por efecto de la curvatura misma. De tal forma, la radiación que llega a la placa reflectante se acumula sobre la superficie de absorción, localizada en el eje focal (centro) del colector, con lo que se consiguen elevadas temperaturas.

La temperatura alcanzada dependerá del dispositivo adoptado, de la extensión de la superficie reflectante y de su curvatura, entre otros factores.

Una forma de conocer las temperaturas que se pueden conseguir en este tipo de colectores, es por medio de la razón de concentración,  $C$ , que se define como la relación entre el área proyectada del reflector,  $A_c$ , y el área del receptor que será calentado,  $A_r$ . Es decir:

$$C = A_c/A_r$$

Con la finalidad de reflejar apropiadamente la mayor parte de los rayos solares que inciden sobre la superficie curva, ésta suele estar hecha de metal pulido, acero inoxidable, espejos, plástico recubierto con aluminio o cualquier material capaz de actuar como espejo. De tal manera, el concentrador tendrá la capacidad de formar sobre la superficie reflectante, una imagen clara del disco solar, y por lo tanto, se podrán generar altas temperaturas. Sin embargo, comúnmente el espejo o reflector de que se trate no es ópticamente perfecto, por lo que la imagen del Sol no es completamente circular y uniforme. En consecuencia, algunas partes de la imagen estarán más calientes que otras. Por lo general, el elemento receptor o superficie de absorción es lo suficientemente grande para captar la mayor parte de los rayos solares reflejados, y está formado por un buen conductor metálico, a fin de que sea calentado de manera uniforme a pesar de una imagen distorsionada.

El tamaño del receptor está determinado por la forma y superficie del reflector. Por ejemplo, si se trata de una parábola perfecta el receptor puede ser pequeño, mientras que si se desvía de esta forma, parte de la radiación reflejada no acertará en el receptor, por lo cual se requerirá de uno más grande. No obstante, debe recordarse que el área del receptor debe ser tan pequeña como sea posible, con la finalidad de reducir las pérdidas de calor para conseguir mayores temperaturas.

Por otro lado, la capacidad de reflexión depende de la forma y tamaño del reflector, así como de las macro y micro imperfecciones de su superficie. De esta forma, un cristal plano pulido con una película de plata ofrece la mejor superficie reflectante, ya que refleja casi toda la luz incidente sobre su superficie, si la película se encuentra al frente del cristal. Si por el contrario se localiza en la parte posterior (fondo) del cristal, como normalmente sucede para asegurar resistencia a la intemperie, habrá pérdidas por absorción en el cristal. Aun así, un espejo de este tipo (fondo plateado) puede ofrecer reflexión del 92% aproximadamente. Una superficie plástica, en cambio, es mucho menos lisa, y cuando es recubierta con un metal reflectante las imperfecciones ocasionan desviaciones en la luz reflejada. Igualmente, las imperfecciones en la forma de una estructura parabólica de plástico aluminizado, causadas por partículas de polvo o pequeñas rugosidades, pueden ocasionar que parte de la luz reflejada sea desviada y no incida sobre el receptor.

Además de que el acabado de la superficie reflectante debe ser de buena calidad en términos de óptica, debe conservar sus propiedades por largo tiempo, ya que el equipo estará expuesto de manera permanente a la intemperie, en donde frecuentemente existen elementos oxidantes y corrosivos, así como suciedad ambiental que puede acumularse sobre el equipo afectando de manera negativa su funcionamiento. Asimismo, necesitan cambiar continuamente de orientación, como ya se dijo anteriormente, para seguir al Sol en su trayectoria, por lo que se requiere de un mecanismo de funcionamiento automático que cumpla con dicha función. Cabe mencionar que el costo de la instalación se incrementará al adicionar dicho mecanismo al sistema de concentración solar.

Las expresiones empleadas para calcular el calor útil en el caso de colectores concentradores son similares a las utilizadas para colectores planos, con algunos términos adicionales.

El cálculo de la eficiencia en este tipo de dispositivos involucra el término conocido como razón de concentración, el cual fue definido previamente. Así, es evidente que entre mayor sea la razón de concentración, más grande será la eficiencia. Dicho en otros términos, cuanto

más alta sea la temperatura que deberá alcanzar el concentrador, mayor tendrá que ser la razón de concentración.

#### **4.5.2.1 TIPOS DE COLECTORES CONCENTRADORES.**

Existe una gran variedad de colectores concentradores, así como de maneras de clasificarlos, de acuerdo con muy distintos criterios: se pueden clasificar, por ejemplo, dependiendo de si dan o no un seguimiento continuo al Sol, en:

- Concentradores de enfoque, que constan básicamente de tres partes: la superficie concentradora (reflectante o refractiva<sup>31</sup>), también conocida como sistema óptico del colector concentrador; el receptor o superficie de absorción; y el mecanismo de seguimiento del Sol, elemento imprescindible en este tipo de dispositivos. Dentro de este grupo se encuentran los sistemas que utilizan lentes de Fresnel y los concentradores parabólicos, que se describirán más adelante.
- Concentradores fijos o semifijos, que requieren un mínimo de seguimiento del Sol e incluso pueden prescindir por completo del mecanismo, permaneciendo definitivamente en forma estática, sin embargo sólo pueden proporcionar temperaturas moderadas. Otra característica de estos sistemas es que son capaces de aprovechar la radiación difusa. Un ejemplo de este tipo de sistemas es el concentrador parabólico compuesto (CPC).

O pueden clasificarse de acuerdo a la forma en que reflejan o refractan los rayos solares que inciden sobre el sistema óptico, en:

- Concentradores cilíndricos o lineales, que enfocan sobre una línea.
- Concentradores circulares, que enfocan sobre un punto.

Igualmente, se puede clasificar la gran variedad de receptores, que pueden ser cóncavos, convexos, planos, cilíndricos, semiesféricos, etc. Cada uno de ellos puede ser lineal o puntual. Existen también diferentes tipos de mecanismos seguidores del Sol, en función del tipo de colector. En general, se pueden distinguir dos grupos: mecanismos con un eje de movimiento y

---

<sup>31</sup> Refractiva, que causa refracción.

mecanismos con dos ejes de movimiento. Así, los concentradores cilíndricos habitualmente utilizan sólo un eje de movimiento, mientras que los circulares requieren dos ejes para seguir la trayectoria del Sol de manera eficaz.

Como se dijo al inicio de esta sección, existe una amplia variedad de colectores concentradores, éstas son sólo algunas de las formas en que pueden clasificarse. Al estudiar con mayor detalle este tipo de sistemas podrá observarse que, debido a la diversidad de criterios que se emplean para agruparlos, varios de estos equipos pueden pertenecer a más de una de las categorías en que se dividen.

Debido a la naturaleza introductoria de este trabajo sobre el aprovechamiento técnico de la radiación solar, no se analizarán todos los distintos modelos de colectores concentradores, sino sólo algunos de ellos.

Existen tres clases principales de sistemas utilizados para la concentración de los rayos solares, éstos son:

- Concentradores de canal parabólico, que enfocan los rayos solares sobre un tubo receptor ubicado a lo largo de la línea focal del colector.
- El sistema de receptor central o torre de energía, en el que reflectores planos *rastreadores* del Sol, llamados helióstatos, son utilizados para reflejar la luz solar sobre un sistema colector central colocado en la parte más alta de una torre.
- Y el sistema de disco parabólico, que utiliza un reflector *rastreador* en forma de disco para concentrar la energía solar sobre un receptor colocado en el punto focal del disco.

#### **4.5.2.1.1 CONCENTRADORES DE CANAL PARABÓLICO.**

Este tipo de colectores se caracteriza por presentar una superficie reflectante cuya sección transversal corresponde a la de un canal de forma parabólica y un receptor lineal que corre a lo largo de dicha superficie, tal como se puede observar en el esquema de la Figura 4.16. La superficie reflectante concentra los rayos solares sobre el receptor, que es un tubo por cuyo interior circula el fluido que será calentado. Tal fluido, que puede ser agua o aceite, penetra frío por un extremo de la tubería y recibe durante su recorrido la radiación calorífica emitida por la superficie reflectante y absorbida por la tubería. Una vez calentado el fluido, es transportado a un punto central por medio de una red de tuberías diseñada para minimizar las

pérdidas de calor. Para mejorar la capacidad de absorción de los tubos del colector, éstos pueden estar cubiertos por un revestimiento selectivo de color negro. Puesto que los canales parabólicos tienen sólo una línea focal horizontal, siguen al Sol mediante un mecanismo con un solo eje de movimiento, ya sea norte-sur o este-oeste.



Figura 4.16. Concentrador de canal parabólico.

Por otra parte, dado que la luz solar es concentrada sobre una línea y no sobre un solo punto, la razón de concentración de un colector de canal parabólico es menor a la de un sistema de receptor central o de disco parabólico. Asimismo, los colectores de canal parabólico operan a temperaturas considerablemente menores (100-400 °C) a las de tales sistemas termosolares.

No obstante, los sistemas de canal parabólico son los más ampliamente desarrollados dentro de los equipos que corresponden a la tecnología termosolar de concentración.

Estos dispositivos pueden agruparse para formar grandes instalaciones dedicadas a la generación de energía. Dichas plantas consisten en un conjunto de colectores conectados entre sí y colocados en hileras paralelas alineadas en un eje norte-sur. Tal configuración permite que los colectores de canal parabólico, que tienen un solo eje de movimiento, sigan al Sol de este a oeste a lo largo del día, para asegurar que sus rayos sean incesantemente dirigidos hacia los tubos receptores. La energía calorífica captada por los colectores es entonces transferida a un sistema central de conversión energética, donde el calor es transformado en electricidad en un generador convencional.

Por lo general, las plantas de energía basadas en el uso de concentradores de canal parabólico utilizan sistemas auxiliares a base de combustibles fósiles, tales como hervidores o calentadores de gas, para satisfacer la demanda energética durante los periodos de baja radiación solar.





Figura 4.17. Esta es 1 de 9 plantas generadoras de energía eléctrica a base de concentradores solares de canal parabólico, que están ubicadas en el desierto de Mojave, California, y tienen la mayor capacidad de generación de electricidad a partir de la energía del Sol a nivel mundial, alcanzando una potencia de 354 megawatts que satisface las necesidades de 500,000 personas. El aceite que circula por los tubos receptores recoge la energía solar captada en forma de calor y la transporta a una planta eléctrica para generar electricidad.

#### **4.5.2.1.2 SISTEMA DE RECEPTOR CENTRAL.**

Un sistema de este tipo consiste en un campo de cientos de helióstatos, es decir espejos o reflectores *seguidores* del Sol, que reflejan los rayos solares sobre un receptor colocado en lo alto de una torre (Fig. 4.18). Así, la energía calorífica absorbida por el receptor es transferida a un fluido que circula a través del mismo y usada entonces para generar electricidad en un generador convencional accionado mediante vapor.

El fluido de calentamiento puede ser agua/vapor, sodio líquido o sal fundida. Esta última, por ejemplo, tiene la capacidad de retener el calor de manera muy eficaz, por lo que puede ser almacenada durante horas o incluso días, antes de ser utilizada para generar electricidad.

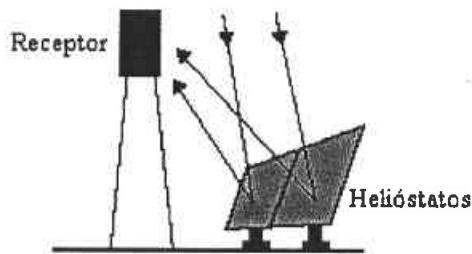


Figura 4.18. Sistema de receptor central o torre de energía.

Entre las características fundamentales de estos sistemas, se encuentran las siguientes:

- Concentran los rayos solares sobre un solo receptor, reduciendo de tal manera los requerimientos de transporte de la energía captada.
- Dado que pueden alcanzar altos valores en su razón de concentración, son elevadamente eficientes, tanto en la captación de energía como en su conversión a electricidad.
- Pueden almacenar la energía calorífica captada.

Al parecer, los sistemas de receptor central son los más adecuados para la generación de electricidad a gran escala (más de 1 MW). La energía calorífica producida con estos dispositivos es convertida en electricidad mediante generadores y alimentada a la red eléctrica. Sin embargo, existe la posibilidad de incorporar un sistema de almacenamiento de calor antes del generador (Fig. 4.19).

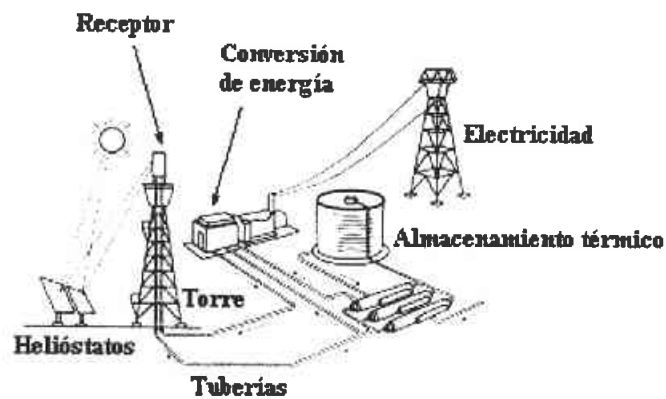


Figura 4.19. Esquema de una planta piloto con sistema de receptor central.

Con este tipo de sistemas es posible alcanzar temperaturas de entre 500 y 1 500 °C.



Figura 4.20. Este tipo de instalaciones puede operar 65% del año sin la necesidad de un sistema combustible de respaldo, proporcionando así, cientos de megawatts de energía limpia y renovable. Entre las distintas tecnologías que aprovechan la energía del Sol, las de concentración solar son las que ofrecen el costo más bajo para la generación de electricidad a gran escala.

#### **4.5.2.1.3 CONCENTRADORES DE DISCO PARABÓLICO.**

Este tipo de sistemas pertenece a la categoría de concentradores de enfoque, ya que requiere del mecanismo de seguimiento del Sol para captar eficazmente la radiación de dicho astro. Los colectores concentradores de disco parabólico presentan dos ejes de movimiento y concentran la energía solar sobre un receptor situado en el punto focal (centro) del disco (Fig. 4.21).

Este dispositivo está constituido básicamente por el colector, el receptor-intercambiador de calor y un motor. En él la luz solar es colectada por medio de una superficie en forma de disco y concentrada sobre el receptor que absorbe la energía radiante y la transforma en energía térmica que se transfiere a un fluido. La energía térmica puede ser convertida entonces en electricidad, empleando un motor-generador conectado directamente al receptor. El motor convierte el calor en energía mecánica de modo similar a los motores convencionales, esto es, comprimiendo el fluido de trabajo cuando está frío, calentándolo, y expandiéndolo a través de

una turbina o con un pistón para producir trabajo. La energía mecánica obtenida se puede transformar en electricidad por medio de un generador eléctrico o alternador conectado al motor. Otra opción es la de transportar la energía térmica a través de tuberías hasta un sistema central de conversión termo-eléctrica.

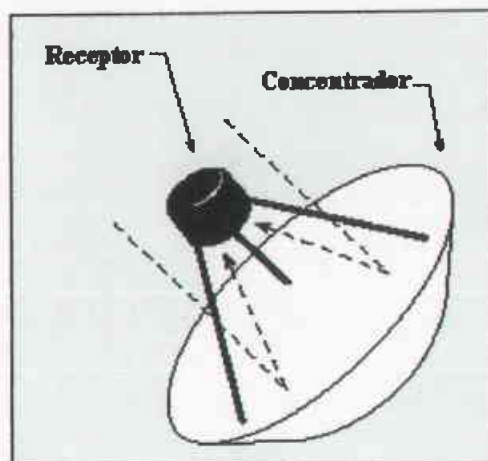


Figura 4.21. Concentrador de disco parabólico.

Algunas de las características de los concentradores de disco parabólico son las siguientes:

- Que cuentan con dos ejes de movimiento, por lo que tienen la capacidad de dirigirse de manera permanente hacia el Sol, con la finalidad de captar de manera constante la radiación que éste emite. Por tanto, éstos son los equipos más eficientes de entre todos los sistemas colectores.
- Habitualmente presentan razones de concentración que van de 600 a 2 000, y por tanto son altamente eficientes tanto en la captación de energía calorífica, como en la transformación de la misma en electricidad.
- Estos sistemas de colección pueden funcionar de manera independiente o como parte de un sistema mayor, en el que se requiere de un conjunto de este tipo de equipos.

En este tipo de sistemas, la superficie concentradora -cuya forma es parabólica- puede estar formada por una sola pieza de material reflectante o por un conjunto de reflectores. Asimismo, se cuenta con diversas opciones tanto para los receptores como para los motores.

Los sistemas de disco parabólico aún no se encuentran disponibles de manera comercial, sin embargo, a través de algunas pruebas se ha demostrado su gran potencial. Otra característica

de estos equipos es que carecen de la capacidad de almacenamiento térmico, no obstante, pueden crearse sistemas híbridos con combustible fósil (gas natural) para lograr la generación continua de electricidad, incluso durante los periodos de baja o nula insolación.

Con los equipos concentradores de disco parabólico es posible alcanzar temperaturas de hasta 1 500 °C.



Figura 4.22. Este sistema cuenta con helióstatos desarrollados por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los EU (NREL, por sus siglas en inglés). Los helióstatos proyectan los rayos solares sobre un receptor colocado sobre el centro del disco integrado por dichos helióstatos.

Otro dispositivo para la concentración de la energía solar es el sistema de lentes de Fresnel, que consiste en un conjunto de ranuras circulares que son cortadas en una lámina de plástico transparente, y que son colocadas de tal manera que la luz que pasa a través de cada ranura es refractada a un ángulo ligeramente diferente y converge sobre un solo punto. Estos lentes se fabrican actualmente en acrílico y tienen una alta calidad óptica, sin embargo, son propensos a sufrir deterioro por la acción directa de los rayos solares. Este tipo de colectores concentradores es todavía muy poco conocido y utilizado, por lo que no se ofrece mayor información al respecto.

El concentrador parabólico compuesto (CPC) es otro sistema que se utiliza en menor grado que los tres tipos de concentradores ya descritos. Este sistema consiste en un equipo similar al concentrador de canal parabólico, con la diferencia de que está integrado por una doble parábola, cuya sección transversal semeja a una doble "U", cuyas orillas externas se extienden hasta que su superficie es paralela con el eje del CPC, que sería el punto en el que se unen ambas parábolas, es decir, a la mitad de la doble "U". En este tipo de equipos el receptor de la energía calorífica se coloca sobre dicho eje, con el fin de captar la energía reflejada por ambas secciones parabólicas.

#### **4.6 COLECTORES FOTOVOLTAICOS.**

Una vez que se han descrito los dispositivos empleados para el aprovechamiento de la radiación solar en forma de calor, se procederá con el estudio de los sistemas fotovoltaicos, que son aquéllos que se utilizan para transformar directamente la luz solar en electricidad, esto es, sin transformaciones intermedias en otras formas de energía.<sup>32</sup>

##### **4.6.1 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN. EL EFECTO FOTOVOLTAICO.**

La generación de electricidad a partir de la energía luminosa del Sol se realiza por medio de las llamadas *celdas solares* o *fotovoltaicas*. Dichas celdas están constituidas esencialmente por dos placas cristalinas de material semiconductor,<sup>33</sup> en este caso silicio, Si, (que dicho sea de paso: es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre) al cual se añaden pequeñas cantidades de ciertos materiales que le confieren propiedades eléctricas particulares cuando se expone a la luz solar. Así, cuando los rayos del Sol inciden sobre la superficie de las celdas, los electrones son excitados por los fotones asociados a la luz, lo que significa que son desplazados de su posición original, dando lugar a migraciones de electrones que se

---

<sup>32</sup> El término *fotovoltaico*, fue usado por primera vez a fines del siglo XIX. La palabra se divide en dos partes: *foto*, derivada de la palabra griega empleada para luz, y *volt*, en referencia al pionero de la electricidad Alessandro Volta. De tal manera, *fotovoltaico* puede ser traducido literalmente como *luz-electricidad*. Tal fenómeno es el que se lleva a cabo en los materiales y dispositivos fotovoltaicos, el de la conversión de energía luminosa en energía eléctrica.

<sup>33</sup> Semiconductor es aquel material sólido, no metálico, que tiene un comportamiento conductor intermedio entre un metal y un aislante. En este tipo de materiales la resistividad es inversamente proporcional a la temperatura. Otra de sus características es que en ellos la corriente eléctrica puede circular en una sola dirección.

mueven a través del silicio produciendo una corriente eléctrica. Este fenómeno es conocido como efecto fotovoltaico y constituye la base del funcionamiento de las celdas fotovoltaicas.

Si bien el efecto fotovoltaico o fotoeléctrico fue descubierto desde el año 1839 por el físico francés Edmond Becquerel, no fue sino hasta poco más de un siglo después que se llegó a la comprensión cabal del fenómeno.

Las aplicaciones prácticas del descubrimiento de Becquerel comenzaron alrededor de 1970, cuando las celdas solares fueron adoptadas por programas espaciales, que implicaban su aplicación en satélites y vehículos espaciales.

#### **4.6.2 CARACTERÍSTICAS Y FUNCIONAMIENTO DE LAS CELDAS SOLARES.**

El proceso de transformación de la luz en electricidad se lleva a cabo gracias a lo que se conoce como el *dopado* del silicio, que consiste en la adición de ciertos materiales o *impurezas* al silicio, que facilitan el proceso deseado.

En las celdas fotovoltaicas una de las placas de silicio está dopada con arsénico, As, en cantidad de alrededor de 1 parte de arsénico por 1 millón de partes de silicio, y la otra con boro, B, igualmente en cantidad de 1 parte de boro por 1 millón de partes de silicio, aproximadamente.

Si se toma en cuenta que cada átomo de silicio tiene 4 electrones de valencia, se puede imaginar la estructura de un cristal de dicho material, en el que cada átomo de silicio está unido covalentemente a otros 4 átomos de silicio, completando de este modo su octeto. Al agregar entonces las impurezas, lo que sucede es que un átomo de boro sustituye a uno de los átomos de silicio, pero, dado que el boro sólo tiene 3 electrones de valencia, tal sustitución origina una *escasez* o *falta* de electrones, dando lugar a la aparición de *huecos* o *lagunas* que pueden moverse libremente a través del cristal. Este fenómeno ocurre debido a que el átomo de boro forma enlaces con cada uno de los cuatro átomos de silicio que lo rodean -tal como lo hacía el átomo de silicio que fue sustituido-, pero como sólo tiene 3 electrones en su última capa, a uno de estos enlaces le hace falta un electrón, lo que da como resultado un *hueco positivo*. El arsénico, por su parte, posee 5 electrones de valencia. Por consiguiente, al sustituir uno de los átomos de silicio por uno de arsénico, se produce un *exceso* de electrones. Esto se debe a que el átomo de arsénico puede formar únicamente cuatro enlaces con los cuatro átomos de silicio que lo rodean, utilizando para tal fin cuatro de sus cinco electrones.

por lo tanto, el quinto electrón que no forma ningún enlace, queda muy débilmente unido al átomo de arsénico. Así, los electrones de As que no forman enlaces son liberados fácilmente, por lo que se pueden desplazar sin dificultad a través del cristal.

La placa de Si dopada con B constituye una placa positiva (semiconductor tipo p) y la placa dopada con As constituye una placa negativa (semiconductor tipo n). De esta manera se conforma un diodo semiconductor, en el que existe una parte positiva y otra negativa. En la positiva el material se encuentra falto de electrones y a la negativa le sobran. Cuando se unen estas dos partes forman el diodo, cuya principal característica es que la corriente eléctrica fluye en un solo sentido, dado que está formado por un material semiconductor.

Si bien el silicio puro tiene la capacidad de generar temporalmente electrones y huecos móviles cuando es expuesto a la luz solar, éstos se mueven aleatoriamente, es decir, no se produce un flujo direccional de corriente dado que el Si por sí solo no tiene electrones ni de más ni de menos. Por tal motivo, lo que sucede finalmente es que se lleva a cabo una recombinación de las cargas con signos opuestos, neutralizándose mutuamente. Con el objetivo de producir un flujo direccional de corriente, se realiza el llamado dopaje del silicio para conseguir que una terminal atraiga electrones, mientras que la otra atrae huecos, que en este caso son considerados como cargas positivas.

De tal forma, cuando los rayos del Sol inciden sobre la placa positiva la atraviesan, dado que es muy delgada, y penetran más allá de la línea de contacto entre ambas placas (unión p-n), liberando electrones y huecos positivos en una y otra placa.<sup>34</sup> Cuando estas cargas se desplazan a través del material generan un flujo de corriente eléctrica, que circula por un conductor externo que completa el circuito, y que puede ser aprovechada instantáneamente, o bien ser almacenada en acumuladores para usarse durante la noche. Incluso se puede inyectar el excedente de electricidad --en caso de que lo haya-- a la red eléctrica general, lo que se traduce en importantes beneficios.

La operación de la celda continuará mientras actúe la luz solar sobre la misma, sin que haya consumo de materia ni generación de residuos o emisiones contaminantes. Este proceso, además, no da origen a productos secundarios, a no ser el calor del Sol que no es convertido

---

<sup>34</sup> Esto significa que cada fotón libera un par electrón-hueco. Cuanto mayor sea la cantidad de fotones que colisionan con la celda, tanto más numerosos serán los pares electrón-hueco generados por efecto fotovoltaico, y más elevada la cantidad de corriente eléctrica generada.



en electricidad, debido a que una parte de la luz que incide sobre la superficie de las celdas puede ser reflejada.

Por otra parte, dado que las celdas no tienen partes móviles, no producen ningún ruido en absoluto, no consumen más combustible que los rayos del Sol, tienen una duración prácticamente ilimitada, y requieren poco o nulo mantenimiento.

Después de aplicar al silicio el tratamiento antes descrito, lo que se consigue finalmente es una lámina muy delgada de silicio, generalmente de forma cuadrada, aunque también las hay redondas, con un espesor que va de 0.25 a 0.35 mm, de aproximadamente 10 cm por lado y con una superficie cercana a los 100 cm<sup>2</sup>.



Figura 4.23. Celda fotovoltaica.

Adicionalmente, se colocan contactos eléctricos de geometría y características especiales en ambas caras de la lámina, es decir, conectados a los componentes p y n de la celda. Así, mientras la cara no expuesta a la radiación de los rayos solares es totalmente cubierta, la cara que recibe la radiación se cubre sólo parcialmente, mediante un electrodo metálico en forma de red. Esto se hace con el fin de que el electrodo colecte de manera eficiente los portadores de carga generados en el cristal, permitiendo a la vez que los rayos solares alcancen un máximo porcentaje de la superficie del mismo.

Bajo condiciones óptimas de iluminación, cada celda fotovoltaica de silicio puede generar una tensión de entre 0.5 y 0.6 volts.

Un inconveniente de las celdas solares es que la electricidad que éstas generan se obtiene en forma de corriente continua (c.c.) y no de corriente alterna (c.a.), que es la que se emplea para la mayoría de las aplicaciones. Por lo tanto, es necesario convertir la c.c. a c.a. antes de utilizarla, lo cual se logra por medio de dispositivos conocidos como inversores de corriente.

Para conocer el rendimiento de operación de una celda solar basta con efectuar el cociente entre la energía eléctrica producida por la celda y la energía solar interceptada por su

superficie. Factores que intervienen en el rendimiento de la celda pueden ser: características del material, espesor de la oblea, superficie activa, geometría de los contactos eléctricos, etc.

#### **4.6.3 TIPOS DE CELDAS FOTOVOLTAICAS. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES.**

Si bien existen diversos tipos de celdas, de diferentes materiales, las descripciones anteriores se han basado en las celdas de silicio debido a que son la más ampliamente utilizadas. Las celdas fotovoltaicas pueden ser clasificadas en dos categorías principales:

- Celdas fabricadas a partir de un sólo cristal (monocristalinas).
- Y las llamadas celdas de *capa fina*.

Dado que ambos tipos de celdas están constituidas por capas delgadas, es importante señalar que en el contexto de sistemas fotovoltaicos el término "capa fina" se refiere al método de producción y características de las celdas producidas más que al espesor de las mismas. Así, al decir celdas de capa fina se hace referencia a aquéllas en las que las capas activas son policristalinas o laminillas que han sido formadas a partir de técnicas diversas, tales como evaporación, electrólisis, etc.

Las celdas monocristalinas se caracterizan por tener una eficiencia mayor a la de las celdas de capa fina. No obstante, es de esperarse que a través de la investigación en el campo de las celdas de capa fina se consiga mejorar el rendimiento de las mismas, aunque tal vez sin alcanzar el nivel de las celdas monocristalinas.

Dentro de las dos categorías ya mencionadas se pueden distinguir tres tipos de celdas por ser las más utilizadas y, por tanto, las más conocidas:

- Celdas de silicio monocristalino.
- Celdas de silicio policristalino.
- Celdas de silicio amorfo.

El primero de estos tres tipos de celdas pertenece, como su nombre lo indica, a la primera de las categorías principales y los dos siguientes a la segunda.

Las celdas de silicio monocristalino, el material más altamente desarrollado para la conversión fotovoltaica hasta el momento, ofrecen eficiencias de conversión que van de 15 a 17%. Por su parte, las celdas de silicio policristalino presentan eficiencias de entre 12 y 14%, mientras que con las de silicio amorfo no se consiguen valores superiores al 10%.

#### 4.6.4 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.

Generalmente, para aplicaciones prácticas las celdas solares suelen agruparse en lo que se denomina *módulos fotovoltaicos*. Esto se hace con el propósito de aumentar la potencia suministrada por las celdas, ya que por sí solas generan tensiones y corrientes pequeñas.

Las celdas pueden conectarse unas con otras en serie o en paralelo, para generar cantidades útiles de electricidad. Si se conectan en serie se incrementará el voltaje, ya que el voltaje total será igual a la suma de los voltajes individuales de cada celda, mientras que la corriente se mantendrá constante. En cambio, si se conectan las celdas en paralelo aumentará la corriente y se mantendrá constante el voltaje. Ya sea en serie o en paralelo, todas las celdas deben ser expuestas a la misma intensidad de radiación solar para conseguir el máximo rendimiento del equipo.

Asimismo, los módulos se pueden conectar en serie o en paralelo con el fin de conseguir potencias aun mayores. Al agrupar celdas se forman módulos, y al agrupar módulos se integran los llamados *paneles solares o fotovoltaicos*, que serán los elementos que finalmente nos proporcionen la potencia deseada.



Figura 4.24. Evolución desde la celda solar hasta el panel fotovoltaico.

Debido a su carácter modular, los sistemas fotovoltaicos pueden ser diseñados para satisfacer cualquier demanda eléctrica, sin importar cuan grande o pequeña sea.

Aunque existen módulos de distintas dimensiones, por lo general suelen estar constituidos por alrededor de 36 celdas, con superficies que oscilan entre  $0.5 \text{ m}^2$  y  $1.3 \text{ m}^2$ .

Los módulos son fabricados mediante técnicas que involucran la encapsulación de las celdas con un polímero resistente a los rayos ultravioleta, y su colocación tras una placa de vidrio especial templado de elevada transmisión lumínica. Este vidrio tiene el propósito de reducir al mínimo las pérdidas por absorción, así como el de proteger al equipo, proporcionando una superficie deslizante a los residuos ambientales. Además, soporta cambios climatológicos bruscos y presenta alta resistencia a la rotura que podrían ocasionar, por ejemplo, los impactos derivados de tormentas de granizo. En la parte posterior del módulo se coloca una plancha de aluminio anodizado o de material plástico (Tedlar) altamente resistente a las condiciones climatológicas más adversas. Se completa el conjunto con un marco de aluminio anodizado que lo rodea, proporcionándole una adecuada resistencia mecánica, y se sella con una junta de silicón.

Así se obtiene una estructura resistente y manejable, adecuada para soportar las inclemencias del tiempo, ya que permanecerá las 24 horas del día expuesta a la intemperie.

La cantidad de energía producida por un sistema fotovoltaico está en función de varios elementos, entre los que se encuentran principalmente la eficiencia de los módulos y la radiación solar incidente. Ésta última, como ya se ha dicho anteriormente, depende a su vez de la distancia Tierra-Sol y de la latitud de la localidad en donde se encuentra la instalación fotovoltaica. Otro elemento importante a considerar es la inclinación de los módulos o paneles, según sea el caso, ya que una correcta inclinación determinará la cantidad de energía solar captada y, por tanto, la cantidad de energía eléctrica generada.

Además de los módulos o paneles, existen otros componentes adicionales, que forman parte de una instalación fotovoltaica. Éstos son:

- Reguladores de tensión, para controlar la carga eléctrica proveniente de los paneles solares.
- Acumuladores, para almacenar la energía suministrada por los paneles y utilizarla durante los periodos nocturnos o de baja insolación.

- Inversores, que transforman la corriente continua (c.c.) generada por los paneles en corriente alterna (c.a.), que es la común en las redes de distribución eléctrica y en la mayoría de los aparatos.

Incluso, existen dispositivos ópticos que tienen la finalidad de mejorar el rendimiento de las celdas solares mediante la concentración de los rayos del Sol sobre la superficie de las mismas. Además, para algunas aplicaciones se puede recurrir al empleo de mecanismos de seguimiento del Sol con el propósito de captar un máximo de la radiación que éste emite.



Figura 4.25. Los paneles fotovoltaicos pueden ser colocados con una inclinación fija, o pueden ser acoplados a un mecanismo de seguimiento de la trayectoria del Sol, con el objetivo de captar un máximo de la radiación solar a lo largo de todo el día.

#### **4.6.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.**

Además de las ventajas medioambientales que ofrecen estos equipos, algunas de las cuales ya han sido mencionadas, existen algunas otras de carácter estratégico o económico, así como también algunas desventajas en comparación con otras fuentes energéticas.

Algunas de las ventajas de los sistemas fotovoltaicos son:

- Debido a su carácter modular pueden ser colocados en sitios cercanos o, incluso, en el mismo sitio en que la electricidad será consumida. Esto significa que al tener el sistema de generación eléctrica cerca del usuario final, se reducirán notablemente los costos de transmisión y distribución. Asimismo, esta característica ofrece la posibilidad de abastecer de energía eléctrica a comunidades rurales aisladas, sin acceso a la red eléctrica nacional.
- No se precisa de sitios con características especiales para poder instalar estos equipos, por lo que prácticamente cualquier lugar es apropiado. El único requerimiento es tener acceso a la luz del Sol.
- Elimina los costos ecológicos, económicos y estéticos que implicaría la instalación de líneas de distribución en zonas montañosas o apartadas de la red general de distribución.
- Evita el costoso mantenimiento de líneas eléctricas en dichas condiciones.
- El costo de operación de los sistemas fotovoltaicos es nulo.
- El riesgo de avería en estos equipos es muy bajo. Su probada durabilidad demuestra que los sistemas fotovoltaicos pueden operar por varias décadas con un mínimo mantenimiento.
- Su operación no produce ningún tipo de contaminación.
- Es una tecnología que permite aumentar o reducir la potencia instalada con relativa facilidad, de acuerdo a las necesidades.

Entre las desventajas podemos encontrar:

- Que la generación de energía eléctrica mediante esta tecnología es intermitente, ya que depende de la presencia de luz solar. Por tal motivo, es necesario recurrir al empleo de sistemas de acumulación, con la finalidad de almacenar la energía eléctrica generada durante las horas de insolación y así disponer de ella durante las noches o periodos de

baja insolación, asegurando de tal manera un suministro continuo de electricidad. No obstante, los sistemas fotovoltaicos pueden ser complementados con fuentes auxiliares de energía o métodos convencionales de generación eléctrica, evitando así la instalación de costosos sistemas de acumulación. Asimismo, al contar con el respaldo de sistemas complementarios para la generación de electricidad, el abasto de energía queda garantizado de manera ininterrumpida en caso de periodos prolongados de baja o nula insolación.

- El alto costo de fabricación de las celdas, lo que por un lado impide el uso de estos sistemas a gran escala, y por otro se contrapone a la supuesta gratuidad de la generación de energía eléctrica a partir de esta tecnología. Incluso se ha llegado a señalar que el gasto energético requerido para la fabricación de las celdas solares es tan grande, que serían necesarios varios años para recuperar dicha energía. Sin embargo, es necesario subrayar que todo proyecto que involucre la generación de energía requiere una fuerte inversión inicial, independientemente de la fuente energética de que se trate, y esta alternativa no es la excepción.

Lo cierto es que esta tecnología continúa desarrollándose, por lo que se espera que a medida que avance la ciencia el rendimiento de las celdas continúe en aumento, mientras su precio siga disminuyendo. Así, la generación de electricidad a través de sistemas fotovoltaicos será cada vez más competitiva con la generación de energía mediante mecanismos convencionales, y probablemente se consiga la producción a gran escala de sistemas fotovoltaicos, convirtiendo en realidad lo que ahora parece nada más que una utopía.

## CONCLUSIONES.

Como se ha expuesto en reiteradas ocasiones a lo largo de este trabajo, la cantidad de energía solar que incide sobre nuestro planeta es tan grande que podría satisfacer la demanda energética mundial en caso de que fuera debidamente aprovechada. Asimismo, se ha planteado la urgente necesidad de buscar alternativas energéticas respetuosas del medio ambiente.

Si bien el uso a gran escala de las energías renovables, en particular de la energía solar, no se conseguirá fácilmente ni a corto plazo, es preciso comenzar a centrar nuestra atención en estas alternativas, considerándolas por el momento no como fuentes de energía que sustituyan en definitiva a los combustibles fósiles, pero sí al menos como una opción que puede complementar el suministro energético, con el fin de reducir el consumo de energía a partir de fuentes no renovables.

Las razones para desear esta transición energética no provienen únicamente del hecho de que las fuentes no renovables de energía se estén agotando. El motivo fundamental para llevar a cabo dicha transición debe ser la preservación de nuestro entorno, el cual ha sido gravemente deteriorado por el uso excesivo de los combustibles fósiles, que suministran la mayor parte de la energía que se consume en todo el mundo actualmente.

Al tomar conciencia de la situación a la que nos ha llevado el actual modelo de generación y consumo de energía, resulta evidente que no podremos mantener dicho modelo por mucho tiempo sin poner en riesgo nuestra propia existencia.

A la vista de las presentes circunstancias un cambio en la base del suministro energético se hace impostergable. Las consecuencias de nuestra excesiva dependencia en combustibles fósiles para la generación de energía están ya a la vista de todos. Esto, sumado a la no menos excesiva industrialización ha provocado una variedad de efectos que pueden calificarse como catastróficos para la naturaleza, de la cual formamos parte.

Algunos de los más visibles son la contaminación del aire, el envenenamiento del agua, el empobrecimiento de la tierra que alguna vez fue fértil, la alteración del clima (como resultado del calentamiento global) y la destrucción de la capa de ozono. No obstante, cabe señalar que todo ello involucra a su vez un sinnúmero de efectos de consecuencias igualmente desastrosas.

El calentamiento global —provocado por el aumento de la concentración en la atmósfera de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero— es uno de los problemas más serios que debemos enfrentar. Si bien con frecuencia se refiere como un resultado grave de este



fenómeno el eventual derretimiento de los casquetes polares, con el consecuente aumento en el nivel de las aguas oceánicas, lo que supone un riesgo para las ciudades costeras, existen algunos otros efectos negativos que tal fenómeno puede desencadenar.

El aumento de la temperatura producido por la acumulación prolongada de gases de efecto invernadero puede dar origen, por ejemplo, a la alteración de los actuales patrones de lluvias y vientos. Así, podrá esperarse un incremento en la cantidad de lluvias, dado que se evaporará una mayor cantidad de agua con la existencia de temperaturas más elevadas que las de ahora. A pesar de esto, se cree que en aquellas zonas en las que actualmente se padecen sequías éstas serán aún más intensas y frecuentes, mientras que en otras regiones serán más severas las inundaciones. Esto a su vez, representa graves consecuencias para la actividad agrícola que depende precisamente de factores como la temperatura y las lluvias (en caso de no contar con modernos sistemas de riego). Adicionalmente, se ha predicho que los daños producidos por tormentas tropicales serán mucho más graves, debido a la existencia de mayores niveles en el agua de los océanos.

Todas estas alteraciones finalmente producirán efectos devastadores en distintas regiones del planeta. A medida que se presenten dichas perturbaciones la diversidad biológica será afectada visiblemente con lo que se desestabilizarán algunos ecosistemas. Los bosques y desiertos, por ejemplo, pueden verse perjudicados por los cambios de temperatura y humedad, volviéndose más húmedos o más secos, más fríos o más calurosos, trastornando así los procesos biológicos de las especies que habitan en dichos sitios. En la actualidad, el calentamiento global ha alterado ya procesos biológicos relacionados con las especies vegetales, tales como la caída de las hojas en cierto tipo de árboles. Al mismo tiempo, el fenómeno de la migración de los animales se ha visto alterado, principalmente en las aves. Estos fenómenos se originan como resultado de perturbaciones estacionales por efecto del calentamiento global, como en el caso de la primavera, que de acuerdo con algunos estudios es actualmente entre 12 y 18 días mas larga que hace veinte años. Otro ejemplo de animales que pueden verse especialmente afectados por un aumento de la temperatura son los peces. Al aumentar la temperatura su metabolismo se acelera, incrementando su necesidad de oxígeno y su velocidad de respiración. Así, mientras un aumento moderado en la temperatura del agua en un arroyo puede provocar que cierto tipo de peces se vuelvan más activos, un incremento mayor puede ocasionar que la actividad y la velocidad de los mismos disminuya, lo que a la vez reduce su capacidad para cazar a otros peces más pequeños de los cuales se

alimentan. Tal fenómeno resulta bastante grave, dado que dichos peces necesitan más alimento de lo normal para mantener su metabolismo incrementado por el calentamiento del agua. Al exceder la temperatura máxima tolerable sobreviene la muerte instantánea por falla del sistema nervioso, del sistema respiratorio o de procesos celulares. Adicionalmente, el desove y otros mecanismos reproductivos de los peces son desencadenados por cambios de temperatura, como ocurre con el calentamiento de las aguas en la primavera. De tal manera, las alteraciones climáticas pueden trastornar el ciclo reproductivo de los peces.

Por otra parte, es probable que la composición de los bosques sea alterada al presentarse cambios climáticos en tales regiones, ya que esto podría dar lugar a la sustitución de una especie vegetal por otra.

Irremediablemente la humanidad se verá afectada como consecuencia de todas estas perturbaciones, provocadas por la humanidad misma. El calentamiento global, origen de la mayor parte de las alteraciones climáticas aquí mencionadas, posiblemente producirá ondas extremas de calor en verano perjudicando a distintos sectores de la población mundial.

Otro efecto grave ocasionado por el aumento de la temperatura global es la propagación de enfermedades tales como la malaria, el dengue y la fiebre amarilla que son transmitidas por mosquitos que se ven favorecidos por climas calurosos, lo que permite que se extiendan sobre amplias regiones. Esta situación se vuelve alarmante si tomamos en cuenta que la malaria, por sí sola, cobra millones de víctimas anualmente a nivel mundial, de las cuales la mayoría son niños. Otra enfermedad que puede extender su alcance es el cólera, dado que un aumento en la temperatura de las aguas superficiales oceánicas puede favorecer el crecimiento de algas que son caldo de cultivo para dicho padecimiento.

A lo anterior debemos sumar, por si no fuera suficiente, los efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud humana y la de otras especies, así como las enfermedades y demás consecuencias de la contaminación de las aguas de ríos y mares, etc.

Ante esta situación se nos presenta la necesidad de buscar nuevas alternativas en lo que se refiere a suministro de energía, con el fin de evitar que daños mayores a los ya producidos sigan ocurriendo. De tal manera es que surge el interés en el estudio de las energías renovables, con el fin de plantear una alternativa que logre reducir el consumo de combustibles fósiles pero sin poner en riesgo el suministro energético, indispensable para el desarrollo de la humanidad. El abuso en el consumo de dichos recursos nos ha conducido a la

situación en la que nos encontramos actualmente. Queda claro ya, que no debemos permanecer indiferentes ante las condiciones presentes.

Entre las fuentes energéticas renovables la energía del Sol es la más abundante, eso sin considerar que el resto de las renovables -o al menos la mayor parte de ellas- no son sino manifestaciones secundarias de la energía solar.

Ahora, siendo que gran parte del territorio nacional cuenta con importantes niveles de insolación a lo largo de la mayor parte del año, es conveniente impulsar el estudio y desarrollo de sistemas que nos permitan aprovechar al máximo este recurso. Para tal propósito, es necesario adoptar los avances tecnológicos logrados en otros países, además de estimular el desarrollo nacional en la materia.

Asimismo, tomando en cuenta que la industria química es una de las principales responsables de los daños provocados a la naturaleza, sería justo comenzar por educar a aquellos profesionistas relacionados con el desarrollo de dicha industria en una cultura de respeto hacia el medio ambiente, y en los mecanismos apropiados para reducir los daños ocasionados como resultado de su labor profesional. Para ello sería necesario, por ejemplo, implementar programas de estudio en los que se abordaran temas relacionados con la investigación y desarrollo de tecnologías ecológicas, aprovechamiento de los recursos energéticos, eliminación de desechos y reciclaje, entre otros.

Del mismo modo, dado que es un problema que a todos afecta, es conveniente impulsar la educación a todos los niveles de la sociedad en varios de estos temas, sobre todo en lo que se refiere al aprovechamiento de recursos, ahorro energético y en la cultura de respeto al medio ambiente. Con esta finalidad pueden desarrollarse, por ejemplo, campañas o programas de difusión a cerca de los múltiples beneficios que involucra la explotación de los recursos energéticos renovables.

De esta manera es que podemos dar inicio a un cambio en la base de los actuales patrones de generación y consumo de energía, así como en la formación de personal capacitado en el diseño de sistemas para el aprovechamiento de las energías renovables, con el propósito de avanzar hacia el desarrollo sustentable.

## **BIBLIOGRAFÍA.**

1. Ahmed, Samir. «Prospects for Photovoltaic Conversion of Solar Energy». New York, Academic Press, 1981.
2. Baird, Colin. «Química Ambiental». Barcelona, Reverté, 2001.
3. B. Johanson, Thomas, et al. «Renewable Energy Sources for Fuels and Electricity». Washington, Island Press, 1993.
4. Cusa, Juan. «Energía Solar para Viviendas». Barcelona, Ediciones CEAC, 1991.
5. Dorantes Rodríguez, Rubén J., et al. «XXV Semana Nacional de Energía Solar». San Luis Potosí, Asociación Nacional de Energía Solar, A.C., 2001.
6. E. Manahan, Stanley. «Fundamentals of Environmental Chemistry». Florida, Lewis Publishers, 2001.
7. Farrington, Daniels. «Direct Use of the Sun's Energy». Massachusetts, Yale University Press, 1964.
8. Fuentes Castellanos, Carolina. «Las Energías Renovables en el Contexto Internacional». México, Distrito Federal, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, 2001.
9. Hermosillo Villalobos, Juan Jorge, et al. «Notas sobre el curso de Energía Solar». Tlaquepaque, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, 1995.
10. Isolani, Pieraldo, et al. «Energia dal Sole». Roma, Associazione Difesa Consumatori e Ambiente (ADICONSUM), 2003.
11. Kumar Kaushal, Devinder. «An Overview of Solar Termal Devices Based Solar Water Heating Systems & The Necessity of Using Solar Selective Coating». Gran Bretaña, Elsevier Science, 1997.
12. Norton, Brian. «Solar Energy Termal Technology». Berlin, Springer-Verlag, 1992.
13. Ortega Avila, Naghelli, et al. «Aplicación de Concentradores Tipo CPC en Refrigeración Solar». Temixco, Centro de Investigación en Energía (CIE), UNAM, 1998.
14. Quintanilla Martínez, Juan. «Radiación solar y sus usos en la tierra. Colectores solares planos y sus aplicaciones». Programa Universitario de Energía, UNAM, 1999.
15. Rincón Mejía, Eduardo, et al. «XXII Semana Nacional de Energía Solar». Mexicalli, Universidad Autónoma de Baja California, 1998.

16. Secretaría de Energía-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. «Programa Energía y Medio Ambiente Hacia el Desarrollo Sustentable». México, Distrito Federal, Secretaría de Energía, 2002.
17. Taylor, R.H. «Alternative Energy Sources for the Centralized Generation of Electricity», Great Britain, Adam Hilger Ltd., 1983.
18. Turk, Amos, et al. «Ecología - Contaminación - Medio Ambiente». México, Distrito Federal, Nueva Editorial Interamericana, 1973.
19. Yen, Teh Fu. «Environmental Chemistry: Essentials of Chemistry for Engineering Practice». New Jersey, Prentice Hall, 1999.

#### **PÁGINAS WEB.**

- ❖ <http://www.appa.es/> Asociación de Productores de Energías Renovables-APPA.
- ❖ <http://www.conae.gob.mx/> Comisión Nacional para el Ahorro de Energía.
- ❖ <http://www.eere.energy.gov/> U. S. Department of Energy.
- ❖ <http://www.energia.gob.mx/> Secretaría de Energía.
- ❖ <http://www.nrel.gov> National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy.
- ❖ <http://www.wri.org/> World Resources Institute.